МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

О. В. Садырева, И. Г. Коршунов

Ф И З И К А

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ВСЕХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ

Екатеринбург

2020

Методические указания составлены в соответствии с программами по курсу физики для студентов всех направлений подготовки в УГГУ. Они содержат условия задач для самостоятельной работы, при выполнении контрольных работ студентами по следующим темам курса физики: механика; молекулярная физика и термодинамика; электричество и магнетизм; механические и электромагнитные колебания и волны; волновая и квантовая оптика; квантовая физика и физика атома; элементы ядерной физики. Также в них содержатся методические указания к решению задач, их оформлению, список рекомендуемой литературы и справочные данные, необходимые для решения задач.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ И ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНИХ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

1. Номера задач, которые студент должен включить в свою контрольную работу, определяются преподавателем в начале соответствующего семестра.
2. Контрольные работы нужно выполнять чернилами в школьной тетради, на обложке указывается фамилия и инициалы студента, номер группы.
3. Условия задач в контрольной работе необходимо переписать полностью без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради нужно оставлять поля.
4. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан представить ее на повторную рецензию, включив в нее те задачи, при решении которых допущены ошибки.
5. При решении задач необходимо пользоваться следующей схемой:

- Внимательно прочитать условие задачи.
- Выписать столбиком все величины, входящие в условие, и выразить их в одних единицах (преимущественно в Международной системе единиц СИ).
- Если это возможно, представить условие задачи в виде четкого рисунка. Правильно сделанный рисунок – это наполовину решенная задача.
- Уяснить физическую сущность задачи, установить основные законы и формулы, на которых базируется условие задачи.
- Если при решении задачи применяется формула, полученная для частного случая, не выражающая какой-нибудь физический закон или не являющаяся определением какой-нибудь физической величины, то ее следует вывести.
- Если равенства векторные, то их необходимо спроектировать но оси координат и записать в скалярной форме.
- Решить задачу сначала в общем виде, то есть, в буквенных обозначениях, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.
- После получения расчетной формулы для проверки ее правильности следует подставить в правую часть формулы вместо символов величин их размерности, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине. Если такого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.
- Подставить в конечную формулу числовые значения, выраженные в единицах СИ. В виде исключения допускается выражать в любых, но одинаковых единицах числовые значения однородных величин, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.

- При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 3520 надо записать $3{,}52 \cdot 10^3$, вместо 0,00129 записать $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ и т. п.
- Вычисления по расчетной формуле надо проводить с соблюдением правил приближенных вычислений. Как правило, окончательный ответ следует записывать с тремя значащими цифрами. Это относится и к случаю, когда результат получен с применением калькулятора.
- Решение задачи должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями и комментариями.

1. МЕХАНИКА

1. Расстояние между двумя станциями метрополитена 1,5 км. Первую половину этого расстояния поезд проходит равноускоренно, вторую - равнозамедленно с тем же по модулю ускорением. Максимальная скорость поезда 50 км/ч. Найти ускорение и время движения поезда между станциями.

2. Шахтная клеть поднимается со скоростью 12 м/с. После выключения двигателя, двигаясь с отрицательным ускорением 1,2 м/с2 , останавливается у верхней приемной площадки. На каком расстоянии от нее находилась клеть в момент выключения двигателя и сколько времени двигалась до остановки?

3. С башни высотой 30 м в горизонтальном направлении брошено тело с начальной скоростью 10 м/с. Определить уравнение траектории тела, скорость тела в момент падения.

4. Для добывания руды открытым способом произвели взрыв породы. Подъем кусков породы, выброшенных вертикально вверх, длился 5 с. Определить их начальную скорость и высоту подъема.

5. При взрыве серии скважин камень, находящийся на уступе высотой 45 м, получил скорость 100 м/с в горизонтальном направлении. Какова дальность полета камня, сколько времени он будет падать, с какой скоростью упадет на землю?

6. Рассчитать скорость движения и полное ускорение шахтного электровоза в момент времени 5 с, если он движется по криволинейному участку радиусом 15 м. Закон движения электровоза выражается формулой $S = 800 + 8t - 0{,}5\,t^2$, м.

7. Во сколько раз тангенциальное ускорение точки, лежащей на ободе вращающегося колеса, больше ее нормального ускорения для того момента времени, когда вектор полного ускорения этой точки составляет угол 30° с вектором ее линейной скорости?

8. Под действием постоянной силы 118 Н вагонетка приобрела скорость 2 м/с, пройдя путь 10 м. Определить силу трения и коэффициент трения, если масса вагонетки 400 кг.

9. В шахте опускается равноускоренно лифт массой 280 кг, в первые 10 с он проходит 35 м. Найти натяжение каната, на котором висит лифт.

10. На горизонтальной платформе шахтной клети находится груз 60 кг. Определить силу давления груза на платформу: при равномерном подъеме и спуске, при подъеме и спуске с ускорением 3 м/^{2} , при спуске с ускорением 9,8 м/с^2.

11. Тело скользит по наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол 45° . Пройдя путь 36,4 см, тело приобретает скорость 2 м/с. Найти коэффициент трения тела о плоскость.

12. Найти закон движения (зависимость пройденного расстояния от времени) куска антрацита при скольжении его с нулевой начальной скоростью по стальному желобу с углом наклона 30° . Коэффициент трения 0,3.

13. Рудничный поезд массой 450 т движется со скоростью 30 км/ч, развивая мощность 150 л. с. (1 л. с. =736 Вт). Определить коэффициент трения.

14. Определить силу тяги, которую развивает лебедка при подъеме вагонетки массой 2 т с ускорением 0,5 м/^{2}, если коэффициент трения 0,03, а угол наклона железнодорожного полотна 30°.

15. Вагонетка скатывается по наклонной горке длиной 5 м. Определить путь, проходимый вагонеткой по горизонтали до остановки, и наибольшую скорость движения, если коэффициент сопротивления 0,0095. Угол наклона 5°.

16. Маховик, приведенный в равноускоренное вращение, сделав 40 полных оборотов, стал вращаться с частотой 480 мин$^{-1}$.Определить угловое ускорение маховика и продолжительность равноускоренного вращения.

17. Ротор шахтного электродвигателя совершает 960 об/мин. После выключения он останавливается через 10с. Считая вращение равнозамедленным, найти угловое ускорение ротора. Сколько оборотов сделал ротор до остановки?

18. Крутящий момент двигателя электрической лебедки 1,2 кН·м. Для остановки двигателя служат тормозные деревянные колодки, прижимающиеся с двух сторон к тормозному чугунному диску радиусом 0,6 м, жестко связанному с ротором двигателя. Найти силу давления, необходимую для остановки ротора, если коэффициент трения равен 0,5.

19. Двигатель мощностью 3 кВт за 12 с разогнал маховик до 10 об/с. Найти момент инерции маховика.

20. Была произведена работа в 1 кДж, чтобы из состояния покоя привести маховик во вращение с частотой $8с^{-1}$.Какой момент импульса (количества движения) приобрел маховик?

21. Шар и цилиндр имеют одинаковую массу 5кг и катятся со скоростью 10 м/с по горизонтальной плоскости. Найти кинетическую энергию этих тел.

22. Какую работу надо произвести, чтобы раскрутить маховик массой 80 кг до 180об/мин? Массу маховика считать равномерно распределенной по ободу с диаметром 1м.
23. Ротор шахтного электродвигателя совершает 960 об/мин. После выключения он останавливается через 10с. Считая вращение равнозамедленным, найти угловое ускорение ротора. Сколько оборотов сделал ротор до остановки?

24. Шар и сплошной цилиндр катятся по горизонтальной плоскости. Какую часть энергия поступательного движения каждого тела составляет от общей кинетической энергии?

25. Маховик, выполненный в виде диска радиусом 0,4м и имеющий массу 100 кг, был раскручен до 480 оборотов в минуту и предоставлен самому себе. Под действием трения вала о подшипники маховик остановился через 80 с. Определить момент сил трения.

2.МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

26. Какой объем занимает 1 кг водорода при давлении 106 Па и температуре 20°С? Молярная масса водорода $2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

27. Для автогенной сварки привезли баллон кислорода вместимостью 100 л. Найти массу кислорода, если его давление 12 МПа и темпера-тура 16°С. Молярная масса кислорода $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

28. Определить среднюю плотность сжатого воздуха в рудничной воздухопроводной сети, если давление воздуха в компрессоре составляет $7 \cdot 10^5$ Па, а давление у воздухоприемников $6 \cdot 10^5$ Па. Температура воздуха в начале и конце сети равна 27°С и 7°С. Молярная масса воздуха равна 0,029 кг/моль.

29. Стальной баллон емкостью 25 л наполнен ацетиленом $C_2 H_2$ при температуре 27° С до давления 20 МПа. Часть ацетилена использовали для автогенной сварки подкрановых путей в шахте. Какая масса ацетилена из-расходована, если давление в баллоне при температуре 23°С стало равным 14 МПа ? Молярная масса ацетилена 0,026 кг/моль.

30. Сжатый воздух в баллоне имеет температуру 15°С. Во время пожара температура воздуха в баллоне поднялась до 450° С. Взорвется ли баллон, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более 9,8 МПа? Начальное давление в баллоне 4,8 МПа.

31. Температура взрыва гремучей смеси, то есть температура, до которой нагреты в первый момент газообразные продукты взрыва, достигает в среднем 2600° С, если взрыв происходит внутри замкнутого пространства. Во сколько раз давление при взрыве гремучего газа превосходит давление смеси до взрыва, если последнее равно 10^5 Па, а начальная температура 17° С?

32. Компрессор, обеспечивающий работу отбойных молотков в забое, засасывает из атмосферы 100 л воздуха в секунду при давлении 1 атм. Сколько отбойных молотков может работать от этого компрессора, если для каждого молотка необходимо 100 $см^3$ воздуха в секунду при давлении 50 атм ?

33. В двигателе Дизеля сжимается адиабатически воздух, в результате чего его температура поднимается, достигая температуры воспламенения нефти 800° С. До какого давления сжимается при этом воздух и во сколько раз уменьшается его объем, если начальное давление 1 атм, начальная температура 80°С, γ=1,4?

34. Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до 10^{-15} мм рт. ст. Сколько молекул газа содержится в объеме 1 $см^3$ при указанном давлении и температуре 27° С ?

35. Определить средние квадратичные скорости молекул метана CH_4 до взрыва и после него, если температура до взрыва равна 20° С, а после него 2600° С. Молярная масса 0,016 кг/моль.

36. Найти среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре 350 К, а также кинетическую энергию вращательного движения всех молекул, содержащихся в 4 г кислорода.

37. Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме и при постоянном давлении окиси углерода CO, принимая этот газ за идеальный.

38. На сжатие азота при постоянном давлении была затрачена работа 12 кДж. Найти изменение внутренней энергии и затраченное количество теплоты.

39. Какое количество теплоты для нагревания от 50°С до 100° С надо сообщить азоту массой 28 г, который находится в цилиндре с подвижным поршнем? Чему равна при этом процессе работа расширения?

40. При адиабатическом процессе расширения внутренняя энергия кислорода уменьшилась на 8,38 кДж. Вычислить массу кислорода, если начальная температура его 47° С, а объем увеличился в 10 раз.

41. В двигателе внутреннего сгорания температура газообразных продуктов сгорания поднимается от 600° С до 2000° С. Найти количество теплоты, подведенное к 1 кг газа при постоянном давлении, изменение его внутренней энергии и совершенную работу, если удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме соответственно равны 1,25 кДж/(кг·К) и 0,96 кДж/(кг·К).

42. Определить мощность на валу компрессора производительностью 25 $м^3$ в минуту, работающего на подземную воздушную сеть, если первоначальное давление 1 атм, а давление, развиваемое компрессором в конце изотермического сжатия, составляет 7 атм.

43. Тепловая машина работает по обратимому циклу Карно. Температура нагревателя 227° С. Определить термический коэффициент полезного действия цикла и температуру охладителя, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от нагревателя, машина совершает работу 350 Дж.

44. От идеальной теплосиловой установки, работающей по циклу Карно, отводится ежечасно 270 МДж теплоты с помощью холодильника при 9° С. Определить полезную мощность установки, если количество подводимой в час теплоты равно 900 МДж. При какой температуре подводится теплота?

45. Газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в три раза выше, чем температура холодильника. Нагреватель передал газу 42 кДж теплоты. Какую работу совершил газ?

46. При прямом цикле Карно тепловая машина совершает работу, равную 200 Дж. Температура нагревателя 375 К, холодильника 300 К. Найти количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

47. Вследствие трения о шкив ремень заряжается, причем каждый квадратный метр ремня содержит 0,02Кл заряда. Ширина ремня 0,3м, скорость его движения 20 м/с. Какой заряд проходит ежесекундно через любую неподвижную плоскость, перпендикулярную ремню?

48. Определить заряд, емкость и потенциал Земли, считая ее шаром радиусом $6 \cdot 10^3$ км и зная, что напряженность поля около поверхности равна 100 В/м.

49. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора 6 кВ, заряд каждой пластины 10 нКл. Найти энергию конденсатора и силу взаимного притяжения пластин, если расстояние между ними 2 см.

50. Какое количество теплоты выделится при разрядке плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами 15 кВ, расстояние 1 мм, диэлектрик слюда ($\varepsilon = 6$), площадь каждой пластины 300 $см^2$?

51. Какую работу надо совершить , чтобы увеличить расстояние между пластинами воздушного конденсатора от 0,03 м до 0,1 м? Площадь пластин 100 $см^2$. Конденсатор подключен к источнику напряжения 220 В.

52. Камнедробилка должна работать под напряжением 100 В, потребляя ток в 40 А. Напряжение на электростанции 120 В, а расстояние до нее 1 км. Определить сечение медных соединительных проводов ($\rho = 1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом м).

53. Какой длины надо взять нихромовый проводник диаметром 1,5 мм для изготовления спирали вулканизатора , применяемого при сращивании кабелей, если сопротивление спирали 5,5 Ом, а удельное сопротивление нихрома $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ Ом м?

54. Цена деления прибора $1,5 \cdot 10^{-5}$ А /дел. Шкала прибора имеет 200 делений, его внутреннее сопротивление 100 Ом. Какие сопротивления нужно подключить к этому прибору и каким образом, чтобы можно было измерять напряжение до 200 В или ток до 4 А?

55. Определить сопротивление медных магистральных проводов при температуре 30^0 С. Расстояние от места расположения проводов до взрывной станции 400 м. Площадь сечения проводов 0,8 $мм^2$, $\rho = 0{,}017$(Ом· $мм^2$ /м), $\alpha = 0{,}0044$ град-1.

56. ЭДС батареи 12 В, ток короткого замыкания 5 А. Какую наибольшую мощность может дать батарея во внешней цепи?

57. Найти ток короткого замыкания для аккумуляторной батареи, если при токе 5 А она дает во внешнюю цепь мощность 9,5 Вт, а при токе 8 А мощность 14,4 Вт.

58. Ток в проводнике сопротивлением 100 Ом равномерно нарастает от 0 до 10 А в течение 30 с. Чему равно количество теплоты, выделившееся за это время в проводнике?

59. По прямому бесконечно длинному проводнику течет ток 50 А. Найти магнитную индукцию в точке, удаленной на расстояние 5 см от проводника.

60. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводам текут токи 50 А и 100 А в противоположных направлениях. Расстояние между проводами 20 см. Определить магнитную индукцию в точке, удаленной на 25 см от первого и на 40 см от второго провода.

61. Найти число витков в катушке диаметром 10 см, если магнитная стрелка, помещенная в ее центре, отклонилась от плоскости магнитного меридиана на 38° при токе 0,2 А. Горизонтальная составляющая земного магнитного поля 12,8 А /м . Плоскость катушки совпадает с плоскостью магнитного меридиана.

62. Определить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли,
если обмотка тангенс–буссоли имеет 10 витков радиусом 25 см. При токе 0,64 А стрелка отклоняется на угол 45°.

63. Плоский контур площадью 20 см ² находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,03 Тл. Найти магнитный поток, пронизывающий контур, если его плоскость составляет угол 60° с линиями индукции.

64. Электромагнит изготовлен в виде тороида со средним диаметром 51 см и вакуумным зазором 2 мм. Обмотка тороида равномерно распределена по всей его длине. Во сколько раз уменьшится напряженность магнитного поля в зазоре, если при неизменном токе в обмотке зазор увеличить в три раза? Магнитная проницаемость сердечника тороида 800.

65. Найти напряженность магнитного поля между полюсами электромагнита , если проводник массой 10 г и длиной 1м при токе в нем 19,6 А висит в поле , не падая.

66. В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл движется проводник длиной 10 см со скоростью 15 м /с, направленной перпендикулярно к магнитному полю. Найти ЭДС, индуцированную в проводнике.

67. Обмотка электромагнита содержит 800 витков. Площадь сечения сердечника 15 $см^2$, Индукция магнитного поля в сердечнике 1,4 Тл. Вычислить величину средней ЭДС , возникающей в обмотке при размыкании тока, если ток уменьшается до нуля в течение 0,001с.

68. На железное кольцо намотано в один слой 200 витков провода. Чему равна энергия Магнитного поля, если при токе 2,5 А магнитный поток в железе 0,5 мВб?

69. Замкнутый соленоид намотан на немагнитный каркас и содержит 20 витков на каждый сантиметр длины. Найти объемную плотность энергии поля при токе 1 А.

70. С какой скоростью должен нарастать ток в катушке с числом витков 800, площадью поперечного сечения 10 $см^2$, длиной 30 см, чтобы величина ЭДС самоиндукции, возникшей в ней, была равна 25 мВ?

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

71. Маятник для гравиметрической съемки за сутки совершил 57600 колебаний. Найти ускорение свободного падения, если длина маятника
0,56м.

72. Днище вибролюка, применяемого для погрузки руды в бункер поезда из очистной камеры, совершает гармоническое колебательное движение с амплитудой 5 мм и частотой 1500 $мин^{-1}$. Написать уравнение колебаний, если начальная фаза равна нулю.

73. Стол питателя, предназначенного для погрузки руды в вагонетки, колеблется с частотой 45 $мин^{-1}$. Определить максимальные скорость и ускорение стола, полную энергию колебаний, если масса питателя 1000 кг, амплитуда колебаний 72 мм.

74. Решето рудообогатительного грохота совершает вертикальное колебательное движение с амплитудой 5 см. Найти наименьшую частоту колебаний, при которой куски руды, лежащие на решете, будут отделяться от него и подбрасываться вверх.

75. Для погружения обсадных труб в глинистые отложения применяется вибровозбудитель ВО-10, амплитуда колебаний которого 0,13 см, частота вращения дебалансов 1200 $мин^{-1.}$ Определить максимальные скорость и ускорение, написать уравнение колебаний, если начальная фаза равна нулю.

76. Определить полную энергию колебаний и максимальную силу взаимодействия между подъемным сосудом массой 90 тонн и армировкой ствола шахты, если амплитуда горизонтальных колебаний сосуда 3 см, а циклическая частота 7 $с^{-1}$.

77. Точка одновременно совершает два гармонических колебания, происходящих по взаимно перпендикулярным направлениям и выражаемых уравнениями: $x = 0{,}5\sin t$, $y = 2\cos t$. Найти уравнение траектории точки, построить график ее движения.

78. Два одинаково направленных гармонических колебания одного периода с амплитудами 10 см и 6 см складываются в одно колебание с амплитудой 14 см. Определить разность фаз складываемых колебаний.

79. Груз, подвешенный к пружине, гармонически колеблется по вертикали с периодом 0,5 с. Коэффициент упругости пружины 4 Н/м. Определить массу груза.

80. Амплитуда затухающих колебаний маятника за 5 мин уменьшилась в два раза. За какое время, считая от начального момента, амплитуда уменьшится в восемь раз?

81. Источник незатухающих гармонических колебаний подчиняется закону $x = 5\sin 3140t$ (м). Определить смещение, скорость и ускорение точки, находящейся на расстоянии 340м от источника, через 1 с от начала колебаний, если скорость волны 340 м/с.

82. Уравнение незатухающих колебаний $y = 0{,}1\sin 0{,}5\pi t$ (м). Скорость волны 300 м/с. Написать уравнение колебаний для точек волны в момент времени 4 с после начала колебаний. Найти разность фаз для источника и точки на расстоянии 200 м от него.

83. Звуковые колебания с частотой 500 Гц и амплитудой 0,25 мм, распространяются в воздухе. Длина волны 70 см. Определить скорость распространения волны и наибольшую скорость колебаний частиц воздуха.

84. Определить коэффициент сжатия горной породы - величину, обратную модулю Юнга, если скорость распространения звуковых волн в горной породе равна 4500 м/с, а плотность породы составляет $2{,}3\cdot 10^3$ кг/м^3.

85. К одному из концов длинного стержня прикреплен вибратор, колеблющийся по закону $y = 10^{-6}\sin 10^4\pi t$ (м). Найти скорость точек в сечении стержня, отстоящем от вибратора на расстоянии 25см, в момент времени 10^{-4} с. Скорость волны $5\cdot 10^3$ м/с.

86. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 2 мГн и конденсатора емкостью 888 пФ. На какую длину волны настроен контур?

87. Найти частоту собственных колебаний в контуре, состоящем из катушки индуктивности и плоского конденсатора. Площадь каждой пластины конденсатора 30 см^2 и расстояние между ними 0,1 см. Число витков катушки 1000, длина ее 30 см, сечение 1 см^2.

88. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью 1,02 Гн и конденсатора емкостью 0,025 мкФ. Заряд на конденсаторе равен $2{,}5\cdot^{10\text{-}6}$ Кл. Какова зависимость разности потенциалов на конденсаторе от времени?

89. Катушка (без сердечника) длиной 50 см и площадью поперечного сечения 3 см^2 имеет 1000 витков и соединена параллельно с конденсатором. Он состоит из двух

пластин площадью 75 см^2 каждая, рас-стояние между пластинами 5 мм, диэлектрик - воздух. Найти период колебаний контура и длину волны, на которую он настроен.

90. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 1,02 Гн и конденсатора емкостью 25 нФ. На обкладках конденсатора сосредоточен заряд 2,5 мкКл. Написать уравнение изменения тока в цепи в зависимости от времени.

91. Разность потенциалов на конденсаторе в контуре за 1 мс уменьшается в три раза. Найти коэффициент затухания.

92. Электромагнитные волны распространяются в некоторой однородной среде со скоростью $2{,}5\cdot10^8$ м/с. Какую длину волны имеют электромагнитные колебания в данной среде, если частота колебаний 1 МГц?

93. Катушка с индуктивностью 30 мкГн присоединена к плоскому конденсатору с площадью пластин 0,01 м^2 и расстоянием между ними 0,1 мм. Найти диэлектрическую проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами, если контур настроен на длину волны 750 м.

94. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 80 пФ и катушки индуктивностью 0,5 мГн. Найти максимальный ток в контуре, если максимальная разность потенциалов на обкладках конденсатора 300 В. На какую длину волны резонирует данный контур?

95. Закон изменения разности потенциалов на обкладках конденсатора в контуре задан уравнением $U = 50\cos10^4\pi t$(В). Емкость конденсатора равна 0,1 мкФ. Найти период колебаний, индуктивность, длину волны. Написать закон изменения тока в контуре.

96. Колебательный контур состоит из конденсатора переменной емкости от 12 пФ до 80пФ и катушки с индуктивностью 1,2 мГн. Найти диапазон длин электромагнитных волн, которые могут вызывать резонанс в этом контуре.

97. Индуктивность колебательного контура 0,5 мГн. Какова должна быть электроемкость контура, чтобы он резонировал на длину волны 300 м?

98. Катушка (без сердечника) длиной 50 см и площадью поперечного сечения 3 см^2 имеет 1000 витков и соединена параллельно с конденсатором. Он состоит из двух пластин площадью 75 см^2 каждая, расстояние между пластинами 5 мм, диэлектрик - воздух. Найти период колебаний контура и длину волны, на которую он настроен.

99. Какую индуктивность надо включить в колебательный контур, чтобы при емкости 2 мкФ получить частоту 1000 Гц?

100. Индуктивность катушки в колебательном контуре 20 мкГн. Требуется настроить этот контур на частоту 5 МГц. Какую емкость следует выбрать?

101. Колебательный контур, состоящий из воздушного конденсатора с двумя пластинами по 100 $см^2$ каждая и катушки с индуктивностью 1 мкГн резонирует на волну длиной 10м. Найти расстояние между пластинами конденсатора.

5. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

102. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга I мм, расстояние от щелей до экрана 3м, расстояние между соседними интерференционными максимумами на экране 1,5 мм. Найти длину волны источника монохроматического света.

103. Оранжевые лучи с длиной волны 650 нм от двух когерентных источников, расстояние между которыми 120 мкм, падают на экран. Расстояние от источников до экрана 3,6 м. Найти расстояние между центрами соседних темных полос на экране.

104. Какую наименьшую толщину должна иметь пластинка, сделанная из материала с показателем преломления 1,54, чтобы при освещении ее лучами с длиной волны 750 нм, перпендикулярными к пластинке, она в отраженном свете казалась красной?

105. Между двумя плоскопараллельными пластинками лежит проволочка, отчего образовался воздушный клин. Пластинки освещаются светом с длиной волны 500 нм. Угол падения лучей 0°, длина пластинки 10 см. Расстояние между интерференционными полосами в отраженном свете 1,8 мм. Найти толщину проволочки.

106. Плосковыпуклая линза (n=1,5) с оптической силой 0,5 диоптрий выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Найти радиус пятого темного кольца Ньютона в проходящем свете (λ =600 нм).

107. Радиус кривизны плосковыпуклой линзы 4 м. Чему равна длина волны падающего света, если радиус 5-го светлого кольца Нью-она в отраженном свете равен 3,6 мм?

108. На щель шириной 0,2 мм падает нормально монохроматический свет с длиной волны 640 нм. Определить угол отклонения лучей, соответствующих первой светлой дифракционной полосе.

109. На пластинку со щелью падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения лучей, соответствующих второму дифракционному минимуму, равен 1°. Сколько длин волн падающего света составляет ширина щели?

110. На щель шириной 0,05 мм падает нормально монохроматический свет (λ=0,6 мкм). Найти угол между первоначальным направлением пучка света и направлением на четвертую темную дифракционную полосу.

111. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию в спектре третьего порядка накладывается красная линия гелия с длиной волны 670 нм спектра второго порядка?

112. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядка накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница (400 нм) спектра третьего порядка?

113. На дифракционную решетку, имеющую 800 штрихов на I мм, падает параллельный пучок белого света. Какова разность углов отклонения конца первого и начала второго спектров? Принять длину волны красного света 760 нм, фиолетового 400 нм.

114. На дифракционную решетку, содержащую 50 штрихов на миллиметр, падает в направлении нормали к ее поверхности белый свет. Спектр проектируется на экран с помощью линзы, помещенной вблизи решетки. Определить длину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 3 м. Границы видимого спектра 400 нм и 760 нм.

115. Угол преломления луча света в жидкости равен 35°. Определить показатель преломления этой жидкости, если отраженный луч максимально поляризован.
116. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были бы наиболее полно поляризованы.

117. Предельный угол полного внутреннего отражения луча на границе жидкости с воздухом равен 43°. Каков должен быть угол падения луча из воздуха на поверхность жидкости, чтобы отраженный луч был максимально поляризован?

118. Угол максимальной поляризации при отражении света от кристалла каменной соли равен 57°. Определить скорость распространения света в этом кристалле.

119. Угол между плоскостями поляризации двух призм Николя равен 45°. Во сколько раз
уменьшится интенсивность света, прошедшего через николи, если этот угол увеличить до 60°?

120. Температура «голубой» звезды $3 \cdot 10^4$К. Определить интегральную интенсивность излучения и длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности.

121. Приняв температуру поверхности Солнца равной 6000 К, определить энергию, излучаемую с одного квадратного метра за секунду и длину волны, соответствующую максимуму излучательной способности.

122. Поток энергии, излучаемой из смотрового окошка печи за секунду, равен 34 Вт. Найти температуру печи, если площадь отверстия 6 $см^2$.

123. Средняя величина энергии, теряемой вследствие излучения с одного квадратного сантиметра поверхности Земли за минуту, равна 0,55 Дж. Какую температуру должно иметь абсолютно черное тело, излучающее такое же количество энергии?

124. Печь при температуре 1100 К посылает на измерительный прибор некоторое тепловое излучение. Какова должна быть температура печи, чтобы получаемое прибором излучение увеличилось в два, четыре и шестнадцать раз?

125. Максимальная лучеиспускательная способность абсолютность черного тела приходится на длину волны 800 нм. Какая мощность должна быть подведена к этому телу, поверхность которого 100 $см^2$, чтобы поддерживать его при постоянной температуре.

126. Вследствие изменения температуры абсолютно черного тела, максимум испускательной способности сместился с 500 нм на 750 нм. Во сколько раз уменьшилась суммарная мощность излучения?

127. Какая доля энергии фотона израсходована на работу вырывания фотоэлектрона, если красная граница фотоэффекта равна 307 нм и кинетическая энергия фотоэлектрона I эВ?

128. Калий (работа выхода 2 эВ) освещается монохроматическим светом с длиной волны 509 нм. Определить максимально возможную кинетическую энергию фотоэлектронов.

129. Определить работу выхода электрона из цезия и серебра, если красная граница фотоэффекта у этих металлов составляет соответственно 660 нм и 260 нм.

130. Определить энергию, импульс и массу фотона, длина волны которого соответствует видимой части спектра с длиной волны 500 нм.

131. Определить давление света на стенки электрической стоваттной лампы. Колба лампы представляет собой сферический сосуд радиусом 5 см. Стенки лампы

отражают 10 % падающего на них света. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение.

132. На поверхность площадью 100 $см^2$ ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Найти величину светового давления, если поверхность полностью отражает все лучи и если полностью поглощает все лучи.

133. Давление света с длиной волны 600 нм на черную поверхность равно 2,2·10-7Н/$м^2$. Сколько фотонов падает на I $см^2$за одну секунду?

6. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И ФИЗИКА АТОМА

134. Определить длину волны, соответствующую границе серии Бальмера для водорода. Выделить эту спектральную линию на схеме энергетических уровней атома водорода. Постоянная Ридберга равна 1,097·107$м^{-1}$.

135. Найти наибольшую и наименьшую длины волн в первой инфракрасной серии спектра водорода (серии Пашена). Начертить схему энергетических уровней атома водорода.

136. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны 121,5 нм. Определить радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

137. Вычислить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на первый.

138. Определить длины волн де Бройля для электрона и протона, движущихся со скоростью 1000 км/с. Масса электрона 9,1·10^{-31}кг, масса протона 1,67·$10^{-27кг}$.

139. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы длина волны де Бройля была равна 0,10 нм ?

140. Определить длину волны де Бройля для электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода, находящегося в основном состоянии.

141. Электрон, движущийся со скоростью 6·10^6м/с, попадает в продольное ускоряющее однородное электрическое поле напряженностью 5 В/см. Какое расстояние должен пройти электрон в таком поле, чтобы его длина волны стала равной 0,10 нм?

142. Рассчитать дебройлевскую длину волны для протона с кинетической энергией, равной энергии покоя электрона 0,51МэВ.

143. Найти коротковолновую границу непрерывного рентгеновского спектра, если известно, что уменьшение приложенного к рентгеновской трубке напряжения на 23 кВ увеличивает искомую длину волны в два раза.

144. Найти длину волны коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра, если скорость электронов, подлетающих к антикатоду трубки, составляет 0,85 скорости света.

145. Для определения постоянной Планка к рентгеновской трубке приложили напряжение 16 кВ и определили минимальную длину волны сплошного рентгеновского излучения (λмин =77,6 пм). Вычислить по этим данным постоянную Планка.

146. Частица в потенциальной яме шириной *l* находится в возбужденном состоянии (n=2).
Вычислить вероятность нахождения частицы в крайней четверти ямы.
46. Частица в потенциальной яме находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружить частицу в крайней трети ямы?
147. В одномерной потенциальной яме шириной *l* находится электрон. Найти вероятность нахождения электрона на первом энергетическом уровне в интервале *l*/4, равноудаленном от стенок ямы.

148. Вычислить величину момента импульса L орбитального движения электрона, находящегося в атоме водорода в s-состоянии и в p-состоянии.

149. Частица в потенциальной яме шириной *l* находится в низшем возбужденном состоянии. Определить вероятность нахождения частицы в интервале *l*/4, равноудаленном от стенок ямы.

150. Определить возможные значения проекции момента импульса L_Z орбитального движения электрона в атоме водорода на направление внешнего магнитного поля. Электрон находится в d-состоянии.

151. Электрон находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной *l*
с бесконечно высокими стенками. Определить вероятность обнаружения электрона в средней трети ямы, если электрон находится в возбужденном состоянии (n=3).

7. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

152. Активность препарата пропорциональна числу ядер, распадающихся за секунду. Во сколько раз уменьшится активность препарата стронция $_{38}Sr^{90}$ через 100 лет? Период полураспада равен 28 лет.

153. Сколько β-частиц испускает в течение одного часа 1 мкг изотопа $_{11}Na^{24}$, период полураспада которого составляет 15 часов?

154. Препарат $_{92}U^{238}$ массой 1 г излучает $1{,}24 \cdot 10^4$ α -частиц в секунду. Найти период полураспада этого изотопа урана и активность препарата.

155. Найти число распадов за одну секунду в 1 г радия, период полураспада которого 1590 лет. Молярная масса радия 0,226 кг/моль.

156. Активность препарата пропорциональна числу ядер, распадающихся за одну секунду. Во сколько раз уменьшится активность иода $_{53}J^{124}$ спустя 12 суток? Период полураспада равен четырем суткам.

157. Сколько β-частиц испускается в течение суток при распаде изотопа фосфора $_{15}P^{32}$ массой 1 мкг? Период полураспада 14,3 суток.
158. Активность препарата уменьшилась в 256 раз. Сколько периодов полураспада составляет промежуток времени, за который произошло такое уменьшение активности?

159. За один год начальное количество радиоактивного вещества уменьшилось в три раза. Во сколько раз оно уменьшится за два года?
60. Какая доля начального количества радиоактивного вещества останется нераспавшейся через промежуток времени, равный двум периодам полураспада?

160. Дефект массы ядра $_7N^{15}$ равен 0,12396 а.е.м. Определить массу атома. (m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.).

161. Найти удельную энергию связи ядра $_6C^{12}$, если известно, что m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_0$n1 = 1,00867 а.е.м.; m $_{12}C^6$ = 12,00000 а.е.м.

162. Рассчитать массу нейтрального атома, если ядро его состоит из трех протонов и двух нейтронов, а энергия связи ядра равна 26,3 Мэв. (m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.).

163. Определить энергию связи ядра изотопа кислорода $_8O^{16}$, если m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.;
m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.; m $_8O^{16}$ = 1 5,99491 а.е.м.

164. Определить энергию связи, приходящуюся на один нуклон ядра атома $_{11}Na^{23}$, если m $_{11}Na^{23}$ = 22,98977а.е.м.; m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.

165. Найти дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра $_3Li^7$, если известно, что m $_3Li^7$ =7,01601 а.е.м.; m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.

166. Энергия связи электрона с ядром невозбужденного атома водорода $_1H^1$ равна 13,6 эВ. Определить, насколько масса атома водорода меньше суммы масс свободных протона и электрона.

167. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра $_5B^{11}$,если известны следующие массы: m $_5B^{11}$ = 11,00931 а.е.м.; m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.

168. Найти энергию, которую нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра $_{11}Na^{23}$, если известны следующие массы: m $_0n^1$ = 1,00867 а.е.м.; m $_{11}Na^{23}$ = 22,98977 а.е.м.; m $_{11}Na^{22}$ = 21,99444 а.е.м.

169. Найти энергию отрыва нейтрона от ядра $_2He^4$,если известны массы: m $_0n^1$= 1,00867 а.е.м.; m $_2He^4$ = 4,00260 а.е.м.; m $_2He^3$ = 3,01603 а.е.м.

170. Найти энергию, необходимую для удаления одного протона из ядра $_8O^{16}$ ($_8O^{16} \rightarrow {}_7N^{15} + {}_1H^1$). m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.; m $_8O^{16}$ = 15,99491 а.е.м.; m $_7N^{15}$ = 15,00011 а.е.м.

171. Найти изменение массы при следующей ядерной реакции:
$_{13}Al^{27} + {}_2He^4 \rightarrow {}_{15}P^{30} + {}_0n^1$, если m $_{13}Al^{27}$ =2 6,98154 а.е.м.; m $_2He^4$ = 4,00260 а.е.м.; m $_{15}P^{30}$= 29,97263 а.е.м.; m $_0n^1$= 1,00867 а.е.м.

172.Вычислить энергетический эффект ядерной реакции: $1H^2 + {}_1H3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1$, если m $_1H^2$ = 2,01410 а.е.м.; m $_1H^3$ =3,01605 а.е.м.; m $_0n^1$ =1,00867 а.е.м.; m $_2He^4$ = 4,00260 а.е.м.

173. В термоядерном реакторе с дейтериевым горючим может происходить вторичная термоядерная реакция $_2He^3 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^4 + {}_1H^1$. Вычислить энергию этой реакции. (m $_2He^3$ = 3,01603 а.е.м.; m $_1H^2$ = 2,01410 а.е.м.; m $_2He^4$ = 4,00260 а.е.м.; m $_1H^1$ = 1,00783 а.е.м.).

174. Вычислить энергию ядерной реакции $_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_6C^{14} + {}_1H^1$. (m $_7N^1$ ^{4}= 14,00307а.е.м.; m $_0n^1$ =1,00867 а.е.м ; m $_6C^{14}$= 14,00324 а.е.м.; m $_1H^1$= 1,00783 а.е.м.).

175. Определить энергию ядерной реакции $_3Li6 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4$. (m $_3Li^6$ = 6,01513 а.е.м.; m $_1H^2$= 2,01410 а.е.м.; m $_2He^4$ =4 ,00260 а.е.м.).

176. Какую минимальную энергию должен иметь квант для вырывания нейтрона из ядра $_6C^{14}$? Известны массы: m $_6C^{14}$ = 14,00324 а.е.м.; m $_0n^1$= 1,00867 а.е.м.; m $_6C^{13}6$ = 13,00335а.е.м.

177. Какую минимальную энергию необходимо затратить, чтобы разделить $_6C^{12}$ на три равные части.(m $_6C^{12}$= 12,00000 а.е.м.; m $_2He^4$= 4,00260 а.е.м.).

178. Определить энергию ядерной реакции $_{20}Ca^{14} + {}_{1}H^{1} \rightarrow {}_{19}K^{41} + 2He^{4}$. ($m\ {}_{20}Ca^{4\,4}$ = 43,95549 а.е.м.; $m\ {}_{1}H^{1}$ = 1,00783 а.е.м.; $m\ {}_{2}He^{4}$ = 4,00260 а.е.м.; $m\ {}_{19}K^{41}$ = 40,96184 а.е.м.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

8.1 Основная литература

.

1.	И.Г. Коршунов. Физика. – Екатеринбург: Ид-во УГГУ, 2014. – 341 с.
2.	В.И. Горбатов, В.Ф. Полев. Физика. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ (Ч.1, 2012.-105 с.; Ч.2, 2013.-115 с.; Ч.3.- 2014.-147 с.)
3.	Михайлов В.К. Физика: учебное пособие/ Михайлов В.К.— Электрон. текстовые данные.- М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.-120 с.-Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/23753.html - ЭБС «IPRbooks».
4.	Михайлов В.К. Волны. Оптика. Атомная физика. Молекулярная физика: учебное пособие/ Михайлов В.К., Панфилова М.И.-Электрон. текстовые данные.-М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2016.-144 с.-Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/62614.html -ЭБС «IPRbooks».
5.	Трофимова Т.М. Курс физики. Академия, 2010.- 560 с.

Дополнительная литература

1. И..Г. Коршунов. Основы физики.- Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. - 312 с.
2. Ветрова В.Т. Физика. Сборник задач: учебное пособие/ Ветрова В.Т.- Электрон. текстовые данные.- Минск: Вышэйшая школа, 2015.-446 с.- Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/48021.html -ЭБС «IPRbooks».
3. Чакак А.А. Физика. Краткий курс: учебное пособие для студентов очно-заочной формы обучения вузов, слушателей курсов повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов, для студентов факультета дистанционных образовательных технологий/ Чакак А.А., Летута С.Н. Электрон. текстовые данные. Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2011.-541 с. - Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/30092.html - ЭБС «IPRbooks».
4. Сарина М.П. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Часть 1. Механика: учебное пособие/ Сарина М.П.- Электрон. текстовые данные.- Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014.- 187 с.- Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/45392.html - ЭБС «IPRbooks».

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Некоторые физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	c	$3.00 \cdot 10^{8}$ м/с
Гравитационная постоянная	G	$6.67 \cdot 10^{-11}$ м^3/(кг·с^2)
Число Авогадро	N_A	$6.02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Молярная газовая постоянная	R	8.31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	k	$1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Атомная единица массы	*1а.е.м.*	$1.660 \cdot 10^{-27}$ кг
Элементарный заряд	e	$1.60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9.11 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$1.67 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ε_0	$8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Постоянная Планка	h $\hbar$	$6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж/с $1.05 \cdot 10^{-34}$ Дж/с

Приложение 2

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка			Множитель	Приставка			Множитель
Наименование	Обозначение			Наименование	Обозначение		
	русское	международное			русское	международное	
экса	Э	E	10^{18}	деци	д	d	10^{-1}
пэта	П	P	10^{15}	санти	с	c	10^{-2}
тера	Т	T	10^{12}	милли	м	m	10^{-3}
гига	Г	G	10^{9}	микро	мк	μ	10^{-6}
мега	М	M	10^{6}	нано	н	n	10^{-9}
кило	к	k	10^{3}	пико	п	p	10^{-12}
Гекто	г	h	10^{2}	фемто	ф	f	10^{-15}
Дека	да	da	10^{1}	атто	а	a	10^{-18}
П р и м е ч а н и е: Приставки гекто, дека, деци и санти допускается применять только в наименованиях кратных и дольных единиц, уже получивших широкое распространение (гектар, декалитр, дециметр, сантиметр и др.)							

Приложение 3

Единицы физических величин, имеющие собственные наименования

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср
Сила, вес	ньютон	Н
Давление	паскаль	Па
Напряжение (механическое)	паскаль	Па
Модуль упругости	паскаль	Па
Работа, энергия	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Частота колебаний	герц	Гц
Термодинамическая температура	кельвин	К
Разность температур	кельвин	К
Теплота, количество теплоты	джоуль	Дж
Количество вещества	моль	моль
Электрический заряд	кулон	Кл
Сила тока	ампер	А
Потенциал электрического поля, электрическое напряжение	вольт	В
Электрическая емкость	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	ом	Ом
Электрическая проводимость	сименс	См
Магнитная индукция	тесла	Тл
Магнитный поток	вебер	Вб
Индуктивность	генри	Гн
Сила света	кандела	кд
Световой поток	люмен	лм
Освещенность	люкс	лк
Поток излучения	ватт	Вт
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	грэй	Гр
Активность изотопа	беккерель	Бк

Приложение 4

Внесистемные единицы

Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна атомная единица массы	т а.е.м.	10^3 кг $1.66 \cdot 10^{-27}$ кг
Время	минута час сутки	мин ч сут	60 с 3600 с 86400 с
Плоский угол	градус минута секунда град	…• …′ …″ град	$1.74 \cdot 10^{-2}$ рад $2.91 \cdot 10^{-4}$ рад $4.85 \cdot 10^{-6}$ рад $(\pi/200)$ рад
Объем, вместимость	литр	Л	10^{-3} м^3
Длина	астрономическая единица световой год парсек	а.е. св. год пк	$1.50 \cdot 10^{11}$ м $9.46 \cdot 10^{15}$ м $3.08 \cdot 10^{16}$ м
Оптическая сила	диоптрия	Дптр	1 м$^{-1}$
Площадь	гектар	Га	10^4 м^2
Энергия	электрон-вольт	эВ	$1.60 \cdot 10^{-19}$ Дж
Полная мощность	вольт-ампер	В·А	
П р и м е ч а н и е: Единицы времени (минуту, час, сутки), плоского угла (градус, минуту, секунду), астрономическую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.			

Приложение 5

Плотность некоторых твердых тел

Твердое тело	Плотность, г/см^3	Твердое тело	Плотность, г/см^3
Алюминий	2.70	Цезий	1.90
Барий	3.50	Каменная соль	2,2
Ванадий	6.02	Латунь	8,55
Висмут	9.80	Марганец	7,40
Железо (чугун, сталь)	7.88	Платина	21,4
Литий	0.53	Золото	19,3
Медь	8.93	Висмут	9,8
Никель	8.90	Уран	18,7
Свинец	11.3	Цинк	7.15
Серебро	10.5	Вольфрам	19,3

Приложение 6

Плотность некоторых жидкостей и газов

Жидкость (при 15° С)	Плотность, г·/см^3	Газ (при нормальных условиях	Плотность, кг/м^3
Вода (дистиллированная при 4°С)	1.00	Водород	0.09
Глицерин	1.26	Воздух	1.29
Керосин	0.8	Гелий	0.18
Ртуть	13.6	Аргон	1,78
Масло (оливковое, смазочное)	0.9	Азот	1,25
Масло касторовое	0.96	Кислород	1.43
Сероуглерод	1.26		
Эфир	0.7		
Спирт	0.80		

Приложение 7

Удельное сопротивление ρ некоторых материалов

Материал	Удельное сопротивление, Ом·м	Материал	Удельное сопротивление, Ом·м
Алюминий	$2{,}53\cdot10^{-8}$	Ртуть	$9{,}6\cdot10^{-7}$
Алюминий провод	$2{,}87\cdot10^{-8}$	Свинец	$2{,}08\cdot10^{-7}$
Бумага	10^{15}	Серебро	$1{,}6\cdot10^{-8}$
Вода дистиллированная	10^{4}	Сталь литая	$1{,}3\cdot10^{-7}$
Вода морская	0,3	Сталь чистая	$1{,}01\cdot10^{-7}$
Вольфрам	$5{,}5\cdot10^{-8}$	Стекло	10^{11}
Графит	$3{,}9\cdot10^{-6}$	Стекло кварцевое	10^{16}
Железо чистое	$9{,}8\cdot10^{-8}$	Угольные щётки	$4\cdot10^{-5}$
Железо	$8{,}7\cdot10^{-8}$	Цинк	$5{,}9\cdot10^{-8}$
Золото	$2{,}2\cdot10^{-8}$	Чугун серый	$1\cdot10^{-6}$
Константан	$5\cdot10^{-7}$	Никель	$8{,}7\cdot10^{-8}$
Масло парафиновое	10^{14}	Нихром	$1{,}12\cdot10^{-6}$
Магний	$4{,}4\cdot10^{-8}$	Олово	$1{,}2\cdot10^{-7}$
Манганин	$4{,}3\cdot10^{-7}$	Платина	$1{,}07\cdot10^{-7}$
Медь	$1{,}72\cdot10^{-8}$	Медь провод	$1{,}78\cdot10^{-8}$

Приложение 8

Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Вещество	Проницаемость	Вещество	Проницаемость
Ацетон	21,4	Парафин	2,0
Вакуум	1,0	Парафинированная бумага	2,0
Воздух	1,000594	Полиэтилен	2,2
Вода	81	Слюда	7,0
Вода дистиллированная	31	Спирт этиловый	25,1
Воск	7,8	Спирт метиловый	33,5
Керосин	2,0	Стекло	7,0
Масло	5,0	Фарфор	5,0
Масло трансформаторное	2,2	Эбонит	2,6

Приложение 9

Греческий алфавит

Обозначения букв	Название букв	Обозначения букв	Название букв
A, α	Альфа	N, ν	ню
B, β	Бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	Гамма	O, o	омикрон
Δ, δ	Дэльта	Π, π	пи
E, ε	Эпсилон	P, ρ	ро
Z, ς	Дзета	Σ, σ	сигма
H, η	Эта	T, τ	тау
Θ, θ	Тэта	Y, υ	ипсилон
J, i	Иота	Φ, φ	фи
K, κ	Каппа	X, χ	хи
Λ, λ	Ламбда	Ψ, ψ	пси
M, μ	Ми	Ω, ω	омега

СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания к решению задач и выполнению домашних контрольных работ	3
1. Механика	4
2. Молекулярная физика и термодинамика	7
3. Электричество и магнетизм	10
4. Механические и электромагнитные колебания и волны	12
5. Волновая и квантовая оптика	15
6. Квантовая физика и физика атома	18
7. Элементы ядерной физики	19
Список литературы	23
Приложения	24

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Н. А. Зайцева

КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ В НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных и контрольных работ курсов «Химия» и «Неорганическая химия» для студентов всех специальностей

Екатеринбург
2020

З17

Рецензент: Т. И. Красненко, д-р химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории оксидных систем ИХТТ УрО РАН

Зайцева Н. А.
З17 КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ В НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных и контрольных работ курсов «Химия» и «Неорганическая химия» для студентов всех специальностей / Н. А. Зайцева. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. – 35 с.

В учебно-методическом пособии изложены краткие сведения о качественных реакциях в неорганической химии. Пособие содержит необходимые сведения для выполнения лабораторных работ по качественному анализу катионов и решения задач.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей.

© Зайцева Н. А., 2017

© Уральский государственный горный университет, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Качественная реакция – химическая реакция, с помощью которой можно определить наличие в растворе того или иного вещества или его фрагмента (катиона, аниона, функциональной группы). Качественная реакция на ионы позволяет обнаружить («открыть») в растворе присутствие соответствующих ионов. При обнаружении открываемого иона обычно фиксируют появление аналитического сигнала — образование осадка, изменение окраски раствора, появление запаха и т. д.

Требования к качественным реакциям

1. Экспрессность (реакция должна протекать быстро).
2. Высокая чувствительность.
3. Селективность или специфичность.
4. Необратимость.

Чувствительность реакции определяется наименьшим количеством искомого вещества, которое может быть обнаружено данным реактивом в капле раствора.

Существенной характеристикой анализа является селективность (избирательность).

По избирательности реагенты можно разделить на три группы:

1. *Специфические реагенты* – реактивы, с помощью которых в данных условиях можно обнаружить только одно вещество (ион),

например: крахмал для обнаружения I_2 (синяя окраска); щёлочь для обнаружения NH^{4+} (запах аммиака).

Специфические реакции – реакции, которые дают возможность открывать одни ионы в присутствии различных других ионов.

2. *Селективные реагенты* – реактивы, с помощью которых в данных условиях можно обнаружить небольшое число веществ. Например, диметилглиоксим в аммиачном буферном растворе реагирует с Fe (II), Co (II), Ni (II), Zr (IV), Th (IV).

3. *Групповые реагенты* – используются в систематическом анализе смеси катионов и взаимодействуют со всеми катионами одной аналитической группы.

Реакции, позволяющие обнаружить искомые ионы в отдельных порциях сложной смеси при условии устранения влияния других ионов, называют **дробными реакциями**, а метод анализа, основанный на применении дробных реакций, называют **дробным анализом.** При этом порядок обнаружения катионов и анионов не имеет особого значения. При **систематическом анализе**, в отличие от дробного, соблюдается определенный порядок разделения и последующего открытия ионов. К обнаружению ионов приступают лишь после удаления из раствора всех других ионов, мешающих открытию. Систематический (групповой) анализ применяют при невозможности использования дробного анализа. На основе растворимости их солей или других соединений ионы делят на аналитические группы, на основании различных классификаций катионов разработаны разные методы систематического анализа катионов.

Методы систематического анализа

1. Сероводородный – основан на разной растворимости сульфидов и хлоридов в зависимости от *pH*-среды.

2. Аммиачно-фосфатный – основан на разной растворимости фосфатов.

3. Кислотно-основной – основан на разной растворимости в кислотах и основаниях гидроксидов и солей (табл. 1).

Таблица 1

Классификация катионов по кислотно-основному методу

Группа	Катионы	Групповой реактив	Характеристика группы
I	Na^+, K^+, NH_4^+	–	Хлориды, сульфаты и гидроксиды растворимы в воде
II	Ag^+, Pb^{2+}, Hg_2^{2+}	2M HCl	Хлориды нерастворимы в воде и разбавленных кислотах
III	Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}	2M H_2SO_4	Сульфаты нерастворимы в воде, кислотах и щелочах
IV	$A1^{3+}$, Cr^{3+}, Zn^{2+}, $^*As^{3+}$, $^*As^{5+}$, Sn^{2+}, Sn^{4+}	4M NaOH (избыток)	Гидроксиды амфотерны, растворимы в избытке щелочи
V	Fe^{2+}, Fe^{3+}, Mn^{2+}, Mg^{2+}, Bi^{3+}, Sb^{3+}, Sb^{5+}	2M NaOH (25 % NH_4OH)	Гидроксиды нерастворимы в избытке щелочи и аммиаке
VI	Cu^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Hg^{2+}, Cd^{2+}	25% NH_4OH (избыток)	Гидроксиды растворимы в избытке аммиака с образованием аммиакатов

$^*As^{3+}$ и As^{5+} гидроксидов не образуют.

Лабораторная работа № 1

КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ НА КАТИОНЫ ЖЕЛЕЗА

Цель работы: познакомиться с качественными реакциями на катионы железа, определить наиболее подходящие реактивы для открытия Fe^{3+} и Fe^{2+}.

Для получения аналитического сигнала в качественном анализе используют химические реакции разных типов: реакции ионного обмена (осаждение, нейтрализация), окислительно-восстановительные, комплексообразование. Для обнаружения ионов железа возможно использование всех типов реакций.

Реакции ионного обмена в качественном анализе

Опыт 1. Действие щелочей на катионы Fe^{3+} и Fe^{2+}

В две пробирки налейте по 1 мл растворов $FeCl_3$ и $FeSO_4$, добавьте по 1 мл раствора щёлочи в каждую пробирку. Сравните полученные осадки $Fe(OH)_3$ и $Fe(OH)_2$, составьте уравнения обеих реакций. Растворимы ли полученные гидроксиды железа в избытке щёлочи?

Опыт 2. Действие раствора аммиака на катионы Fe^{3+} и Fe^{2+}

В две пробирки налейте по 1 мл растворов солей железа (III) и железа (II), добавьте по 1 мл разбавленного раствора гидроксида аммония в каждую пробирку. Сравните полученные осадки с

осадками из первого опыта. Составьте уравнения реакций. Проверьте действие избытка концентрированного гидроксида аммония на оба осадка: образуют ли ионы железа аммиачные комплексы?

Реакции окисления-восстановления

Опыт 3. Действие окислителей на катионы Fe^{3+} и Fe^{2+}

а) В две пробирки налейте по 1 мл растворов солей Fe^{2+} и Fe^{3+}, добавьте по 2 мл раствора серной кислоты. В обе пробирки прилейте раствор перманганата калия, в какой из них наблюдается обесцвечивание $KMnO_4$? Запишите уравнение реакции, учитывая, что в кислой среде перманганат-ионы восстанавливаются до ионов Mn^{2+}, уравняйте его методом электронно-ионного баланса.

б) В две пробирки налейте по 1 мл растворов солей Fe^{2+} и Fe^{3+}, добавьте по 2 мл раствора серной кислоты. В обе пробирки прилейте раствор бихромата калия, в какой из них наблюдается изменение окраски раствора? Запишите уравнение реакции, учитывая, что бихромат-ионы $Cr_2O_7^{2-}$ восстанавливаются до ионов Cr^{3+}, уравняйте его методом электронно-ионного баланса.

Опыт 4. Действие восстановителей на катионы Fe^{3+} и Fe^{2+}

В две пробирки налейте по 1 мл растворов солей Fe^{2+} и Fe^{3+}, добавьте по 1 мл раствора йодида калия. Какая из солей железа проявила окислительный свойства? Запишите уравнение реакции, расставьте коэффициенты методом электронно-ионного баланса.

Реакции с участием комплексных ионов

Опыт 5. Реакция ионов железа с роданидом аммония

В две пробирки налейте по 1 мл раствора $FeCl_3$ и $FeSO_4$, добавьте по 1 мл раствора роданида аммония NH_4SCN в каждую пробирку. В какой из пробирок наблюдается образование роданида железа красного цвета? Составьте уравнение реакции.

Опыт 6. Реакция ионов железа с реактивом Чугаева

В две пробирки налейте по 1 мл раствора соли железа (III) и железа (II), добавьте по 1 мл раствора аммиака и по 1 капле раствора диметилглиоксима ($C_4H_8N_2O_2$). Для какого иона железа наблюдается образование окрашенного внутрикомплексного соединения с реактивом Чугаева? Составьте уравнение реакции образования диметилглиоксимата железа [Fe $(C_4H_7O_2N_2)_2$].

Опыт 7. Берлинская лазурь и турнбуллева синь

На растворы $FeCl_3$ и $FeSO_4$ подействуйте каплей раствора жёлтой кровяной соли (гексацианоферрата (II) калия). В каком случае наблюдается выпадение синего осадка? Запишите уравнение реакции, предполагая, что выпавший осадок берлинской лазури имеет состав $Fe_4\,[Fe(CN)_6]_3$.

На растворы $FeCl_3$ и $FeSO_4$ подействуйте каплей раствора красной кровяной соли (гексацианоферрата (III) калия). В каком случае наблюдается выпадение синего осадка? Запишите уравнение реакции, предполагая, что выпавший осадок турнбуллевой сини

имеет состав Fe_3 [Fe $(CN)_6]_3$. Сделайте вывод, какой кровяной солью можно открыть ион Fe^{2+}, и с помощью какой обнаруживается ион Fe^{3+}.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что произойдет с зеленоватым осадком Fe $(OH)_2$ при добавлении к нему раствора перекиси водорода H_2O_2? Запишите уравнение реакции, уравняйте его методом электронно-ионного баланса.

2. Выпадет ли осадок при смешивании равных объемов растворов $FeCl_3$ и NaOH, если ПР (Fe $(OH)_3$) = $3{,}8 \cdot 10^{-38}$, а концентрации растворов 0,001 моль/л? Выпадет ли осадок при смешивании равных объемов растворов $FeSO_4$ и NaOH, если ПР (Fe $(OH)_2$) = $4{,}8 \cdot 10^{-16}$, а концентрации обоих растворов 0,001 моль/л?

3. Какой объём соляной кислоты с концентрацией 0,01 моль/л требуется для полного растворения осадка Fe $(OH)_3$ массой 0,5 г?

4. Реакция образования окрашенного роданида железа (опыт 3) является обратимой. Запишите выражение для константы равновесия этой реакции. Какими способами, согласно принципу Ле-Шателье, можно сместить равновесие в сторону образования окрашенного продукта?

5. Запишите уравнения реакций первичной и вторичной диссоциации красной и жёлтой кровяных солей. Почему чаще всего именно цианид-ионы используются для маскирования ионов железа в растворах?

6. Подвергаются ли соли железа гидролизу? Запишите уравнения взаимодействия с водой для $FeCl_3$ и $FeSO_4$, определите тип гидролиза и кислотность среды раствора. Какую окраску приобретёт лакмус в этих растворах?

Лабораторная работа № 2

КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ НА ИОНЫ Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}

Цель работы: познакомиться с качественными реакциями на ионы **Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}**, выполняемыми пробирно, капельно, и с использованием экстракции, определить наиболее подходящие реакции для открытия каждого иона.

Предел обнаружения – минимальная концентрация или минимальное количество вещества, которое может быть обнаружено данным методом допустимой погрешностью. Предел обнаружения в значительной степени зависит от условий протекания реакции. Обычно для обнаружения ионов применяют реакции с пределом обнаружения 10^{-7} г (0,1мкг) в 1 мл раствора.

Приемы для обеспечения низкого предела обнаружения

1. *Капельный анализ* – метод микрохимического анализа, в котором качественную реакцию проводят с использованием капли раствора. Реакции выполняют на стеклянной или фарфоровой пластинке, фильтровавальной бумаге (иногда предварительно пропитанной раствором реагента и высушенной). Пределы обнаружения веществ 0,1–0,001 мкг в капле объемом 50 мм^3. Минимальные пределы обнаружения достигаются при выполнении анализа на фильтровальной бумаге.

2. *Микрокристаллоскопический анализ* – метод анализа, основанный на реакциях образования кристаллических осадков с

характерной формой кристаллов, для рассмотрения которых используется микроскоп.

3. *Экстракция* – процесс переведения вещества из водной фазы в органическую, используется для разделения и концентрирования веществ.

4. *Флотация* – процесс разделения мелких твёрдых частиц в водной суспензии или растворе, основанный на их избирательной адсорбции на границах раздела фаз в соответствии с их смачиваемостью, используется для разделения и концентрирования.

5. *Метод «умножающихся реакций»* – ряд последовательных реакций, в результате которых получается новое вещество в количестве, во много раз превышающем первоначальное количество обнаруживаемого вещества.

6. *Каталитические реакции*.

Реакции в пробирке (в растворе)

Опыт 1. Действие щелочей на катионы Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}

В три пробирки налейте по 1 мл растворов солей Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}, добавьте по 1 мл разбавленного раствора щёлочи в каждую пробирку. Составьте уравнения реакций образования синего CoOHCl, голубого CuOHCl и зелёного NiOHCl. Подействуйте на каждый полученный осадок избытком концентрированной щёлочи, составьте уравнения реакций образования гидроксидов кобальта (II), никеля (II) и меди (II).

Опыт 2. Действие раствора аммиака на Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}

В три пробирки налейте по 1 мл растворов солей Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}, добавьте по 1 мл разбавленного раствора аммиака в каждую пробирку. Сравните полученные осадки с осадками из первого опыта. Составьте уравнения реакций.

Проверьте действие избытка концентрированного гидроксида аммония на полученные осадки, запишите уравнения реакций, учитывая, что в аммиачных комплексах кобальта и никеля координационное число комплексообразователя равно шести, а медь удерживает только четыре лиганда.

Разрушаются ли полученные аммиакаты раствором кислоты?

Опыт 3. Реакции с желтой кровяной солью

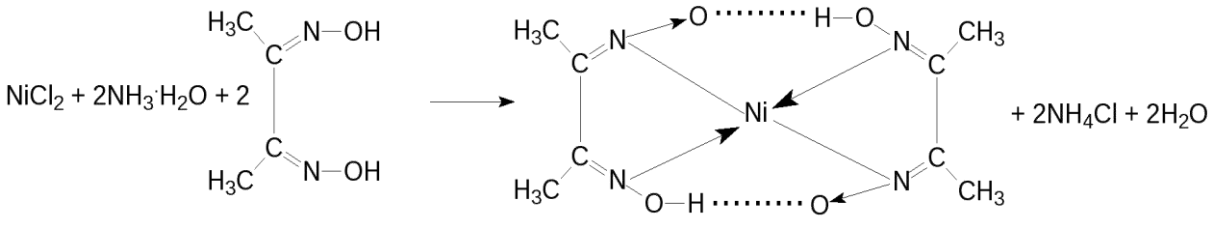
В три пробирки налейте по 1 мл растворов солей Co^{2+}, Ni^{2+} и Cu^{2+}, добавьте по 1 мл разбавленного раствора гексацианоферрата (II) калия в каждую пробирку. Что наблюдается? Составьте уравнения реакций, учитывая, что все осадки получены в результате полного ионного обмена.

Капельные реакции на фильтровальной бумаге

Опыт 4. Реакция катионов Ni^{2+} с реактивом Чугаева

На сухую фильтровальную бумагу поместите несколько капель раствора соли никеля (II), добавьте каплю раствора аммиака и каплю раствора диметилглиоксима $C_4H_8N_2O_2$ (реактив Чугаева). Сравните наблюдаемый аналитический сигнал с реакцией образования

диметилглиоксимата железа (II), выполненной в предыдущей работе. Запишите уравнение реакции



Проведите аналогичную реакцию с растворами меди (II) и кобальта (II). Какой из этих ионов может мешать определению ионов никеля и почему?

Опыт 5. Капельная реакция ионов Co^{2+}с роданидом аммония

Поместите на сухую фильтровальную бумагу несколько капель раствора хлорида кобальта (II), добавьте кристаллы сухой соли NH_4SCN, при необходимости добавьте ещё одну каплю раствора. Как изменилась окраска кристаллов? Составьте уравнение реакции образования комплексного соединения $(NH_4)_2[Co(SCN)_4]$.

Обнаружение катионов с использованием экстракции

Опыт 6. Реакция ионов Co^{2+} с роданидом аммония

Поместите в пробирку несколько капель раствора хлорида кобальта (II), добавьте кристаллы сухой соли тиоцианата (роданида) аммония. Как изменилась окраска раствора?

Чувствительность этой реакции можно повысить с помощью экстракции окрашенного комплекса $(NH_4)_2[Co(SCN)_4]$ органическим растворителем. Добавьте к полученному раствору несколько капель изоамилового спирта, взболтайте. Дождитесь разделения в пробирке водной и спиртовой фаз. Что при этом наблюдается?

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Составьте уравнения реакций первичной и вторичной диссоциаций гексаамминкобальта (II), гексаамминникеля (II), тетраамминмеди (II). Запишите формулы для константы нестойкости.

2. Для открытия ионов Ni^{2+} с помощью диметилглиоксима при реакции на капельной пластинке предел обнаружения Ni^{2+} – 0,16 мкг; в пробирке можно обнаружить 1,4 мкг Ni^{2+} в 1 мл. Предел обнаружения можно уменьшить до 0,015 мкг, если каплю анализируемого раствора нанести на фильтровальную бумагу, пропитанную диметилглиоксимом. Если осадок диметилглиоксимата никеля (II) флотируется на границе раздела фаз «вода – изоамиловый спирт», то предел обнаружения ионов Ni^{2+} понижается до 0,002 мкг. Определите минимальную молярную концентрацию ионов Ni^{2+}, открываемых каждым из способов.

3. Окисление тиосульфат-ионов ионами железа (III) ускоряется в присутствии ионов меди (каталитическая реакция). Время обесцвечивания тиоцианата железа (III) тиосульфатом натрия в отсутствие меди около двух минут. В присутствии ионов Cu^{2+} раствор тиоцианата железа (III) обесцвечивается мгновенно. Предел обнаружения меди – 0,02мкг в 1 мл. Определите минимальную молярную концентрацию ионов Cu^{2+}, соответствующую этому пределу обнаружения.

Лабораторная работа № 3

КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ НА ИОНЫ $A1^{3+}$, Cr^{3+}, Zn^{2+}

Цель работы: познакомиться с качественными реакциями на ионы **$A1^{3+}$, Cr^{3+}** и **Zn^{2+}**, научиться использовать амфотерность их гидроксидов в химическом анализе, определить наиболее подходящие реакции для открытия каждого иона.

Для проведения каждой качественной реакции необходимо соблюдать определенные условия, основные из которых: *pH*-среды; температура; концентрации реагентов; присутствие определенных веществ; отсутствие мешающих ионов или веществ. Для протекания многих реакций необходима среда с определенным значением *pH* водного раствора. Значение *pH* можно контролировать с помощью индикаторов или прибора *pH*-метра. Для поддержания нужного значения *pH* при необходимости используют соответствующие буферные растворы.

Буферные растворы — это растворы, способные сохранять постоянное значение *pH* при разбавлении водой или добавлении к ним определенного количества сильных кислот или оснований. В состав буферной смеси входят в определенном количественном соотношении слабые кислоты и их соли с сильными основаниями или слабые основания и их соли с сильными кислотами.

Амфотерность гидроксидов алюминия, цинка и хрома (III) позволяет отделять их от остальных катионов действием растворов щелочей различной концентрации.

Опыт 1. Действие щелочей на катионы $A1^{3+}$, Cr^{3+}, Zn^{2+}

В три пробирки налейте по 1 мл растворов хлоридов алюминия, хрома и цинка, добавьте по несколько капель очень разбавленного раствора щёлочи в каждую пробирку до образования нерастворимых гидроксидов. Составьте уравнения реакций. Подействуйте на каждый полученный осадок избытком щёлочи до полного растворения, составьте уравнения реакций образования тетрагидроксоалюмината, тетрагидроксоцинката и гексагидроскохромата натрия.

Опыт 2. Действие раствора аммиака на ионы $A1^{3+}$, Cr^{3+}, Zn^{2+}

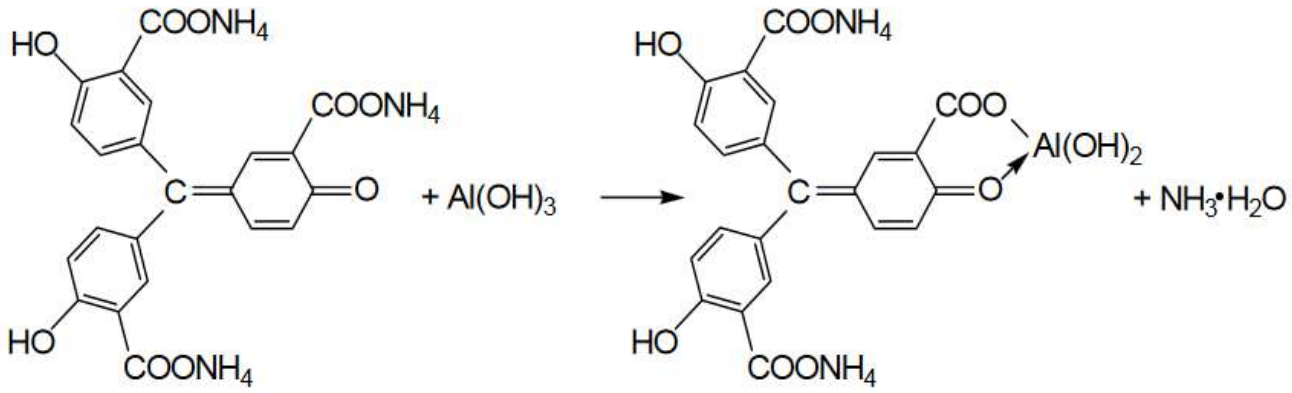
В три пробирки налейте по 1 мл растворов хлоридов алюминия, хрома и цинка, добавьте по 1 мл разбавленного раствора аммиака в каждую пробирку. Сравните полученные осадки с осадками из первого опыта. Составьте уравнения реакций образования соответствующих гидроксидов.

Проверьте действие избытка концентрированного гидроксида аммония на полученные осадки. Какие гидроксиды растворяются частично или полностью? Составьте реакцию комплексообразования, учитывая, что в образующихся аммиакатных комплексах координационное число каждого комплексообразователя вдвое больше, чем модуль его степени окисления.

Опыт 3. Реакция ионов алюминия с алюминоном

В пробирку поместите 3–4 капли раствора соли алюминия, при необходимости 2–3 капли раствора уксусной кислоты и 3–5 капель 0,01 % раствора алюминона ($C_{21}H_{11}O_9$ $(NH_4)_3$). Смесь нагрейте на

водяной бане, добавьте несколько капель раствора аммиака до щелочной реакции и выпадения красного хлопьевидного осадка алюминиевого лака.



Опыт 4. Реакция ионов цинка с желтой кровяной солью

В пробирке к 1 мл раствора $ZnCl_2$ добавьте 1 мл раствора гексацианоферрата (II) калия. Наблюдайте выпадение белого осадка $K_2Zn_3[Fe(CN)_6]_2$. Составьте уравнение этой реакции ионного обмена.

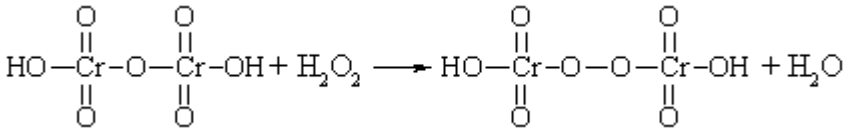
Опыт 5. Восстановительные свойства ионов хрома (III)

В пробирку поместите 2–3 капли раствора соли хрома(III), прибавьте 4–5 капель 2 моль/л раствора щёлочи NaOH до растворения осадка, и 2–3 капли 3 % раствора перекиси водорода H_2O_2. Нагревайте до изменения зеленой окраски раствора на желтую (цвет хромат-ионов CrO_4^{2-}). Составьте уравнение окислительно-восстановительной реакции, расставьте коэффициенты методом электронно-ионного баланса.

Опыт 6. Образование надхромовой кислоты

К жёлтому раствору хромата натрия, полученному в предыдущем опыте, прибавьте 5 капель пероксида водорода H_2O_2, ~0,5 мл изоамилового спирта, тщательно перемешайте и прибавьте по каплям раствор серной кислоты (1 моль/л). Верхний органический слой окрашивается в интенсивно синий цвет за счёт экстракции образовавшейся надхромовой кислоты H_2CrO_6. Запишите уравнение реакции, протекающее через образование дихромовой кислоты и её последующее окисление перекисью водорода:

$$2Na_2CrO_4+2H_2SO_4 \rightarrow H_2Cr_2O_7+2Na_2SO_4+H_2O$$



$$H_2Cr_2O_8 + 3\ H_2O_2 \leftrightarrow 2\ H_2CrO_6 + 2\ H_2O$$

Составьте электронно-ионный баланс для этой реакции.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Составьте уравнения первичной и вторичной диссоциации солей, полученных в первом опыте: тетрагидроксоалюмината, тетрагидроксоцинката и гексагидроскохромата натрия.

2. Напишите выражение константы нестойкости для комплексных ионов тетраамминцинка и гексаамминхрома, полученных во втором опыте.

3. Напишите уравнения диссоциаций хромовой, дихромовой и надхромовой кислот.

Лабораторная работа № 4

РАЗДЕЛЕНИЕ И ОБНАРУЖЕНИЕ КАТИОНОВ Ag^{+}, Pb^{2+}, Hg^{2+} МЕТОДОМ ОСАДОЧНОЙ БУМАЖНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Цель работы: познакомиться с разделением и идентификацией катионов методом бумажной хроматографии

Хроматография – физико–химический метод разделения веществ, основанный на использовании сорбционных процессов в динамических условиях.

Анализируемые компоненты распределяются между подвижной и неподвижной фазами. Неподвижной фазой служит твердое вещество – сорбент. Подвижной фазой является жидкость или газ, протекающий через неподвижную фазу – элюент. Элюент в процессе хроматографирования перемещается вдоль сорбента, так что частицы анализируемых веществ могут многократно переходить из подвижной фазы в неподвижную и наоборот. Разделение веществ с помощью хроматографии основано на различном сродстве разделяемых компонентов к подвижной и неподвижной фазам.

Бумажная хроматография – вид хроматографии, в котором носителем неподвижного растворителя служит очищенная от примесей фильтровальная бумага. Подвижная фаза продвигается вдоль листа бумаги, главным образом за счет капиллярных сил. Бумажная хроматография отличается простотой, экспрессностью, наглядностью разделения, высокой чувствительностью (можно определить 10–20 мкг вещества с точностью 5–7 %).

Опыт 1. Подготовка фильтровальной бумаги

Два фильтра «синяя лента» диаметром 45 мм смочите 5 %-м раствором йодида калия, опуская фильтры в раствор пинцетом. Высушите фильтры на воздухе в чашке Петри.

Опыт 2. Получение первичной осадочной хроматограммы

В центр каждого высушенного фильтра нанесите пипеткой каплю анализируемой смеси катионов Ag^+, Hg^{2+} и Pb^{2+}, после её полного впитывания нанесите еще одну, дайте ей впитаться. Катионы анализируемой смеси вступают в реакцию с KI, которым пропитан фильтр, образуя осадочную хроматограмму, зоны которой имеют цвета осадков AgJ (жёлтый), HgJ_2 (оранжевый), PbJ_2 (ярко-желтый).

Полученные хроматограммы необходимо промыть дистиллированной водой. Для промывания хроматограмм нанесите на фильтры 2–3 капли дистиллированной воды, внося каждую последующую каплю после впитывания предыдущей до увеличения размера зон в два–три раза. Высушите обе осадочные хроматограммы, заполните табл. 1, составьте уравнения реакций образования осадков.

Таблица 1

Первичная хроматограмма смеси катионов Ag^+, Hg^{2+}, Pb^{2+}

Зона адсорбции	Цвет зоны	Ион
1. Первая – хорошая адсорбция (в центре фильтра)		
2. Вторая – средняя адсорбция		
3. Третья – плохая адсорбция (края фильтра)		

Опыт 3. Получение проявленной осадочной хроматограммы

Анализируя первичную хроматограмму, легко определить катионы Hg^{2+} (оранжевая зона в центре) и Pb^{2+} (ярко-желтая зона по периферии). Бледно-желтая окраска AgJ либо видна плохо (из-за маскировки оранжевым HgJ_2 и ярко-желтым PbJ_2), либо не видна совсем. Для того, чтобы явно видеть зону серебра, первичную хроматограмму на одном из фильтров необходимо проявить.

Для проявления хроматограммы внесите в центр фильтра каплю раствора NaOH. При этом йодид свинца растворится в NaOH с образованием бесцветного плюмбита натрия Na_2PbO_2, йодид ртути останется неизменным, бледно-жёлтое пятно йодида серебра постепенно почернеет вследствие превращения гидроксида серебра (I) в оксид серебра (I), который затем разложится до свободного серебра.

Заполните табл. 2, составьте уравнения всех протекающих при проявке первичной хроматограммы реакций.

Таблица 2

Вторичная хроматограмма смеси катионов Ag^+, Hg^{2+}, Pb^{2+}

Зона адсорбции	Цвет зоны	Ион
1. Первая – хорошая адсорбция (в центре фильтра)		
2. Вторая – средняя адсорбция		
3. Третья – плохая адсорбция (край фильтра)		

По результатам работы сделайте вывод об эффективности метода бумажной хроматографии для дробного открытия катионов Ag^{+}, Hg^{2+}, Pb^{2+} при их совместном присутствии.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие процессы лежат в основе хроматографического анализа?

2. Вычислите ПР йодида свинца (II), если известно, что растворимость его равна 0,03 г на 0,1 кг воды.

3. Выпадет ли осадок при взаимодействии равных объемов растворов $AgNO_3$ и KI, если концентрации обоих растворов 0,001 моль/л, а произведение растворимости йодида серебра ПР (AgI) =$8{,}3 \cdot 10^{-17}$.

4. В избытке йодида калия осадок йодида ртути (II) растворяется без изменения степеней окисления элементов с образованием комплексного соединения тетрайодомеркурата калия. Составьте уравнение этой реакции, а также уравнения первичной и вторичной диссоциаций полученного соединения, запишите выражение для константы нестойкости комплексного иона.

5. Оксид серебра (I) неустойчив на воздухе, поэтому он используется не в чистом виде, а в аммиачном растворе (реактив Толленса). При взаимодействии гидроксида аммония и оксида серебра (I) образуется гидроксид диамминсеребра (I). Составьте уравнение этой реакции, а также уравнения первичной и вторичной диссоциаций полученного соединения, запишите выражение для константы нестойкости комплексного иона.

6. Дайте определения терминам «элюент», «сорбент», «элюат», «подвижная фаза», «неподвижная фаза», «собрция», «десорбция».

Лабораторная работа № 5

ДРОБНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КАТИОНОВ

Цель работы: с помощью качественных реакций определить, какая соль находится в каждой пробирке.

Ход работы

В двенадцати пронумерованных пробирках находятся следующие растворы соли:

Раствор бесцветный	**Раствор может быть окрашенным**
Хлорид аммония	Сульфат меди (II)
Хлорид кальция	Хлорид кобальта (II)
Сульфат марганца (II)	Хлорид никеля (II)
Сульфат железа (II)	Хлорид хрома (III)
Хлорид цинка	Хлорид железа (III)
Хлорид алюминия	
Нитрат свинца (II)	

После получения у преподавателя нескольких пробирок (по вариантам 3–6 шт.,) составьте в тетради таблицу для записи результатов анализа:

Качественный анализ растворов, номер (№) (запишите номера пробирок)

Испытуемый раствор	Добавленный реагент	Наблюдение	Предполагаемый состав	Вывод
Опыт № 1 «Открытие окрашенных ионов»				
№ 13	отсуствует	Раствор розовый	Ионы Co^{2+}	
№ 13	NaOH	Выпал синий осадок, при добавлении избытка щёлочи стал розовым	CoOHCl $Co(OH)_2$	В пробирке был $CoCl_2$
Опыт № 2 «Действие щелочей»				
№ 14				

Опыт 1. Открытие окрашенных ионов

Опишите внешний вид растворов, сделайте предположения, какие растворы могут быть в каждой из пробирок, занесите их в таблицу. Наиболее вероятные предположения (для окрашенных растворов) проверьте с помощью соответствующих качественных реакций, взяв для анализа небольшую порцию испытуемого раствора. Составьте уравнения реакций, сделайте выводы.

Опыт 2. Действие щелочей на испытуемые растворы

Взяв пробы оставшихся исследуемых растворов (по 0,5 мл), подействуйте на них разбавленным раствором щёлочи, добавляя его по каплям. Занесите в таблицу аналитический сигнал: выделился запах аммиака, выпал неизменяющийся осадок, выпал осадок, растворимый в избытке щёлочи или темнеющий на воздухе. Обратите внимание, что гидроксид свинца $Pb(OH)_2$ проявляет амфотерные свойства, растворяясь в избытке щелочи с образованием плюмбита Na_2PbO_2, а светло-бежевый гидроксид марганца $Mn(OH)_2$ постепенно окисляется кислородом воздуха, что выглядит как потемнение раствора на границе с воздухом:

$$2\ Mn(OH)_2 + O_2 \rightarrow 2\ MnO_2\downarrow + 2\ H_2O.$$

Эту реакцию можно сделать более наглядной, ускорив процесс окисления с помощью перекиси водорода:

$$Mn(OH)_2 + H_2O_2 \rightarrow MnO_2\downarrow + 2\ H_2O.$$

Сделайте предположения о том, какие катионы находятся в пробирках. Проверьте предположения с помощью качественных реакций, для ионов Mn^{2+} кроме реакции с H_2O_2 можно использовать

ОВР с окислением марганца до розовых перманганат-ионов висмутатом натрия в сильнокислой среде:

$$2MnSO_4+5NaBiO_3+16HNO_3 \rightarrow$$

$$2HMnO_4+5Bi(NO_3)_3+NaNO_3+2Na_2SO_4+7H_2O.$$

Сделайте выводы, запишите уравнения выполненных реакций.

Опыт 3. Действие раствора аммиака на испытуемые пробы

Взяв пробы оставшихся исследуемых растворов (по 0,5 мл), подействуйте на них разбавленным раствором аммиака. Занесите в таблицу аналитический сигнал. Сделайте предположения о том, какие катионы находятся в пробирках. Проверьте предположения с помощью качественных реакций. Сделайте выводы, запишите уравнения выполненных реакций.

Опыт 4. Открытие неокрашенных ионов

Взяв пробы оставшихся исследуемых растворов (по 0,5 мл), проведите качественный анализ на катионы, которые остались не открытыми. Сделайте выводы, запишите уравнения выполненных реакций.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ В НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ»

1. Две соли окрашивают пламя в фиолетовый цвет. Одна из них бесцветна, и при лёгком нагревании её с концентрированной серной кислотой отгоняется жидкость, в которой растворяется медь; последнее превращение сопровождается выделением бурого газа. При добавлении к раствору второй соли раствора серной кислоты жёлтая окраска раствора изменяется на оранжевую, а при нейтрализации полученного раствора щёлочью восстанавливается первоначальный цвет. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

2. В двух сосудах находятся растворы неизвестных веществ. При добавлении к раствору первого вещества хлорида бария выпадает осадок белого цвета, нерастворимый в воде и кислотах. Осадок белого цвета выпадает также и при добавлении раствора нитрата серебра к пробе, отобранной из второго сосуда. При нагревании пробы первого раствора с гидроксидом натрия выделяется газ с резким запахом. При взаимодействии второго раствора с хроматом натрия выпадает осадок жёлтого цвета. Напишите уравнения описанных реакций.

3. Действием концентрированной серной кислоты на белые кристаллы при нагревании получен газ. При пропускании этого газа через раствор нитрата серебра выпал белый творожистый осадок. Кристаллы окрашивают пламя спиртовки в жёлтый цвет. Какая соль была взята для реакции? Приведите её формулу и название. Запишите уравнения реакций, описанных в тексте.

4. Порошкообразное вещество белого цвета окрашивает пламя горелки в оранжево-красный цвет. При действии соляной кислоты «вскипает» с выделением тяжёлого газа без цвета и запаха. Это вещество способно растворяться в воде при одновременном пропускании избытка углекислого газа. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

5. Некоторое кристаллическое вещество, окрашивающее пламя в жёлтый цвет, хорошо растворяется в воде. При добавлении к этому раствору нитрата серебра выпадает жёлтый осадок, не растворимый в разбавленной азотной кислоте. При действии на исходный раствор бромной воды образуется коричневое окрашивание. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

6. Для определения качественного состава белый, нерастворимый в воде порошок с зеленоватым оттенком подвергли

термическому разложению, в результате которого образовалось два оксида. Один из них — порошок чёрного цвета, при добавлении к которому раствора серной кислоты и последующем нагревании образовался раствор голубого цвета. Про другой известно, что это газ тяжелее воздуха, без цвета и запаха, играющий важную роль в процессе фотосинтеза. Запишите химическую формулу и название вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе исследования.

7. Для проведения исследования бесцветные кристаллы соли, которые при непродолжительном нахождении на воздухе приобрели голубой цвет, нагрели до выделение бурого газа и образование чёрного порошка. При пропускании над нагретым полученным порошком водорода наблюдалось появление красного налёта простого вещества — металла. Известно, что металл, образующий катион, входит в состав многих сплавов, например бронзы. Запишите химическую формулу и название исследованной соли. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе исследования его свойств.

8. Для изучения состава соли был взят раствор, который разделили на две части. К первой части этого раствора добавили хлорид натрия, в результате чего выпал белый осадок. При добавлении ко второй части раствора цинковой стружки образовались серые хлопья металла, катионы которого обладают дезинфицирующим свойством. Известно, что выданная соль

используется для изготовления зеркал и в фотографии, а её анион является составной частью многих минеральных удобрений. Запишите химическую формулу и название вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе исследования.

9. Для изучения состава соли были взяты белые кристаллы хорошо растворимого в воде вещества, которое используется в хлебопечении и кондитерской промышленности в качестве разрыхлителя теста. В результате процесса термического разложения выданной соли образовались три вещества, два из которых при обычных условиях являются газами. При нагревании соли с гидроксидом натрия образуется газ, водный раствор которого используется в медицине под названием нашатырный спирт. Запишите химическую формулу и название вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе исследования.

10. Для установления качественного состава была изучена соль тяжёлого металла, оксид которого используется в производстве хрустального стекла. При термическом разложении соли образуется оксид этого металла и два газообразных вещества: одно из них — газ бурого цвета, а другое — важнейший компонент воздуха. При приливании к раствору выданной соли раствора йодида калия выпадает осадок ярко-жёлтого цвета. Запишите

химическую формулу и название вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе исследования.

11. Для определения качественного состава неизвестной соли азотной кислоты исследовали белое кристаллическое вещество. Это вещество при нагревании полностью разлагается без образования сухого остатка. При действии горячего раствора гидроксида натрия выделяется бесцветный газ с резким запахом, вызывающий посинение лакмусовой бумаги. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

12. В химической лаборатории хранится склянка с кристаллическим веществом белого цвета. При действии на него гидроксида натрия выделяется лёгкий, бесцветный газ с резким запахом, вызывающий посинение лакмусовой бумаги. При действии на него сильной кислоты выделяется бесцветный газ без запаха, вызывающий покраснение раствора лакмуса. При приливании к раствору этого вещества раствора гидроксида кальция выделяется нерастворимый в воде осадок. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

13. Кристаллическое вещество оранжевого цвета при нагревании значительно увеличивается в объёме за счёт выделения бесцветного газа и образует твёрдое вещество тёмно-зелёного

цвета. Выделившийся газ взаимодействует с литием даже при комнатной температуре. Продукт этой реакции гидролизуется водой с образованием газа с резким запахом, способного восстановить медь из её оксида. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

14. Для исследования свойств неизвестного вещества его концентрированный раствор разделили на две части. В пробирку с одной частью раствора поместили медную проволоку. При этом наблюдалось выделение бурого газа и растворение меди. При добавлении к другой части раствора силиката натрия наблюдалось образование бесцветного студенистого осадка. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

15. Для определения качественного состава неизвестной соли исследовали раствор голубого цвета. При добавлении горячего раствора сильной кислоты выделился газ с резким запахом жжёной резины, окрашивающий лакмус в красный цвет. При добавлении раствора аммиака сначала выпал голубой осадок, который затем растворился в избытке аммиака с образованием фиолетового раствора. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

16. Для определения качественного состава неизвестной соли исследовали её раствор желтоватого цвета. При добавлении раствора сильной кислоты появился резкий запах уксуса. При добавлении роданида аммония раствор приобрёл кроваво-красную окраску. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

17. Для определения качественного состава неизвестной соли исследовали её бесцветный раствор. При добавлении раствора разбавленной серной кислоты выделился газ с запахом тухлых яиц и выпал белый осадок, не растворимый в кислотах. При взаимодействии порции исходного раствора с хроматом натрия выпадает осадок жёлтого цвета. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

18. Для определения качественного состава было выдано кристаллическое вещество — средняя соль многоосновной кислоты, катион которой не является ионом металла. При взаимодействии данного вещества с гидроксидом натрия выделяется газ с резким раздражающим запахом, а при приливании к раствору выданного вещества раствора нитрата серебра выпадает осадок жёлтого цвета. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

19. Для определения качественного состава студентам было выдано бесцветное кристаллическое вещество — соль. К одной части раствора исследуемой соли прилили раствор нитрата серебра, в результате чего выпал осадок жёлтого цвета. А при добавлении к другой части раствора карбоната натрия выпал белый осадок. Известно, что катион этой соли образован щёлочно-земельным металлом, входящим в состав костной ткани человека. Анион этой соли состоит из атомов химического элемента, образующего простое вещество, спиртовой раствор которого используется в качестве дезинфицирующего средства. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

20. При определении качественного состава неизвестного кристаллического вещества белого цвета было установлено, что его раствор взаимодействует с раствором гидроксида калия с образованием осадка. А при добавлении к раствору исследуемого вещества раствора нитрата бария выпадает осадок белого цвета, не растворимый в кислотах. Известно, что катион металла, входящий в состав данного соединения, входит в состав хлорофилла. Этот металл ранее применялся также в фотографии для получения вспышки. Запишите формулу и название этого вещества. Составьте уравнения реакций, которые были проведены в процессе его распознавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В. Н. Качественный химический полумикроанализ. М.: Химия. 1973. 584 с.

Глинка Н. Л. Общая химия: учебник / под ред. В. А. Попкова, А. В. Бабкова. 18-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Юрайт»; ИД «Юрайт», 2011. 886 с.

Гринвуд Н., Эршно А. Химия элементов (в 2 томах): учебник. Изд-во «Бином. Лаборатория знаний», 2015. 1280 с.

Карапетьянц М. Х., Дракин С. И. Общая и неорганическая химия: учебник. 5-е изд. Изд-во Книжный дом «Либроком» 2015. 592 с.

Крешков А. П. Основы аналитической химии. Ч. 1. Теоретические основы. Качественный анализ. М.: Химия. 1970. 460 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..……..…...3
Лабораторная работа № 1. КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ НА КАТИОНЫ ЖЕЛЕЗА.....6
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ…….……9
Лабораторная работа № 2. КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ НА ИОНЫ Co^{2+}, Ni^{2+} И Cu^{2+}…….....…….……10
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ……...…14
Лабораторная работа № 3. КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ НА ИОНЫ $A1^{3+}$, Cr^{3+}, Zn^{2+}…….…..…15
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ……...…18
Лабораторная работа № 4. РАЗДЕЛЕНИЕ И ОБНАРУЖЕНИЕ КАТИОНОВ Ag^{+}, Pb^{2+}, Hg^{2+} МЕТОДОМ ОСАДОЧНОЙ БУМАЖНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ……..…..…..…19
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ……...…22
Лабораторная работа № 5. ДРОБНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КАТИОНОВ…….…….....23
ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «КАЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКЦИИ В НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ»……...…….…..26
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…….…….……...34

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ ЗАНЯТИЯМ ПО КУРСУ «ХИМИЯ» ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВСЕХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ЧАСТЬ 1

Составили: Н.Б. Смирнова, доц., канд. хим.наук

В.М. Сахарова, доц., канд. техн. наук

2020

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Введение ……..….. 4
Общие правила работы в химической лаборатории ……..…… 7
Правила техники безопасности при работе с химическими реактивами ……. 7
Оказание первой медицинской помощи ……. 8
Оформление лабораторного журнала ……. 8
1. Периодичность изменения свойств оксидов и гидроксидов …….. 9
1.1. Экспериментальная часть ……. 11
1.2. Контрольные вопросы и задания ……. 12
2. Химическая кинетика …… 14
2.1. Экспериментальная часть …….. 16
2.2. Контрольные вопросы и задания …….. 18
3. Химическое равновесие …… 19
3.1. Экспериментальная часть ……. 20
3.2. Контрольные вопросы и задания ……. 21
4. Ионные равновесия в растворах электролитов ……..… 23
4.1. Экспериментальная часть …… 25
4.2. Контрольные вопросы и задания …… 26
5. Реакции ионного обмена …… 27
5.1. Экспериментальная часть …… 29
5.2. Контрольные вопросы и задания …… 31
6. Гидролиз солей …… 32
6.1. Экспериментальная часть …… 34
6.2. Контрольные вопросы и задания …… 35
Список литературы ……. 37

ВВЕДЕНИЕ

Горные инженеры, геологи и геофизики сталкиваются с самыми разнообразными явлениями природы, химическими по своей сущности: быстрой выветриваемостью, окисляемостью, различной смачиваемостью горных пород, с особенностями воздушной среды под землей, с обводненностью горных выработок, агрессивностью рудничных вод. Поэтому им требуются более глубокие знания по химии, чем любому другому специалисту. Инженеры горнодобывающей отрасли способны справиться с современными задачами горно-металлургической и горно-химической промышленности только зная весь путь от разведки полезного ископаемого до его переработки. Физико-химическая некомпетентность горных инженеров и геологов является причиной недостатков в развитии горной науки, техники и технологии, бедственного экологического положения горных предприятий.

Роль химии в подготовке инженеров непрерывно возрастает в связи с необходимостью решения задач по снижению уровня потерь полезных компонентов и увеличению комплексности использования руд, рациональному применению вскрышных пород, очистке и использованию шахтных вод и сточных вод обогатительных фабрик, защите от коррозии бурового и горнодобывающего оборудования, заблаговременной дегазации угольных месторождений, применению физико-химических методов упрочнения грунтов, геотехнологическим методам добычи полезных ископаемых.

В горном деле широко применяются химические материалы: химические растворы при бурении и тампонаже скважин, взрывчатые вещества при отбойке угля, руды и породы, химические добавки, препятствующие распыление угля и налипанию льда на конвейерную ленту, материалы для покрытия из пены, предохраняющей от промерзания участка разработки, компоненты для отвердевания закладочных смесей, огнетушащие составы, синтетические смолы для укрепления горных пород, реагенты для флотации и обогащения руд и большой ассортимент таких обычных химикатов как горючие и смазочные материалы, цемент, стекло, керамика, гидро-, термо- и электроизоляционные материалы, лаки, краски, пластмассы, резина.

Еще благодаря усилиям Д.И. Менделеева, химию, как одну из фундаментальных дисциплин, стали преподавать во всех высших школах России. Химия вместе с физикой и математикой составляет основу профессиональной подготовки специалистов высокой квалификации.

Будущие специалисты должны получить такой комплекс знаний по химии, который составит базу для успешного освоения последующих дисциплин и правильного использования материалов, применяемых в технике.

Теоретические разделы химии, такие как строение электронных оболочек атомов, основные виды химических связей, химическая кинетика и равновесие, окислительно-восстановительные потенциалы, водородный показатель, произведение растворимости, свойства комплексных соединений, позволяет правильно ориентироваться в вопросах, связанных непосредственно со свойствами и превращениями минералов и горных пород.

Горные породы и руды состоят из минералов. К минералам относят природные химические соединения. Неорганические минералы подразделяются на минеральные типы, названия которым присваиваются согласно классификации неорганических веществ и их номенклатуре. По химическому составу минералы подразделяют на:

а) простые вещества (металлы, неметаллы),

б) карбиды, нитриды, фосфиды, сульфиды, арсениды, селениды, оксиды, гидроксиды, галогениды и др.,

в) соли кислородержащих кислот (силикаты, фосфаты, арсенаты, ванадаты, бораты, карбонаты, сульфаты, нитраты, вольфраматы, молибдаты, хроматы, иодаты и др.).

Основа химической н о м е н к л а т у р ы - русские названия химических элементов, приведенные в периодической системе Д.И. Менделеева, которые не всегда совпадают с латинскими названиями, например, гидрогениум - водород, оксигениум - кислород.

К неметаллам относят:

He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, F, Cl, Br, J, At, O, S, Se, Te, N, P, As, C, Si, B, H, остальные элементы - металлы.

Названия простых веществ состоят их одного слова - наименования химического элемента с числовой приставкой, например: O_3 - трикислород, P_4 - тетрафосфор, S_8 - октасера.

Используют также числовые приставки:

1 - моно	7 - гепта
2 - ди	8 - окта
3 - три	9 - нона
4 - тетра	10 - дека
5 - пента	11 - ундека
6 - гекса	12 - додека

В химических формулах сложных вещество на первом месте (слева) всегда записывают формульные обозначения электроположительных составляющих, а за ними указывают формульные обозначения электроотрицательных составляющих. Например, PCl_3.

Названия сложных веществ составляются по их химических формулам справа налево. Они складываются из двух слов - названий электроотрицательных составляющих (условных или реальных катионов) в именительном падеже и электроположительных составляющих (условных или реальных катионов) в родительном падеже, например: PCl_3 - трихлорид фосфора, CO - монооксид углерода.

Названия одноэлементных анионов оканчивается на -ид, а названия многоэлементных анионов - на -ат.

Для построения названий сложных веществ используются корни (иногда усеченные) русских названий элементов, например, бериллий - бериллат, молибден - молибдат, фосфор - фосфид и фосфат. Традиционно применяются корни латинских названий для элементов: серебро, мышьяк, золото, углерод, медь, железо, ртуть, марганец, азот, никель, свинец, сера, сурьма, кремний, олово:

Ag - аргентат	N - нитрид, нитрат
As - арседид, арсенат	Ni - николат
Au – аурат	Pb - плюмбат
C - карбид, карбонат	S - сульфид, сульфат
Cu - купрат	Sb - стибид (антимонид), стибат
Fe - феррат	Si - силицид, силикат
Hg – меркурат	Sn - станнат
Mn - манганат	

В названиях сложных веществ употребляются как числовые приставки, так и степени окисления катиона (обычно металлического) при точно известном заряде аниона, например, P_4O_{10} - декаоксид тетрафосфора, V_2O_5 - оксид ванадия (V), $Bi(OH)_3$ - гидроксид висмута (III).

Названия кислот и кислотных остатков приводятся в учебном пособии [1]. Названия кислотных остатков используют построении названий солей. Соли - продукты реакций нейтрализации. Соли, содержащие кислотные остатки с незамещенными атомами водорода, - к и с л ы е соли. Соли, содержащие гидроксид-ионы, называют о с н о в н ы м и солями.

$Ca(H_2PO_4)_2$ - дигидрофосфат кальция

$KHSO_4$ - гидросульфат калия

$FeOH(NO_3)_2$ - гидроксонитрат железа (III)

$(CaOH)_2SO_4$ - гидроксосульфат кобальта (II)

$Cu_2CO_3(OH)_2$ - дигидроксид-карбонат димеди

Если соли содержат два разных катиона, то их называют д в о й н ы м и.

$KAl(SO_4)_2$ - сульфат алюминия-калия

$CaMg(CO_3)_2$ - карбонат магния-кальция

ОБЩИЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Прежде чем приступить к работе по данной теме, следует изучить ее по описанию, уяснить цель задания и план его выполнения.

Не загромождайте рабочее место портфелями, свертками, сумками, перчатками и т.п. Для них отведены специальные этажерки. На рабочем столе должны находиться только необходимые приборы и лабораторный журнал.

Работайте тщательно, аккуратно, без лишней торопливости, соблюдайте в лаборатории тишину.

Внимательно наблюдайте за ходом опыта, отмечая и записывая каждую его особенность.

Категорически запрещается в лаборатории принимать пищу, пробовать химические вещества на вкус.

Без указания преподавателя не проводите никаких дополнительных опытов.

После окончания работы вымойте использованную посуду, выключите воду, электрические приборы и приведите в порядок рабочее место.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ХИМИЧЕСКИМИ РЕАКТИВАМИ

Для выполнения работ в лаборатории имеется определенный набор химических реактивов, часть которых размещается на лабораторных столах (водные растворы солей), а остальные - концентрированные и разбавленные кислоты и щелочи, сухие соли, дурно пахнущие вещества - в вытяжных шкафах.

При использовании реактивов следует соблюдать следующие правила:

1. Не разрешается уносить реактивы из вытяжного шкафа на рабочее

место.

2. Сухие реактивы набирают чистым шпателем или ложечкой.

3. Для проведения опыта в пробирке брать сухое вещество в количестве, закрывающем дно пробирки, а раствора - не более 1/6 ее объема.

4. Избыток реактива нельзя высыпать (выливать) обратно в те склянки, из которых они были взяты.

5. Не следует путать пробирки от разных склянок. Крышки и пробки кладут на стол поверхностью, не соприкасающейся с реактивом.

6. При нагревании растворов в пробирке держать ее таким образом, чтобы отверстие пробирки было направлено в сторону от работающего и его соседей по рабочему месту.

7. При разбавлении концентрированных кислот вливать кислоту в воду, а не наоборот.

8. Остатки растворов, содержащих кусочки металлов, собирают в специальные склянки, находящиеся в вытяжных шкафах.

ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

При порезах стеклом удаляют осколки из раны, смазывают края раны раствором йода и перевязывают бинтом.

При ожоге горячей жидкостью или горячим предметом обожженное место обрабатывают раствором перманганата калия, накладывают мазь от ожога.

При ожогах кислотами сразу промывают обожженное место большим количеством воды, а затем 3%-ным раствором гидрокарбоната натрия.

При ожогах едкими щелочами хорошо и обильно промыть обожженное место проточной водой, затем разбавленным раствором уксусной кислоты и опять водой.

При попадании кислоты или щелочи в глаза немедленно промыть глаза в течение трех минут большим количеством воды, а затем раствором гидрокарбоната натрия или борной кислоты.

ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЖУРНАЛА

Каждый студент должен иметь лабораторный журнал - отдельную тетрадь для записей.

В лабораторном журнале студент выполняет отчеты по лаборатор-

ным работам, домашние задания, решает задачи, отвечает на контрольные вопросы.

Все наблюдения и выводы по экспериментальной работе студент заносит в лабораторный журнал непосредственно после выполнения опыта.

Отчеты по выполненным лабораторным работам должны содержать:

1) название лабораторной работы,
2) названия всех проделанных опытов,
3) после названия опыта записывается уравнение проделанной реакции, в котором указываются осадки (↓) и их окраска, газы (↑), изменения окраски растворов,
4) задания, указанные в методическом руководстве,
5) выводы по каждому опыту и общий вывод по работе.

1. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ОКСИДОВ И ГИДРОКСИДОВ

Цель работы - изучение изменения кислотно-основных свойств гидроксидов в периодах и группах периодической системы Д.И. Менделеева.

Периодическая система Д.И. Менделеева - естественная система химических элементов, созданная на основе периодического закона.

Положение элемента в периодической системе определяет физико-химические свойства соответствующих им простых веществ и химических соединений.

Периодичность свойств химических соединений удобно проследить на примере оксидов и гидроксидов. Оксиды и гидроксиды относятся к основным породообразующим минералам, они широко распространены и составляют 17% от массы земной коры.

В табл.1.1. приведены наиболее часто встречающиеся реакции взаимодействия оксидов и гидроксидов с водой.

Кислотно-основные свойства соединений можно объяснить на основе электростатических представлений. Ослабление основных и усиление кислотных свойств гидроксидов связано с изменением поляризующего действия элемента, образующего гидроксид, на группу OH^-. Поляризующее действие катиона сильно зависит от его строения и может быть охарактеризовано следующими закономерностями:

1) Поляризующее действие иона очень быстро возрастает с увеличением его заряда;

Таблица 1.1

Кислотно-основные реакции оксидов и гидроксидов

Тип оксида (гидроксида)	Типичная реакция
Сильно - кислый	$SO_{3(г)} + H_2O = SO_4^{2-}(р) + 2H^+(р)$
Слабо - кислый	$CO_2 + H_2O \Leftrightarrow HCO_3^-(р) + H^+(р)$
Амфотерный	$Zn(OH)_{2(к)} \Rightarrow \left\vert \begin{array}{l} \xrightarrow{H^+(р)} \quad Zn^{2+}(р) + H_2O \\ \xrightarrow{OH^-(р)} \quad [Zn(OH)_4]^{2-}(р) \end{array} \right.$
Слабо - основной	$Fe(OH)_{2(к)} \Leftrightarrow FeOH^+(р) + OH^-(р)$
Сильно - основной	$Li_2O_3 + H_2O = 2Li^+(р) + 2OH^-(р)$

2) большое значение имеет строение внешней электронной оболочки, по этому признаку катионы разделяются на ионы с незаконченным внешним слоем, переходным от 8-электронного и 18-электронному (Mg^{2+}, Fe^{2+}, Fe^{3+}) и ионы с 18-электронным внешним слоем (Zn^{2+}, Ag^+);

3) при сходном строении внешней электронной оболочки и равном заряде поляризующее действие иона возрастает по мере уменьшения его радиуса.

Итак, ослабление основных и усиление кислотных свойств гидрооки-сей связано с увеличением поляризующего действия катиона, т.е. с убыванием его радиуса и возрастанием положительной степени окисления, а также с увеличением числа внешних электронов. Например, если катион имеет малый заряд сравнительно большой радиус, его электростатическое притяжение к группе OH^- невелико и OH^- выступает в гидроксиде как единое целое. Поэтому типичными основаниями являются гидроксиды элементов, находящихся в главных подгруппах I и II групп периодической системы (KOH, NaOH), а также NH_4OH.

По мере увеличения поляризующего действия катиона возрастает ковалентность связей элемент-кислород и усиливается ионный характер связей O ─ H. Основные свойства гидроксидов ослабляются и появляются кислотные свойства. Из элементов II группы бериллий и цинк дают амфо-

дают атмосферные гидроксиды, в (III) группе амфотерны гидроксиды алюминия, галлия, индия. Амфотерность характерна для большинства элементов четвертой группы периодической системы.

Когда катион имеет большой положительный заряд и малый радиус (что типично для неметаллов), усиление его поляризующего действия приводит к тому, что водород становится подвижным и преобладает диссоциация по кислотному типу. Среди элементов третьей группы гидроксид бора - типичная кислота. В четвертой группе кислотами являются гидроксиды углерода и кремния, однако, эти кислоты еще очень слабые. Гидроксиды многих элементов с максимальной степенью окисления пятой, шестой, седьмой групп - сильные кислоты.

Способность веществ к взаимодействию определяется изменением изобарно-изотермического потенциала (ΔG) химической реакции. Чем меньше алгебраическая величина энергии Гиббса химического процесса, тем больше вероятность ее протекания в данном направлении.

$2Al(OH)_{3(к)} + Na_2O_{(к)} = 2NaAlO_{2(к)} + 3H_2O$; ΔG^0_{298} = - 153 кДж/моль

$2H_3BO_{3(к)} + Na_2O_{(к)} = 2NaBO_{2(к)} + 3H_2O$; ΔG^0_{298} = - 277 кДж/моль

Увеличение отрицательного значения ΔG^0_{298} свидетельствует об усилении кислотных свойств гидроксида бора H_3BO_3.

1.1. Экспериментальная часть

ОПЫТ 1. Гидроксиды магния и кальция

Поместите в пробирку небольшое количество оксида магния или кальция и прибавьте 5 мл воды. Взболтайте содержимое пробирки и испытайте реакцию среды 1-2 каплями фенолфталеина. Составьте уравнение реакции взаимодействия оксида с водой. Сделайте вывод о характере гидроксида.

ОПЫТ 2. Получение и свойства гидроксида алюминия

В пробирку налейте 2 мл раствора соли алюминия и прибавьте примерно такой же объем раствора гидроксида аммония. Содержимое пробирки распределите в две пробирки. В одну из пробирок при взбалтывании прилейте по каплям разбавленный раствор серной кислоты до полного рас-

творения осадка. Во вторую пробирку прилейте разбавленный раствор гидроксида натрия также до полного растворения осадка. Составить уравнение реакций. Сделайте вывод о характере гидроксида алюминия.

ОПЫТ 3. Двуокись углерода

Налейте в пробирку несколько мл воды и прибавьте 1-2 капли индикатора. Пропустите из аппарата Киппа в воду двуокись углерода до изменения окраски индикатора. Составьте уравнение реакции. Сделайте вывод о характере гидроксида.

ОПЫТ 4. Гидроксид кремния

В пробирку поместите раствор силиката натрия и пропустите через него углекислый газ из аппарата Киппа, при этом наблюдайте образование осадка гидроксида кремния. Напишите уравнение реакции. Сделайте вывод о кислотно-основном характере гидроксида кремния.

ОПЫТ 5. Оксид фосфора (V)

В пробирку поместите немного фосфорного ангидрида и добавьте несколько мл воды. Наблюдайте растворение, встряхивая пробирку. Испытайте реакцию среды индикаторами. Составьте уравнение реакции. Сделайте вывод о характере гидроксида.

ОПЫТ 6. Гидроксиды олова (II) и свинца (II)

а) Налейте в пробирку 2 мл раствора хлорида олова. Добавьте по каплям разбавленный раствор щелочи до образования осадка. Содержимое пробирки разделите на две части. Подействовать на одну концентрированным раствором щелочи, а на другую - соляной кислотой. Составьте уравнения реакций. Сделайте вывод о характере гидроксида олова.

б) Такой же опыт проделать с раствором соли азотнокислого свинца. На полученный гидроксид свинца подействовать азотной кислотой и щелочью. Почему для растворения гидроокиси свинца нельзя воспользоваться соляной или серной кислотами? Составьте уравнения реакций. Сделайте вывод о характере гидроксида свинца.

1.2. Контрольные вопросы и задания

1. Сравнив результаты опытов, сделайте вывод, как изменяется характер гидроксидов элементов: Mg, Al, Si, P в третьем периоде слева

направо. Чем объясняется это изменение характера гидроксидов? Как оно связано с изменением металлических свойств элементов?

2. По результатам опытов сделайте вывод об изменении кислотно-основных свойств гидроксидов элементов: C, Si, Sn, Pb в главных подгруппах сверху вниз. Как увязать такое изменение характера гидроксидов с возрастанием порядкового номера элемента и изменением металлических свойств элементов?

3. Запишите кислородные соединения марганца со степенями окисления II, IV, VI, VII и покажите, как с увеличением степени окисления изменяется характер оксидов и соответствующих им гидроксидов.

4. Укажите, какая из сравниваемых двух кислот H_2SO_3 или H_2SO_4 является более сильной и как объяснить такое явление.

5. Какой из галогенов имеет наибольшее сродство к натрию, если энергия Гиббса для галогенидов натрия имеет следующую величину (кДж/моль): ΔG^0_{298} NaJ = - 237.2,

ΔG^0_{298} NaBr = -347.7,

ΔG^0_{298} NaCl = -384.0,

ΔG^0_{298} NaF = -541.0.

6. $MgO_{(к)} + CO_{2(г)} = MgCO_{3(к)}$; ΔG^0_{298} = -65.1 кДж/моль

$BaO_{(к)} + CO_{2(г)} = BaCO_{3(к)}$; ΔG^0_{298} = -217.4 кДж/моль

$CaO_{(к)} + CO_{2(г)} = CaCO_{3(к)}$; ΔG^0_{298} = -131.9 кДж/моль

$SrO_{(к)} + CO_{2(г)} = SrCO_{3(к)}$; ΔG^0_{298} = -183.6 кДж/моль.

Как изменяются кислотно-основные свойства оксидов (расположите их в ряд) и как это согласуется со значением ΔG^0_{298} образования рассматриваемых карбонатов из оксидов?

7. Как изменяется сила кислот в ряду H_2SO_4 - H_2SeO_4 - H_2TeO_4 ?

8. $6Na_2O(к) + P_4O_{10}(к) = 4Na_3PO_4(к)$ ΔG^0_{298} = - 378 кДж/моль

$Na_2O(к) + Al_2O_3(к) = 2NaAlO_2(к)$ ΔG^0_{298} = - 173.2 кДж/моль

$Na_2O(к) + SO_3(г) = Na_2SO_4(к)$ ΔG^0_{298} = - 522.1 кДж/моль

$Na_2O(к) + SiO_2(к) = Na_2SiO_3(к)$ ΔG^0_{298} = - 194.5 кДж/моль

$Na_2O(к) + Cl_2I_7(г) = 2NaClO_4(к)$ ΔG^0_{298} = -587.0 кДж/моль

Как изменяются кислотно-основные свойства оксидов (расположите их в ряд) и как это согласуется со значениями ΔG^0_{298} образования рассматриваемых солей из оксидов?

9. Укажите, какое из рассматриваемых двух соединений является более сильным основанием: а) гидроксид натрия или гидроксид цезия; б) гидроксид бария или гидроксид кальция? Объясните это изменение характера гидроксидов, исходя из расположения элементов в таблице Д.И. Менделеева.

2. ХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА

Ц е л ь р а б о т ы - изучение скорости химической реакции и ее зависимости от концентрации и температуры.

Раздел химии, изучающей скорость химических реакций, называется химической кинетикой.

Скорость химической реакции - это изменение концентрации реагирующих веществ в единицу времени. Зависимость скорости химической реакции выражается законом действующих масс: при постоянной температуре скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, взятых в степенях, равных стехиометрическим коэффициентам в уравнении реакции.

Для реакции aА + bВ = cС + dД скорость выразится уравнением:

$$v = k\cdot[\text{A}]^a \cdot [\text{B}]^b \qquad \text{(для гомогенной системы)},$$

где v - скорость реакции;

[А], [В] - молярные концентрации реагирующих веществ;

k - константа скорости реакции

(при [А] = [В] = 1 моль/л, k численно равна v).

Для реакции $2NO_{(г)} + O_{2(г)} = 2NO_{2(г)}$ выражение скорости имеет следующий вид:

$$v = k\cdot[\text{NO}]^2\cdot[\text{O}_2].$$

Гомогенная система состоит из одной фазы - между реагентами нет поверхности раздела. Гетерогенная система состоит из двух и более фаз. Реакция в гетерогенной системе осуществляется на поверхности раздела фаз. Скорость гетерогенной реакции не зависит от площади поверхности раздела фаз, так же как скорость гомогенной реакции не зависит от объема системы.

Концентрация твердого вещества принимается за единицу.

Зависимость скорости химической реакции от температуры описывается экспериментально найденным уравнением Вант-Гоффа:

$$v_{t_2} = v_{t_1} \cdot \gamma^{\frac{t_2 - t_1}{10}},$$

где v_{t_1}, v_{t_2} - скорость реакции при температурах соответственно t_1 и t_2;

γ - температурный коэффициент скорости реакции,
равный обычно 2-4.

Эта зависимость может быть выражена в виде следующего правила: при увеличении температуры на каждые 10° скорость химической реакции увеличивается в 2-4 раза.

Зависимость скорости реакции от температуры более точно может быть выражена уравнением Аррениуса:

$$k = c \cdot e^{-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}},$$

где k - константа скорости реакции;

c - постоянная;

$E_{\text{акт}}$ - энергия активации;

R - универсальная газовая постоянная (8.31 Дж/моль ·К);

T - абсолютная температура.

Из уравнения Аррениуса следует, что скорость реакции с повышением температуры увеличивается по закону экспоненты, однако интенсивность теплоотвода в конкретных условиях реакции может возрастать только линейно. В этом случае возможен скачкообразный переход от стационарного режима к нестационарному, быстрое ускорение - самовоспламенение, или цепной взрыв. По такому механизму происходят взрывы метана и угольной пыли в шахтах. Например, при повышении концентрации метана на несколько процентов достигается нижний предел взрываемости метана в воздухе, в тысячи раз ускоряется реакция окисления метана кислородом воздуха $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O + Q$. Концентрационные пределы взрываемости метана в воздухе от 5 до 15% по объему.

Одним из направлений в решении проблемы предупреждения взры-

вов метана и угольной пыли в шахтах, опасных по газу и пыли, является применение способов взрывозащиты, основанных на использовании распыленной воды или специальных химических соединений, которые играют роль отрицательных катализаторов (ингибиторов), теплопоглотителей в реакциях окисления углеводородов. Такие вещества носят общее название флегматизаторов горения. Этим свойством обладают гидрокарбонаты натрия и калия, гидрофосфаты аммония, бура и др.

2.1. Экспериментальная часть.

ОПЫТ 1. Зависимость скорости химической реакции от концентрации реагирующих веществ.

Соли тиосерной кислоты устойчивы в твердом состоянии и в растворе. Тиосерная кислота неустойчива и при получении распадается самопроизвольно по реакции

$$Na_2S_2O_3 + H_2SO_4 = H_2SO_3 + S + Na_2SO_4$$

с образованием сернистой кислоты и свободной серы.

Постановка опыта основывается на следующем: в результате реакции между серной кислотой и тиосульфатом натрия образуется сера, выделяющаяся в виде белой мути. Время от начала реакции до момента появления мути зависит от скорости этой реакции.

В три пробирки налить по 6 мл раствора серной кислоты.

В первую пробирку влить 6 мл раствора $Na_2S_2O_3$, быстро перемешать ее содержимое и одновременно включить секундомер. Отсчитать время (τ) до начала появления белой мути - коллоидной серы.

Во вторую пробирку влить смесь 4 мл раствора тиосульфата натрия и 2 мл воды. Наблюдать, через сколько секунд растворы сделаются мутными.

Результаты наблюдений записать по следующей форме, выразив значения скоростей реакций в условных единицах (десятичных дробях!) в виде $v = 1/\tau$, где τ - время в секундах.

Относительная концентрация раствора тиосульфата натрия записана в условных единицах $C_{Na_2S_2O_3} = v_{Na_2S_2O_3} / V_{\text{раствора}}$, где $V_{\text{раствора}}$ - общий объем раствора 12 мл. Тогда для первого случая $C_{Na_2S_2O_3}$ 50%, для второго - 33% и третьего - 17%, что соответствует значениям 3а, 2в, а.

№ опыта	Объем в мл			Относит. концентр. $C_{Na_2S_2O_3}$	Время до появления мути, τ	$v = \frac{1}{\tau}$
	раствора H_2SO_4	раствора $Na_2S_2O_3$	H_2O			
1	6	6	0	3а		
2	6	4	2	2а		
3	6	2	4	а		

Результаты измерений необходимо представить в виде графика. На ось абсцисс наносят значения относительных концентраций в виде трех точек, отстоящих от начала координат на а, 2а, 3а, где а - произвольно выбранный отрезок. Из каждой точки восстанавливается перпендикуляр, длина которого соответствует значениям скоростей реакции в условных единицах. Далее следует обдумать, каким образом, пользуясь верхними концами этих перпендикуляров, провести линию, характеризующую зависимость скорости реакции от концентрации. Подсказкой будет служить математическое выражение для скорости изучаемой реакции, которое нужно записать согласно закону действия масс.

Сделать вывод о зависимости скорости реакции от концентрации реагирующих веществ.

ОПЫТ 2. Зависимость скорости реакции от температуры опыта

Налить в одну пробирку 5 мл раствора $Na_2S_2O_3$, а другую - 5 мл раствора H_2SO_4. Обе пробирки поместить в стакан с водопроводной водой. Спустя 5-7 минут измерить температуру воды и слить вместе содержимое обеих пробирок. Измерить время появится помутнение.

В две другие пробирки налить по 5 мл тех же растворов. Поместить пробирки в стакан с водой, нагретой на 10° выше, чем в предыдущем опыте. Через 5-7 минут слить содержимое пробирок. Измерить время до появления мути.

Повторить опыт, повысив температуру еще на 10°.

Результаты наблюдений выразить в виде графика, откладывая по оси абсцисс температуру опыта, по оси ординат - относительную скорость реакции.

Сделать вывод о зависимости скорости реакции от температуры.

2.2. Контрольные вопросы и задания.

1. Реакция в водном растворе выражается уравнением:

$$2KI + K_2S_2O_8 = 2K_2SO_4 + I_2.$$

Как изменится скорость этой реакции при разбавлении реагирующей смеси в 2 раза?

2. Записать математические выражения для скорости следующих газовых реакций

а) $CH_3CHO = CH_4 + CO$, в) $H_2 + Cl_2 = 2HCl$,
б) $2N_2O = 2N_2 + O_2$, г) $SO_2 + 2H_2 = S + 2H_2O$.

Предсказать изменение скорости этих реакций при увеличении концентрации каждого из реагирующих веществ в 2 раза.

3. Записать выражения для скорости реакций

а) $MgCO_3 = MgO + CO_2$, в) $CaCO_3 + 2HCl = CaCl_2 + H_2CO_3$,
б) $2N_2O = 2N_2 + O_2$, г) $2Zn + O_2 = 2ZnO$.

Как изменится скорость вышеуказанных реакций, если:
а) увеличить концентрацию исходных веществ в 2 раза;
б) увеличить давление в 2 раза.

4. Срок хранения флотационного реагента, поступившего на обогатительную фабрику, согласно техническим условиям составляет при температуре 20°С 2 месяца. Воспользовавшись правилом Вант-Гоффа, рассчитать срок годности этого флотореагента, если на складе фабрики поддерживается 0°С, а температурный коэффициент скорости разложения равен 2.

5. Во сколько раз изменится скорость реакции

$$2NO + O_2 = 2NO_2,$$

если концентрация оксида азота уменьшится в 2 раза, а концентрация кислорода увеличивается в 2 раза?

6. Реакция протекает по уравнению

$$CH_3COOH + C_2H_5OH = CH_3COOC_2H_5 + H_2O,$$

концентрацию CH_3COOH увеличили от 0.3 до 0.45 моль/л, а концентрацию C_2H_5OH увеличили от 0.4 до 0.8 моль/л. Во сколько раз возросла скорость прямой реакции?

7. Кальцинированная сода (безводная Na_2CO_3) используется в виде раствора в качестве регулятора щелочности флотационного процесса. При температуре 55°С сода растворяется в 6 раз быстрее, чем при 15°. Рассчитать температурный коэффициент скорости растворения соды.

8. Для приготовления раствора силиката натрия требуемой плотности, использующегося в качестве подавителя пустой породы, твердые прозрачные куски силикат-глыбы Na_2SiO_3 загружают в воду: нагревают до 95° и ведут перемешивание в течение четырех часов. Какой срок потребуется для получения раствора необходимой концентрации, если поддерживать температуру 90° ($\gamma = 2$)?

3. ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

Ц е л ь р а б о т ы - Изучение влияния концентрации на сдвиг химического равновесия.

Многие реакции идут не до исчезновения исходных веществ, а до состояния, не изменяющегося во временя, когда в реакционной смеси можно обнаружить как исходные вещества, так и продукты реакции. Такое состояние системы называется химическим равновесием.

С термодинамической точки зрения состояние равновесия характеризуются тем, что система достигает минимального значения энергии Гиббса (при заданных температуре, давлении и общем составе).

С кинетической точки зрения при равновесии скорости процессов образования продуктов реакции из исходных веществ и исходных веществ из продуктов выравниваются. Скорость достижения равновесия в зависимости от природы процесса, условий, а также наличия подходящих катализаторов может варьировать от малых долей секунды до веков и тысячелетий.

Если равновесие достигнуто, то для реакции

$$aA + bB \Leftrightarrow cC + dД \qquad \text{величина} \quad K_p = \frac{[C]^c \cdot [Д]^d}{[A]^a \cdot [B]^b},$$

называемая константой равновесия, принимает определенное значение. Константа равновесия зависит от температуры, но не зависит от конкретных количеств реагентов и порядка их взаимодействия.

Изменение равновесных концентраций при внешнем воздействии называется с м е щ е н и е м х и м и ч е с к о г о р а в н о в е с и я .

Основным законом, управляющим смещением равновесия, служит принцип Ле-Шателье: «Если на систему, находящуюся в равновесии, оказывается внешнее воздействие, то равновесие смещается в сторону, указываемую воздействием, до тех пор, пока нарастающее в системе противодействие не станет равно оказанному воздействию».

Внешним воздействием, смещающим равновесие, может быть изменение температуры, давления, концентрации одного или нескольких веществ, участвующих в реакции. «Смещение равновесия в сторону, указанную воздействием» означает, что при повышении давления преимущество получает процесс, ведущий к уменьшению объема, т.е. к тому же результату, что и само воздействие. Нагревание ведет к увеличению роли эндотермического прочеса, т.е. процесса, увеличивающего запас энергии в системе (эндотермические реакции идут с поглощением тепла, а экзотермические - с его выделением).

Увеличение концентрации одного из веществ приводит к смещению равновесия в сторону расходования этого вещества.

3.1. Экспериментальная часть

ОПЫТ 1. Влияние концентрации веществ на смещение химического равновесия.

Реакция между хлоридом железа и тиоцианатом аммония протекает по уравнению:

$$FeCl_3 + 3NH_4NCS \leftrightarrow Fe(NCS)_3 + 3NH_4Cl$$

Красная окраска образовавшегося раствора обусловлена содержанием в нем тиоционата (роданида) железа. По изменению интенсивности этой окраски можно судить о направлении смещения равновесия при изменении концентрации какого-либо реагирующего вещества.

В одной пробирке приготовить смесь (по 4 мл) разбавленных растворов $FeCl_3$ и NH_4NCS . Полученный окрашенный раствор разлить поровну в 4 пробирки.

В первую пробирку добавить 2 капли насыщенного раствора $FeCl_3$. Во вторую пробирку добавить несколько кристалликов NH_4NCS (или KNCS). В третью пробирку всыпать немного твердой соли NH_4Cl (или KCl). Четвертую пробирку оставить для сравнения.

Записать уравнение химической реакции и выражение для константы

равновесия. Сделать выводы о влиянии концентрации веществ на смещение химического равновесия с использованием принципа Ле-Шателье.

Форма записи

Что добавлено	Изменение интенсивности окраски	Смещение равновесия
1. $FeCl_3$ 2. NH_4NCS 3. NH_4Cl	более интенсивная ……... ……	вправо …… …….

3.2. Контрольные вопросы и задания

1. К гомогенных химических системах при постоянных давлении и температуре установилось состояние равновесия:

$2H_2S + 3O_2 \leftrightarrow 2SO_2 + 2H_2O$, $K = 3 \cdot 10^5$;

$2CH_4 + 3O_2 + 2NH_3 \leftrightarrow 2HCN + 6H_2O$, $K = 1$;

$4NH_3 + 5O_2 \leftrightarrow 4NO + 6H_2O$, $K = 0.008$;

$H_2 + Cl_2 \leftrightarrow 2HCl$, $K = 24.3$.

По данным значениям констант равновесия укажите, реагенты или продукты будут преобладать в равновесной смеси веществ. На основании закона действующих масс составьте выражения для констант равновесия.

2. В гетерогенных химических системах установилось состояние равновесия:

$Si_{(к)} + 2H2O_{(г)} \leftrightarrow SiO_{2(к)} + 2H_{2(г)}$;

$Mg_3N_{2(к)} + 6H_2O_{(г)} \leftrightarrow 3Mg(OH)_{2(к)} + 2NH_{3(г)}$;

$CS_{2(г)} + 2Cl_{2(г)} \leftrightarrow CCl_{4(г)} + 2S_{(к)}$;

$2NO_{2(г)} + 2S_{(к)} \leftrightarrow N_{2(г)} + 2SO_{2(г)}$;

$10NO_{(г)} + P_{4(г)} \leftrightarrow 5N_{2(г)} + P_4O_{10(к)}$;

$TiO_{2(к)} + 2C_{(к)} + 2Cl_{2(г)} \leftrightarrow TiCl_{4(г)} + 2CO_{(г)}$.

На основании закона действующих масс составьте выражения для

констант равновесия.

3. За последние 100 лет количество углекислого газа, поступающее за счет сжигания ископаемого топлива, возросло в 50 раз, а парциальное давление CO_2 в атмосфере за это же время увеличилось в 1.2 раза. Объясните это соотношение, допустив, что CO_2 поглощается океаном:
$CO_{2(г)} + H_2O_{(ж)} \leftrightarrow H_2CO_{3(р)}$.

4. Рассчитать равновесный выход диоксида серы в реакциях окислительного обжига сульфидных минералов - пирита, молебденита, пирротина, если в состоянии равновесия количество SO_2 равно 0.4 моль, а начальный объем O_2 составлял 33.6 л (н.у.):

$4FeS_{2(к)} + 11O_{2(г)} \leftrightarrow 2Fe_2O_{3(к)} + 8SO_{2(г)}$;
пирит

$2MoS_{2(к)} + 7O_{2(г)} \leftrightarrow 2MoO_{3(к)} + 4SO_{2(г)}$;
молибденит

$4FeS_{(к)} + 7O_{2(г)} \leftrightarrow 2Fe_2O_{3(к)} + 4SO_{2(г)}$.
пирротин

5. Равновесный процесс, протекающий в подземных пещерах при образовании сталактитов и сталагмитов, можно описать уравнением

$$Ca^{2+}_{(р)} + 2\,HCO_3^-{}_{(р)} \leftrightarrow CaCO_{3(к)} + H_2O_{(ж)} + CO_{2(г)}.$$

Напишите выражение для константы равновесия этого процесса. Укажите, в какую сторону сдвигается равновесие а) при улетучивании CO_2, б) испарении воды, в) увлажнении атмосферы в пещерах.

6. Состояние равновесия реакции окисления сфалерита

$$2ZnS_{(к)} + 3O_{2(г)} \leftrightarrow 2ZnO_{(к)} + 2SO_{2(г)}$$

установилось при равновесной концентрации диоксида серы, равной 0.25 моль/л. Рассчитать исходную концентрацию кислорода.

7. В герметически закрытом сосуде объемом 0.25 л проводят реакцию восстановления антимонита

$$Sb_2S_{3(к)} + 3CO_{(г)} \leftrightarrow 2Sb_{(к)} + 3COS_{(г)}.$$

Равновесная концентрация каждого газообразного вещества равна 0.3 моль/л. Для смещения равновесия добавляют 0.1 моль CO. Определить новые равновесные концентрации CO и COS.

8. Определить, влево или вправо сместится положение равновесия

реакций

$Fe_2O_3(к) + 3CO(г) \leftrightarrow 2Fe(к) + 3CO_2(г)$, $\Delta H° > 0$;
гематит

$3CaCO_3(к) + 3SiO_2(к) \leftrightarrow 3CO_2(г) + Ca_3Si_3O_9(к)$, $\Delta H° < 0$,
волластонит

$Cu_2CO_3(OH)_2(к) \leftrightarrow 2CuO(к) + CO_2(г) = H_2O(г)$, $\Delta H° > 0$;
малахит

$2Mg_2SiO_4(к) + 2H_2O(ж) + CO_2(г) \leftrightarrow Mg_3(OH)_4Si_2O_5(к) + MgCO_3(к)$, $\Delta H° < 0$
форстерит серпентин магнезит

при следующих воздействиях: а) введение избытка диоксида углерода, б) нагревание, в) увеличение давления.

9. На некоторых предприятиях систематически из труб в атмосферу выбрасываются оксиды азота, что можно наблюдать как газ красно-желтого цвета (лисий хвост). Объяснить причину различной интенсивности окраски этого газа в зависимости от времени года (лето, зима), если известно, что NO_2 - бурый газ при -11°С превращается в димер N_2O_4 - бесцветные кристаллы, а при обычных условиях существует смесь NO_2 и N_2O_4

$$2\ NO_2 \leftrightarrow N_2O_4.$$

Укажите знак при ΔH в этом уравнении.

4. ИОННЫЕ РАВНОВЕСИЯ В РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Ц е л ь р а б о т ы - Изучение смещения ионного равновесия в водных растворах.

Э л е к т р о л и т а м и называют вещества, диссоциирующие в растворах (или расплавах) на и о н ы и способные проводить электрический ток. Распад вещества на ионы называется электролитической диссоциацией. Перенос тока в растворах (и расплавах) электролитов осуществляется положительными и отрицательными ионами, которые называются катионами и анионами. К электролитам относятся соли, кислоты и основания.

Для количественной характеристики электролитической диссоциации используется степень диссоциации α - доля моля электролита, существующая в растворе в виде ионов:

$$\alpha = C/C_0,$$

где C - концентрация молекул, распавшихся на ионы, моль/л;

C_0 - исходная концентрация раствора, моль/л.

По величине степени диссоциации все электролиты делятся на сильные и слабые. К сильным относятся те электролиты, α - степень диссоциации которых равна единица, т.е. $C = C_0$. Распад на ионы сильных электролитов протекает необратимо. В растворе сильного электролита не может быть недиссоциированных молекул.

$$HNO_3 = H^+ + NO_3^-; \quad NaCl = Na^+ + Cl^-.$$

К сильным электролитам относятся практически все соли, гидроксиды щелочных и щелочно-земельных металлов и некоторые кислоты (например, HCl, HNO_3, H_2SO_4, HBr, HI, $HClO_4$)

Степень диссоциации слабых электролитов меньше единицы ($C < C_0$). Их ионизация протекает обратимо:

$$CH_3COOH \Leftrightarrow CH_3COO^- + H^+; \qquad H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-.$$

Константу равновесия электролитической диссоциации слабого электролита называют константой диссоциации. Например, при 298 К

$$K_{CH_3COOH} = \frac{C_{CH_3COO^-} \cdot C_{H^+}}{C_{CH_3COOH}} = 1.8 \cdot 10^{-5}.$$

$$K_{H_2CO_3} = \frac{C_{H^+} \cdot C_{HCO_3^-}}{C_{H_2CO_3}} = 4.4 \cdot 10^{-7}.$$

Из величин констант видно, что угольная кислота по первой ступени электролит более слабый, чем уксусная кислота.

Степень и константа ионизации слабого электролита связаны зависимостью (закон Оствальда):

$$K = \frac{\alpha^2 \cdot C_0}{1 - \alpha}.$$

Если степень ионизации электролита значительно меньше единицы, то уравнение можно записать $K = \alpha^2 \cdot C_0$, откуда следует, что α возрастает с разведением раствора.

В чистой воде кроме молекул H_2O содержатся протоны и гидроксид-ионы, при этом

$$[H^+] = [OH^-] = 1 \cdot 10^{-7} \text{ моль/л } (25^\circ \text{ C}).$$

Содержание протонов и гидрокид-ионов выражают также через водород-

ный показатель pH = 1g [H^+]. При pH = 7 среду водного раствора называют нейтральной, при pH < 7 - кислотной и при pH > 7 - щелочной.

Каковы пределы значений pH в природе? Рудничные воды выветривающихся колчеданных месторождений, содержащие свободную серную кислоту, имеют pH около 2, а воды окисляющихся месторождений самородной серы в песчаниках - еще ниже. Воды кратерных озер имеют pH 1-3, торфяных болот около 4, буроугольных месторождений около 5, pH дождевой воды примерно 5.5. Обычные грунтовые воды имеют pH 6.5 - 8.5, морская вода (в зависимости от времени года, ее температуры, количества растворенной в ней углекислоты, органических кислот, привнесенных реками) колеблется от 8.2 до 8.5. В содовых озерах pH достигает 9-10.

4.1. Экспериментальная часть

ОПЫТ 1. Сравнение относительной силы кислот

В одну пробирку наливают 1-2 мл 2М раствора уксусной кислоты, в другую - столько же раствора соляной кислоты той же концентрации. В обе пробирки добавляют небольшое количество мелко измельченного известняка. Взбалтывая пробирки с содержимым, наблюдать, одинаково ли быстро растворяется $CaCO_3$ во взятых кислотах.

$$CaCO_3\downarrow + 2H^+ = Ca^{2+} + H_2O + CO_2\uparrow.$$

Интенсивность выделения CO_2 при этой реакции служит относительным индикатором концентрации водородных ионов. Рассчитайте, во сколько раз концентрация протонов в растворе HCl больше, чем в растворе CH_3COOH, если $K_{CH_3COOH} = 1.8 \cdot 10^{-5}$.

Напишите уравнения диссоциации обеих кислот.

ОПЫТ 2. Влияние концентрации одноименных ионов на ионизацию слабой кислоты.

К 1-2 мл 2М раствора уксусной кислоты в двух пробирках прибавьте 2 капли метилоранжа. Отметьте окраску индикатора. Добавьте при перемешивании в одну пробирку несколько кристалликов ацетата аммония до изменения цвета раствора. Как изменился pH раствора? Объясните изменение pH, применяя правило Ле Шателье и используя выражение константы диссоциации CH_3COOH

ОПЫТ 3. Влияние концентрации одноименных ионов на ионизацию слабого основания.

В две пробирки наливают по 1-2 мл 2М раствора гидроксида аммония и по 2 капли фенолфталеина. В одну из пробирок добавляют при перемешивании несколько кристалликов ацетата аммония до изменения цвета раствора. Объясните причину наблюдаемого изменения окраски на основании уравнения диссоциации NH_4OH, принципа Ле Шателье и константы диссоциации NH_4OH.

ОПЫТ 4. Определение характера диссоциации гидроксидов

В три пробирки наливают по 2-3 мл растворов: в 1-ю - силиката натрия, во 2-ю - сульфата никеля, в 3-ю - сульфата цинка. До начала выпадения осадков гидроксидов добавляют по каплям в 1-ю - раствор серной кислоты, а во 2-ю - раствор гидроксида натрия.

Содержимое каждой пробирки взбалтывают и разливают каждый осадок гидроксидов на две пробирки. В одну пробирку добавляют разбавленной кислоты, а в другую концентрированной щелочи. На основании наблюдений за растворением осадков кремниевой кислоты, гидроксида никеля и гидроксида цинка в кислоте и щелочи сделайте вывод о кислотно-основном характере электролитической диссоциации этих гидроксидов.

Напишите уравнения диссоциации гидроксидов.

4.2. Контрольные вопросы и задания

1. Присутствие каких ионов можно ожидать в водном растворе сернистой кислоты H_2SO_3? Запишите выражения для констант диссоциаций этой кислоты.
2. Почему константа электролитической диссоциации служит более удобной характеристикой, чем степень диссоциации?
3. Объясните, почему соли являются сильными электролитами. На примере $NaHCO_3$ укажите характер химических связей, по которым электролитическая диссоциация протекает в водном растворе: а) практически полностью; б) частично; в) отсутствует.
4. Укажите, корректно ли сопоставлять такие свойства, как растворимость вещества и способность его к электролитической диссоциации.
5. В практике флотации используются процессы с низкими и высо-

кими значениями pH флотационной пульпы. Можно ли приготовить растворы с pH 0, -1, -2, 14, 15, 16?

6. Вычислите концентрацию ионов водорода в 1М (9.45 %-ном) растворе серной кислоты, pH которого - 0.005. Объясните полученный результат.

7. В Первоуральске выпал кислотный дождь, водородный показатель которого равен 2.5. Во сколько раз превышена концентрация иона водорода, если обычная дождевая вода имеет pH = 5.5?

8. Шахтные воды Кизеловского бассейна содержат 0.01 г/л ионов водорода. Рассчитайте водородный показатель этих вод, концентрацию OH^- ионов. Укажите, кислотный или щелочной характер имеют эти воды.

9. Во сколько раз уменьшится концентрация ионов водорода, если к 1 литру раствора уксусной кислоты с концентрацией 0.005 моль/л прибавить 0.05 моль ацетата натрия, считая, что концентрация недиссоциированных молекул уксусной кислоты, как и объем раствора остаются практически постоянными? K_{CH_3COOH} $1.8 \cdot 10^{-5}$.

10. Для оценки pH раствора сероводорода студент записал следующие уравнения:

$$H_2S = 2H^+ + S^{2-}; \quad S^{2-} + H_2O \leftrightarrow HS^- + OH^-.$$

Таким образом, студент сделал вывод, что среда щелочная. Найдите ошибки в его рассуждениях.

5. РЕАКЦИИ ИОННОГО ОБМЕНА

Ц е л ь р а б о т ы - выявление закономерностей протекания реакций ионного обмена в растворах электролитов.

Минералы и горные породы в условиях земной поверхности стремятся перейти в более устойчивые соединения. Известняки медленно растворяются в водах, содержащих углекислоту, образую гидрокарбонат кальция. Грунтовые воды, содержащие $Ca(HCO_3)_2$, реагируют с сульфатно-хлоридно-магниевыми (морскими) водами. При этом осаждаются гипс и доломит:

$$2Ca(HCO_3)_2 + MgCl_2 + Na_2SO_4 = \underset{\text{гипс}}{CaSO_4} + \underset{\text{доломит}}{CaMg(CO_3)_2} + 2NaCl + 2H_2CO_3.$$

Так озера морского типа превращаются в озера континентального типа. Сульфатно-натриевые воды - результат выщелачивания горных по-

род, могут образовывать содовые озера.

$$Ca(HCO_3)_2 + NaSO_4 = CaSO_4\downarrow + NaHCO_3.$$

Изверженные горные породы выветриваются, в полевых шпатах содержание алюминия увеличивается от ранних пород к поздним. При этом из них выносятся катионы щелочноземельных металлов. Например, из анорита образуется каолинит

$$CaO\cdot Al_2O_3\cdot 2SiO_2 + 2H_2O + CO_2 = Al_2O_3\cdot 2SiO_2\cdot 2H_2O + CaCO_3.$$

В результате воздействия растворов, содержащих в повышенных концентрациях ионы Mg^{2+} и SO_4^{2-}, происходит доломитизация известняков

$$2CaCO_3 + MgSO_4 = CaMg(CO_3)_2 + CaSO_4.$$

Если химическая реакция протекает, то она отличается следующими признаками:

происходит образование осадка, или растворение осадка, или изменяется цвет осадка или раствора, или появляются пузырьки газа.

Сущность ионных реакций обмена сводится к соединению ионов в молекулы новых веществ. Равновесия ионных реакций в растворах смещаются в сторону образования слабых электролитов (слабых кислот, слабых оснований, воды) и сильных электролитов (осадков, летучих веществ).

Все кислые соли в воде растворяются, основные соли, как правило, нерастворимы.

В ионных уравнениях сильные, хорошо растворимые электролиты записываются в форме ионов, а слабые электролиты, газы и осадки - в виде молекул.

Рассмотрим следующие примеры реакций. Запишем их сначала в молекулярной форме, а затем в виде кратких ионных уравнений.

$$Fe(HCO_3)_2 + 2NaOH = FeCO_3\downarrow + Na_2CO_3 + 2H_2O;$$

$$Fe^{2+} + 2\,HCO_3^- + 2OH^- = FeCO_3\downarrow + CO_3^{2-} + 2H_2O;$$

$$ZnSO_4 + 4NaOH = Na_2ZnO_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O;$$

$$Zn^{2+} + 4OH^- = ZnO_2^{2-} + 2H_2O;$$

$$NaSiO_3 + 2CO_2 + 2H_2O = H_2SiO_3\downarrow + 2\,NaHCO_3;$$

$$SiO_2^{2-} + 2CO_2 + 2H_2O = H_2SiO_3\downarrow + 2\,HCO_3^-;$$

$$NH_4OH + HCl = NH_4Cl + H_2O;$$

$$NH_4OH + H^+ = NH_4Cl + H_2O.$$

5.1. Экспериментальная часть

ОПЫТ 1. Образование осадков

а) В две пробирки наливают по 2 мл раствора хлорида бария и добавляют в одну пробирку сульфата натрия, а в другую - нитрата калия. Написать молекулярное и ионное уравнения и сделать вывод, в каком случае соль реагирует с другой солью;

б) В две пробирки наливают по 2 мл раствора сульфата меди. В одну пробирку добавляют 1 мл очень разбавленный (1%-ный) раствор гидроксида натрия, а в другую - столько же разбавленного раствора той же щелочи. Написать молекулярные и ионные уравнения, указав окраску образующихся осадков и учитывая, что в первом случае образуется основной сульфат меди $(CuOH)_2SO_4$. Сделайте вывод об условиях образования основной соли и гидроксида. Осадки сохранить для выполнения опыта 2б;

в) В две пробирки наливают по 2 мл раствора хлорида кобальта. В одну пробирку добавляют разбавленного раствора щелочи до образования синего осадка основной соли. Во вторую пробирку приливают еще столько же щелочи и нагревают с целью получения гидроксида кобальта розового цвета. Содержимое пробирок оставляют для проведения опыта 2в. Написать молекулярное и ионные уравнения, указав цвет осадков.

ОПЫТ 2. Растворение осадков.

а) Наливают в пробирку известковую воду $Ca(OH)_2$, через этот раствор пропускают углекислый газ из аппарата Киппа. Наблюдают образование белого осадка средней соли, продолжают пропускать пузырьки CO_2 до растворения белого осадка и получения бесцветного прозрачного раствора кислой соли $Ca(HCO_3)_2$. Написать молекулярные и ионные уравнения образования карбоната кальция и растворения его. Сделать вывод об условии получения кислой соли.

б) В обе пробирки опыта 1б добавляют серной кислоты до растворения осадков. Написать молекулярные и ионные уравнения реакции растворения. Объяснить причину сдвига ионного равновесия;

в) Берут пробирки с осадками опыта 1в. В пробирку с синим осадком добавляют хлороводородной кислоты, в пробирку с розовым осадком - разбавленной щелочи. Напишите молекулярные и ионные уравнения. Наблюдать растворение одного из осадков. Дать объяснения наблюдениям.

О П Ы Т 3. Образование газообразного вещества

Все сульфиты, растворимые и нерастворимые в воде, разлагаются минеральными кислотами с выделением диоксида серы, который определяют как запах горящей серы.

К раствору сульфита натрия приливают разбавленной серной кислоты. Обнаруживают запах SO_2 , стараясь запомнить его. Это позволит впредь распознавать диоксид серы органолептически.

Написать молекулярное и ионное уравнение реакции.

О П Ы Т 4. Образование слабых электролитов

а) Наливают в пробирку 1-2 мл раствора ацетата натрия и добавляют разбавленной серной кислоты. Определяют по запаху образующуюся уксусную кислоту;

б) Наливают в пробирку 1-2 мл раствора хлорида аммония и добавляют разбавленной щелочи. Определяют по запаху выделяющийся аммиак;

в) Наливают в пробирку 3 мл раствора сульфата хрома (III) и приливают к нему по каплям раствор разбавленной щелочи до появления серо-зеленого осадка гидроксида хрома.

Содержимое пробирки разделяют на две части. К одной части приливают раствор серной кислоты, к другой - раствор щелочи. Сравнить цвет полученных растворов. Сделать вывод о характере гидроксида хрома.

Для опытов а), б), в) написать молекулярные и ионные уравнения реакций, объяснить причины сдвига ионных равновесий.

Сделать вывод, в каком направлении протекают реакции ионного обмена в растворах электролитов.

5.2. Контрольные вопросы и задания

1. Составить в молекулярном виде уравнения реакций растворения следующих малорастворимых минералов:

а) стронцианит $SrCO_3$ переводят в водный раствор насыщением CO_2 суспензии минерала в воде;

б) сассолин $B(OH)_3$ обрабатывают избытком раствора едкого натра;

в) гиббсит $Al(OH)_3$ хорошо растворяется известковом молоке;

г) азурит $Cu(OH)_2 \cdot 2CuCO_3$ обрабатывают хлороводородной кислотой;

д) гетит Fe_2O_3 хорошо растворяется в серной кислоте;

е) гемиморфит $Zn(OH)_2 \cdot Zn_3Si_2O_7$ нагревают в растворе гидроксида натрия;

ж) брусит $Mg(OH)_2$ разлагается раствором серной кислоты;

з) борнит $FeS \cdot CuS \cdot 2Cu_2S$ обрабатывают соляной кислотой.

2. При смещении водных растворов одного из следующих веществ: NaOH, KOH, CsOH концентрацией 1 моль/л с одинаковыми объемами 1М раствором HCl, HBr, HNO_3, $HClO_4$ выделяется примерно одно и то же количество теплоты, составляющее 55-59 кДж/моль. О чем это свидетельствует? Напишите уравнения реакции в ионном виде.

3. При смешении 1М водных растворов одной из следующих кислот: азотной, уксусной, бензойной с одинаковыми объема 1М растворов КОН обнаруживаются различные тепловые эффекты. Объясните, приведя уравнения реакций в молекулярно-ионном виде.

4. Укажите причины, по которым реакция

$$Na_2CO_{3(р)} + Ca(OH)_{2(к)} \leftrightarrow CaCO_{3(к)} + 2NaOH_{(р)}$$

обратима, составьте выражение для константы равновесия. Почему в этом процессе образуется только разбавленный раствор гидроксида натрия, а получение концентрированного раствора невозможно?

5. Для переработки карбонатных марганцевых руд предложен способ, основанный на выщелачивании их раствором хлорида кальция:

$$MnCO_{3(к)} + CaCl_{2(р)} \leftrightarrow CaCO_{3(к)} + MnCl_{2(р)}.$$

Можно ли регенерировать раствор хлорида кальция и вывести одновременно марганец в осадок добавлением к продуктам выщелачивания суспензии $Ca(OH)_2$? Напишите уравнение реакции.

6. Растворение соли слабой кислоты в растворах кислот должно проходить тем быстрее, чем больше концентрация ионов водорода. Однако кальцит $CaCO_3$ растворяется в растворе уксусной кислоты быстрее, чем в растворе серной. Почему?

7. В 250 мл раствора содержится 1 г NaOH. Вычислите молярную концентрацию и pH этого раствора.

8. Кислые растворы имеют кислый вкус, щелочные - вкус мыла. Сливаются равные объемы растворов хлороводородной кислоты и гидроксида натрия одинаковой концентрации. Какой вкус полученного раствора?

9. Гашеную известь $Ca(OH)_2$ используют при флотации для создания щелочной среды (pH 12 и более), отделения пирита от сфалерита и сульфидов меди. Как изменяется pH растворов извести при хранении их в открытых емкостях? Напишите уравнение реакции.

6. ГИДРОЛИЗ СОЛЕЙ

Ц е л ь р а б о т ы - Изучение свойств водных растворов, связанных с реакцией гидролиза солей.

Природные воды часто не бывают нейтральными, а имеют либо кислую, либо щелочную среду вследствие гидролиза. При химическом выветривании известняков образуются щелочные растворы, а пиритсодержащих - кислые. Изменение нейтральной реакции среды водного раствора - признак гидролиза соли, обменной химической реакции, протекающей с участием воды .Однако не все соли вступают в реакцию гидролиза. Если растворить в воде хлорид калия KCl, нейтральная реакция среды (pH = 7), характерная для чистой воды, не изменится. Соли, образованные сильным основанием и сильной кислотой (NaCl, $LiNO_3$, CsBr и т.п.), в реакцию гидролиза не вступают.

С водой взаимодействуют: 1) соли, образованные слабыми основаниями и сильными кислотами (NH_4Cl, $CuSO_4$, $Zn(NO_3)_2$ и т.п.); 2) соли, образованные слабыми кислотами и сильными основаниями (Na_2S, KCN, $BaCO_3$ и т.п.); 3) соли, образованные слабыми основаниями и слабыми

кислотами (NH_4CH_3COO и т.п.).

Из рассмотренных примеров следует, что в реакцию с водой вступают катионы слабых оснований и анионы слабых кислот. Если эти ионы многозарядны (Fe^{3+}, Cu^{2+}, CO_3^{2-}, SiO_3^{2-} и т.п.), их взаимодействие с водой обычно идет до образования основного или кислого иона (первая ступень гидролиза). Например, соль $FeCl_3$, образованная слабым основанием с сильной кислотой, подвергается гидролизу по катиону:

$$Fe^{3+} + HOH \leftrightarrow FeOH^{2+} + H^+$$

Или в молекулярной форме:

$$FeCl_3 + HOH \leftrightarrow FeOHCl_2 + HCl.$$

В результате гидролиза соли $FeCl_3$ появляется избыток катионов H^+ и раствор приобретает кислую реакцию, pH < 7.

Гидролизу по аниону подвергаются соли, образованные сильным основанием и слабой кислотой. В качестве примера запишем уравнение гидролиза соли Na_2CO_3 в ионном виде:

$$CO_3^{2-} + HOH \leftrightarrow HCO_3^- + OH^-$$

И в молекулярной форме:

$$Na_2CO_3 + HOH \leftrightarrow NaHCO_3 + NaOH.\uparrow$$

Избыток анионов OH^- придает раствору щелочную реакцию, pH > 7.

Если же соль образована слабым малорастворимым основанием и слабой летучей кислотой, то происходит полный необратимый гидролиз. В таблице растворимости такие соли обозначены прочерком, означающим, что эти соли в водных растворах не существуют. Например, гидролиз карбоната железа (III):

$$Fe_2(CO_3)_3 + 6H_2O = 2Fe(OH)_3\downarrow + 3H_2CO_3;$$

$$2Fe^{3+} + 3\,CO_3^{2-} + 6H_2O = 2Fe(OH)_3\downarrow + 3H_2CO_3 \begin{array}{l} \nearrow 3CO_2\uparrow \\ \searrow 3H_2O \end{array}$$

т.е. карбонат железа (III) может существовать только в виде сухой соли, а в растворе он подвергается полному гидролизу, образуя труднорастворимый гидроксид железа (III) и слабую летучую угольную кислоту. В подобных случаях в осадок выпадает наименее растворимый из возможных продуктов гидролиза. Так, растворимость $(CuOH)_2CO_3$ меньше, чем $Cu(OH)_2$,

поэтому в зоне окисления минералов меди в известняках встречается малахит

$$2CuSO_4 + 2CaCO_3 + H_2O \leftrightarrow (CuOH)_2CO_3 + CaSO_4 + CO_2,$$

В водном растворе положительные ионы металлов гидратированы. Многие из них связывают воду так прочно, что их можно рассматривать как комплексные ионы. Гидролиз солей, образованных слабыми основаниями и сильными кислотами, происходит за счет молекул воды, входящих в комплексный ион. При этом катион металла выталкивает за пределы внутренней сферы одноименно заряженный ион водорода из молекулы воды, среда становится кислой. Например, при гидролизе хлорида магния координационное число Mg^{2+} равно шести

$$Mg^{2+} + 6H_2O = [Mg(H_2O)_6]^{2+} \Leftrightarrow [Mg(H_2O)_5OH]^+ + H^+;$$

$$MgCl_2 + 6H_2O \Leftrightarrow [Mg(H_2O)_5OH]Cl + HCl\ .$$

Ионы Bi^{3+}, Sb^{3+}, Ti^{4+}, V^{4+} обладают настолько сильным поляризующим действием, что выталкивает из молекулы воды оба иона водорода, вследствие чего образуются ионы BiO^+ висмутил, SbO^+ антимонид, TiO^{2+} титанил, VO^{2+} ванадил.

$$SbCl_3 + HOH \Leftrightarrow SbOCl + 2HCl.$$

6.1. Экспериментальная часть

О П Ы Т 1. Образование основной соли при гидролизе

В три пробирки наливают по 3-4 капли нейтрального раствора лакмуса и добавляют по 2 мл растворов: в одну пробирку - дистиллированной воды, в другую - сульфата натрия, в третью - сульфата алюминия. Сравнивают окраску индикатора в воде и растворах солей. Сделать вывод о возможности гидролиза.

Написать молекулярное и ионное уравнение реакции гидролиза: отразить отсутствие гидролиза в пробирке с раствором Na_2SO_4.

О П Ы Т 2. Образование кислой соли при гидролизе

В две пробирки наливают по 3-4 капли нейтрального раствора фенолфталеина и добавляют по 2 мл растворов: хлорида натрия и карбоната натрия. Сравнивают окраску индикатора в воде и растворах солей.

Сделать вывод о возможности гидролиза.

Написать молекулярное и ионное уравнение реакции гидролиза: отразить отсутствие гидролиза а пробирке с раствором NaCl.

О П Ы Т 3. Смещение равновесия гидролиза

Налить в пробирку 1-2 мл раствора нитрата висмута $Bi(NO_3)_3$ и разбавить его водой в 3-5 раз. Наблюдать образование осадка, т.е. помутнение раствора. Составить молекулярное и ионное уравнение реакции гидролиза, зная, что труднорастворимым продуктом является соль $BiONO_3$.

В пробирку с осадком $BiONO_3$ прибавить несколько капель концентрированной азотной кислоты. Наблюдать растворение осадка. Объяснить наблюдаемое, исходя из уравнения гидролиза.

О П Ы Т 4. Влияние нагревания на гидролиз ацетата натрия

К 3-4 мл раствора уксуснокислого натрия CH_3COONa прибавить 1-2 капли фенолфталеина и нагреть до кипения. Обратить внимание на появление розовой окраски, исчезающей при охлаждении раствора.

Написать ионное и молекулярное уравнение реакции гидролиза уксуснокислого натрия. Объясните различие окраски при нагревании и охлаждении раствора.

О П Ы Т 5. Полный гидролиз (совместный гидролиз)

К 1-2 мл раствора сернокислого алюминия $Al_2(SO_4)_3$ прилить такой же объем раствора карбоната натрия Na_2CO_3. Наблюдать выделение углекислого газа и образование осадка гидроксида алюминия. Написать молекулярное и ионное уравнение совместного гидролиза взятых солей.

6.2. Контрольные вопросы и задания

1. На некоторых обогатительных фабриках иногда барабаны (емкости) из-под цианида натрия обезвреживают 10%-ным раствором железного купороса $FeSO_4$. Напишите уравнения реакции, ведущих к образованию в этих условиях циановодородной кислоты, и покажите тем самым, что такой способ растворения цианидов абсолютно недопустим. При подкислении до $pH \leq 9$ работать с растворами цианида натрия опасно; безопасно при $pH > 10$.

2. Раствор основания и раствор кислоты смешивают в эквивалент-

ных соотношениях. Для каких из перечисленных пар раствор будет иметь нейтральную реакцию:

а) $NH_4OH + HCl$, б) $NH_4OH + CH_3COOH$, в) $NaOH + HCl$,

г) $NaOH + CH_3COOH$?

3. Сточные воды обогатительных фабрик, содержащие гидрокарбонат кальция, очищают от коллоидных примесей (удалить которые отстаиванием и фильтрованием невозможно) добавлением к ним сульфата алюминия. Образующийся хлопьевидный $Al(OH)_3$ обволакивает коллоидные частицы примесей и вызывает их осаждение. Объясните образование $Al(OH)_3$ и напишите уравнение реакции.

4. Определить, возможна ли реакция окисления сфалерита кислородом воздуха в стандартных условиях, если

$$ZnS_{(к)} + 2O_{2(г)} + 7H_2O_{(ж)} = ZnSO_4 \cdot 7H_2O_{(р)}.$$

ΔG^0_{298}, кДж/моль	-201	-237	-2564

Сделайте вывод о кислотности рудничных вод, содержащих в качестве продукта выветривания сульфат цинка, записав уравнение реакции гидролиза в молекулярном и ионном виде.

5. При окислении пирита, преобладающего в колчеданных рудах, кислородом, растворенным в воде, выделяется сульфат железа (III). Поступая с нисходящим током растворов в нижние горизонты, он реагирует с породой. Сделайте вывод о составе породы, если наблюдается совместное образование гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ и лимонита $Fe(OH)_3$. Напишите уравнение реакции взаимодействия сульфата железа (III) и породы.

6. Объясните, приведя молекулярно-ионное уравнение, почему при нагревании раствора $NaHCO_3$ реакция среды из слабощелочной переходит в сильнощелочную.

7. В водном растворе хлорида цинка при нагревании происходит растворение кусочка металлического цинка. Напишите уравнения реакции, объясняя причину выделения водорода.

8. В жесткой воде ионы железа обычно присутствуют в виде гидрокарбоната железа (II). При хранении такой воды в открытых сосудах, железо окисляется кислородом воздуха, вода мутнеет из-за выпадения в осадок $Fe(OH)_3$. Напишите уравнение реакции, в результате которой образуется гидроксид железа (III).

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

И. А. Низова, Н. А. Зайцева

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ХИМИЯ»

ЧАСТЬ II

Окислительно-восстановительные реакции

Учебное пособие для студентов о факультета Геологии и геофизики

Екатеринбург

2020

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

И. А. Низова, Н. А. Зайцева

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ХИМИЯ»

ЧАСТЬ II

Окислительно-восстановительные реакции

Учебное пособие для студентов

ФАКУЛЬТЕТА ФГИГ

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

Рецензент: Г. Л. Левит, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института органического синтеза УрО РАН

Низова И.А., Зайцева Н.А.

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ХИМИЯ», часть II. Окислительно-восстановительные процессы: учебное пособие / И.А. Низова, Н.А. Зайцева – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 30 с.

В учебном пособии изложены краткие сведения об окислительно восстановительных процессах и основных приемах составления уравнений окислительно-восстановительных реакций. Пособие содержит 20 вариантов заданий для внеаудиторной самостоятельной работы по каждой теме.

Для студентов горно-технологического факультета.

© Низова И.А., Зайцева Н.А. ©
Уральский государственный
горный университет

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Степени окисления элементов. Окислители и восстановители……6

2. Классификация окислительно-восстановительных реакций…….8

3. Составление уравнений окислительно-восстановительных реакций. Метод электронного баланса……..10

4. Составление уравнений окислительно-восстановительных реакций. Метод электронно - ионного баланса (метод полуреакций)…….13

5. Направление протекания окислительно-восстановительных реакций……22

Список литературы……..20

Окислительно-восстановительными реакциями (ОВР) называют реакции, протекающие с изменением степени окисления элементов.

1. Степени окисления элементов. Окислители и восстановители.

Степень окисления – условный заряд атома, рассчитанный из предположения, что все связи в соединении ионные.

Правила вычисления степени окисления:

1. Сумма степеней окисления всех атомов, входящих в молекулу равно нулю, а всех атомов, составляющих сложный ион – заряду иона.

2. Степень окисления атома в простом веществе равна нулю.

3. Некоторые элементы имеют в соединениях постоянную степень окисления:

Фтор – только –1

Щелочные металлы (Na, K, Li, Rb, Cs) – только +1

Щелочноземельные металлы (Ca, Sr, Ba), Zn, Mg, Be - только +2

Алюминий – только +3.

4. Водород почти во всех соединениях имеет степень окисления +1. Исключение составляют гидриды металлов (NaH, CaH_2 и др.), где степень окисления водорода отрицательна (–1). Кислород почти во всех соединениях имеет степень окисления –2. Исключение составляют фторид кислорода OF_2, (степень окисления кислорода +1) и пероксиды H_2O_2, Na_2O_2 и т.д. (степень окисления кислорода –1).

5. Максимальная положительная степень окисления элемента обычно совпадает с номером его группы в периодической системе. Максимальная отрицательная степень окисления элемента равна максимальной положительной степени окисления минус восемь. Исключение составляют фтор, кислород, железо: их высшая степень окисления выражается числом, значение которого ниже, чем номер группы, к которой они относятся. У элементов подгруппы меди, наоборот, высшая степень окисления больше единицы, хотя они и относятся к I группе.

Во время ОВР происходит обмен электронами: окислитель присоединяет электроны (сам при этом восстанавливается), восстановитель отдает электроны

(сам при этом окисляется). Окисление всегда сопровождается восстановлением и наоборот. Число электронов, отдаваемых восстановителем, всегда равно числу электронов, принимаемых окислителем.

Важнейшими окислителями и восстановителями могут быть как простые, так и сложные вещества. Так как окислитель содержит в своем составе элемент, понижающий степень окисления, а восстановитель содержит элемент, степень окисления которого повышается в ходе реакции, окислителями могут быть прежде всего соединения высших ступеней окисления, а восстановителями - низших степеней окисления, присущих данному элементу.

Из простых веществ сильными окислителями являются неметаллы верхней части VI и VII групп периодической системы, за счёт высокой электроотрицательности их атомов. Сильнее всего окислительные свойства выражены у фтора F_2, но в практике чаще пользуются в качестве окислителей кислородом O_2, озоном O_3, хлором Cl_2 и бромом Br_2. К простым веществам – восстановителям относятся водород H_2, углерод C и металлы, из которых на практике чаще применяют алюминий, магний, натрий и цинк.

Из сложных веществ в лабораторной практике наиболее часто используются следующие окислители: перманганат калия $KMnO_4$; дихромат калия $K_2Cr_2O_7$; растворы азотной кислоты HNO_3 различных концентраций; концентрированная серная кислота H_2SO_4; пероксид (перекись) водорода; оксиды марганца (IV) MnO_2, и свинца (IV) PbO_2; смесь концентрированных азотной и соляной кислот (1:3, «царская водка), хлорная кислота $HClO_4$.

Из сложных веществ в лабораторной практике наиболее часто используются следующие восстановители: иодид калия KI; сульфит натрия Na_2SO_3; сульфид натрия Na_2S и сероводород H_2S; хлорид олова $SnCl_2$, монооксид углерода (угарный газ) аммиак NH_3.

Некоторые из этих веществ проявляют как окислительные, так и восстановительные свойства в зависимости от ОВР: CO, H_2O_2, MnO_2, так как содержат элемент в промежуточной степени окисления.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Определите степени окисления всех элементов, входящих в состав следующих веществ:

Номер варианта	Вещества	Номер варианта	Вещества
1	MnO_2, CH_4, Cl_2, $KMnO_4$	11	HF, Zn, H_3PO_4, NH_4Cl
2	H_2O_2, H_2SO_4, I_2, $K_2Cr_2O_7$	12	H_2SO_3, NaH_2SbO_3, Au, $ZnCl_2$
3	NaH, F_2, K_2HPO_4, N_2H_4	13	NH_4HS, P, C_6H_6, $Ba(ClO_4)_2$
4	OF_2, C_2H_6, O_2, K_2MnO_4	14	$NaNO_2$, $Ca(HS)_2$, Ag, PH_3
5	CaH_2, C_2H_4, Br_2, $Fe_2(SO_4)_3$	15	$BaCO_3$, AsH_3, Ca, Na_3SbO_4
6	PbO_2, C_2H_2, O_3, $MnOHNO_3$	16	HNO_3, Xe, $KClO_4$, NH_4OH
7	Na_2O_2, N_2, H_2O, K_2SiO_3	17	$Sn(OH)_2$, $CuCl_2$, K_2S, Mn
8	H_2S, Mg, Na_3SbO_3, $Cr(OH)_3$	18	Al_2S_3, Na_2SO_3, $NaClO$, Se
9	Na_2S, NH_3, H_2, $KHCO_3$	19	$NaClO_2$, Al_4C_3, He, $Bi(NO_3)_3$,
10	AlP, CO, HCl, NH_4NO_3	20	$NaHSO_3$, Si, Na_3AsO_3, $Cr(OH)_3$

2. В каких из перечисленных соединений хлор может проявлять только окислительные свойства: $NaCl$, $NaClO$, HCl, $KClO_3$, $NaClO_4$, Cl_2O_7, $HClO_2$?

3. В каких из перечисленных соединений азот может проявлять только восстановительные свойства: $NaNO_2$, NO, N_2O_3, N_2H_4, N_2O, HNO_3, N_2O_5, NH_4NO_3, NH_3, NH_4Cl?

4. В каких из перечисленных соединений сера может быть как окислителем, так и восстановителем: H_2SO_4, $Ca(HS)_2$, H_2S, Na_2SO_3, Na_2S, SO_2, $Na_2S_2O_3$, SO_3, SO?

2. Классификация окислительно–восстановительных реакций

Окислительно-восстановительные реакции обычно разделяют на три типа: межмолекулярные, внутримолекулярные и реакции диспропорционирования (самоокисления-самовосстановления). Иногда в эту классификацию добавляют четрветрый тип – реакции конпропорционирования.

1) Межмолекулярные реакции протекают с изменением степени окисления атомов, которые находятся в различных молекулах. Например:

$$2\ Al + Fe_2O_3 \xrightarrow{t^o} Al_2O_3 + 2\ Fe,$$

$$C + 4\ HNO_{3(конц)} = CO_2 \uparrow + 4\ NO_2 \uparrow + 2\ H_2O.$$

2) К внутримолекулярным реакциям относятся такие реакции, в которых окислитель и восстановитель входят в состав одной и той же молекулы, например:

$$2Cu(NO_3)_2 \xrightarrow{t^o} 2CuO + 4NO_2 + O_2 \uparrow$$

$$2\ KNO_3 \xrightarrow{t^o} 2\ KNO_2 + O_2 \uparrow.$$

3) В реакциях диспропорционирования (самоокисления-самовосстановления) один и тот же элемент является и окислителем, и восстановителем:

$$Cl_2 + 2\ KOH \xrightarrow{\text{на холоду}} KCl + KClO + H_2O,$$

$$2\ NO_2 + 2\ NaOH \rightarrow NaNO_2 + NaNO_3 + H_2O.$$

4) В реакциях конпропорционирования один и тот же химический элемент, имеющий разные степени окисления, в результате приводится к единой степени окисления:

$$NH_4NO_3 \rightarrow N_2O + 2H_2O$$

$$NH_4NO_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$$

Вопросы для самостоятельной работы

1. Какие из перечисленных веществ могут вступать в реакции диспропорционирования: HNO_3, HNO_2, H_2SO_4, NH_4NO_3, Br_2, H_2O_2, CaH_2?

2. Приведите пример реакции межмолекулярного конпропорционирования.

3. Является ли реакция разложения перманганата калия реакцией диспропорционирования? Реакцией конпропорционирования?

$$2\ KMnO_4 \xrightarrow{t^o} K_2MnO_4 + MnO_2 + 2O_2 \uparrow$$

3. Составление уравнений окислительно-восстановительных реакций. Метод электронного баланса

Для составления уравнений ОВР используются два метода: метод электронного баланса и метод полуреакций (электронно-ионного баланса). При использовании любого из этих методов прежде всего необходимо определить окислитель и восстановитель, рассчитав степени окисления всех элементов в левой и правой частях уравнения. Затем записать отдельно процесс окисления и процесс восстановления, соблюдая принцип электронного баланса: число электронов, отданных восстановителем, должно быть равно числу электронов, принятых окислителем.

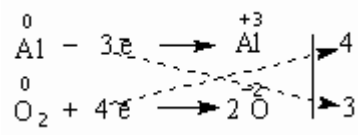
Метод электронного баланса универсален, он позволяет определить коэффициенты реакциях, протекающих как в растворах, так и без растворителя, в веществах в любых агрегатных состояниях. Он удобен для написания реакций термического разложения, взаимодействия двух простых веществ

Пример 1. $Al + O_2 \rightarrow Al_2O_3$

Определим степени окисления:

$$\overset{0}{Al} + \overset{0}{O_2} = \overset{+3\ -2}{Al_2O_3}$$

Алюминий отдает электроны (приобретает положительную степень окисления), а кислород – принимает электроны (приобретает отрицательную степень окисления). Чтобы получить степень окисления +3, атом алюминия должен отдать 3 электрона. Молекула кислорода, чтобы превратиться в кислородные атомы со степенью окисления –2, должна принять 4 электрона:



Чтобы количество отданных и принятых электронов выровнялось, первое уравнение надо умножить на 4, а второе – на 3. Для этого достаточно переместить числа отданных и принятых электронов против верхней и нижней строчки так, как показано на схеме вверху.

Если теперь в уравнении перед восстановителем (Al) мы поставим найденный нами коэффициент 4, а перед окислителем (O_2) – найденный нами коэффициент 3, то количество отданных и принятых электронов выравнивается и становится равным 12. Электронный баланс достигнут. Видно, что перед продуктом реакции Al_2O_3 необходим коэффициент 2. Теперь уравнение окислительно-восстановительной реакции уравнено:

$$4Al + 3O_2 = 2Al_2O_3$$

Пример 2. $(NH_4)_2Cr_2O_7 \xrightarrow{t^o} N_2 + Cr_2O_3 + H_2O$

Определим степени окисления:

$$\overset{-3+1}{(NH_4)_2}\ \overset{+6}{Cr_2}\ \overset{-2}{O_7} = \overset{0}{N_2} + \overset{+3}{Cr_2}\overset{-2}{O_3} + \overset{+1}{H_2}\overset{-2}{O}$$

Азот отдаёт электроны, хром получает.

$$2N^{-3} - 6\bar{e} = N_2^0$$
$$2Cr^{+6} + 6\bar{e} = 2\ Cr^{+3}$$

Число электронов отданных и принятых одинаково, электронный баланс достигнут. Видно, что перед продуктом реакции H_2O необходим коэффициент 4. Теперь уравнение окислительно-восстановительной реакции уравнено:

$$(NH_4)_2Cr_2O_7 \xrightarrow{t^o} N_2\uparrow + Cr_2O_3 + 4\ H_2O$$

Пример 3. $Hg(NO_3)_2 \rightarrow Hg + NO_2 + O_2$

Определим степени окисления:

$$\overset{0}{Hg}\quad \overset{+2}{(}\overset{+5}{N}\ \overset{-2}{O_3})_2 = \overset{0}{Hg} + \overset{+4}{N}\overset{-2}{O_2} + \overset{0}{O_2}$$

Кислород отдаёт электроны, ртуть и азот получают, здесь вместо привычных двух участников обмена электронами их сразу три:

$$2O^{-2} - 4\bar{e} = O_2^0$$
$$2N^{+5} + 1\ \bar{e} = 2\ N^{+4}$$
$$Hg^{+2} + 2\ \bar{e} = Hg^0$$

Число электронов отданных и принятых одинаково, электронный баланс достигнут. Видно, что перед продуктом реакции NO_2 необходим коэффициент 2. Теперь уравнение окислительно-восстановительной реакции уравнено:

$$Hg(NO_3)_2 \rightarrow Hg + 2NO_2 + O_2$$

Задания для самостоятельной работы

1. Расставьте коэффициенты уравнениях реакций разложения методом электронного баланса (по вариантам). Укажите окислитель и восстановитель:

Номер варианта	Схема реакции	Номер варианта	Схема реакции
1	$Mn(NO_3)_2 \rightarrow MnO_2 + NO_2$	11	$BaO_2 \rightarrow BaO + O_2$
2	$K_2MnO_4 \rightarrow K_3MnO_4\ MnO_2 + O_2$	12	$AgNO_3 \rightarrow Ag + NO_2 + O_2$
3	$Zn(NO_3)_2 \rightarrow ZnO + NO_2 + O_2$	13	$FeSO_4 \rightarrow Fe_2O_3 + SO_2 + SO_3$
4	$K_2Cr_2O_7 \rightarrow O_2 + Cr_2O_3 + K_2CrO_4$	14	$KClO_4 \rightarrow KCl + O_2$
5	$Fe(NO_3)_2 \rightarrow Fe_2O_3 + NO_2 + O_2$	15	$CdSO_3 \rightarrow CdSO_4 + CdS$
6	$KMnO_4 \rightarrow K_2MnO_4 + MnO_2 + O_2$	16	$HNO_3 \rightarrow H_2O + NO_2 + O_2$
7	$Fe(NO_3)_2 \rightarrow Fe_2O_3 + NO_2 + O_2$	17	$NaClO_2 \rightarrow NaClO_3 + NaCl$
8	$HNO_2 \rightarrow NO + NO_2 + H_2O$	18	$KClO_3 \rightarrow KCl + O_2$
9	$Co(NO_3)_2 \rightarrow CoO + NO_2 + O_2$	19	$SnSO_4 \rightarrow SnO_2 + SO_2$
10	$LiNO_3 \rightarrow Li_2O + NO_2 + O_2$	20	$Ni(NO_3)_2 \rightarrow Ni(NO_2)_2 + O_2$

2. Расставьте коэффициенты уравнениях реакций замещения методом электронного баланса (по вариантам). Укажите окислитель и восстановитель:

Номер варианта	Схема реакции	Номер варианта	Схема реакции
1	$Fe_2O_3 + C \rightarrow CO_2 + Fe$	11	$Zn + AgNO_3 \rightarrow Zn(NO_3)_2 + Ag$
2	$KBr + Cl_2 \rightarrow KCl + Br_2$	12	$Al_2O_3 + Mg \rightarrow MgO + Al$
3	$Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow H_2O + Fe$	13	$MnO_2 + Al \rightarrow Al_2O_3 + Mn$
4	$Al + H_2SO_4 \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + H_2$	14	$H_2S + Br_2 \rightarrow S + HBr$
5	$O_2 + HI \rightarrow H_2O + I_2$	15	$CuCl_2 + Cr \rightarrow Cu + CrCl_3$
6	$Al + CuSO_4 \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + Cu$	16	$Mg + SiO_2 \rightarrow MgO + Si$
7	$Ca + H_2O \rightarrow H_2 + Ca(OH)$	17	$NaI + Cl_2 \rightarrow NaCl + I_2$
8	$TiO_2 + Mg \rightarrow MgO + Ti$	18	$Na + H_2O \rightarrow H_2 + NaOH$
9	$Al + FeO \rightarrow Al_2O_3 + Fe$	19	$KClO_3 + I_2 \rightarrow KIO_3 + Cl_2$
10	$KI + Br_2 \rightarrow KBr + I_2$	20	$Al + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + H_2$

4. Составление уравнений окислительно-восстановительных реакций. Метод электронно - ионного баланса (метод полуреакций).

Метод полуреакций применим преимущественно для реакций в растворах, зато он позволяет определить коэффициенты не только у окислителя и восстановителя, но и вещества, определяющего среду раствора (кислота, щёлочь, вода), и более удобен для тех реакций, где участвуют органические молекулы. От метода электронного баланса он отличается тем, что окисление и восстановление записывают не для отдельных атомов, а для частиц, реально присуствующих в растворе: катионов, анионов, молекул. Сильные электролиты записываются в виде ионов, слабые электролиты, газы, нерастворимые вещества – в виде молекул. Для материального баланса по кислороду и водороду используются ионы H^+ или OH^- и молекулы воды. При использовании этого метода, кроме алгоритма составления полуреакций, необходимо придерживаться нескольких правил:

1. В кислой среде ни в левой, ни в правой части не должно быть ионов OH^- . Уравнивание осуществляется за счет ионов H^+ и молекул воды.
2. В щелочной среде ни в левой, ни в правой части не должно быть ионов H^+. Уравнивание осуществляется за счет ионов OH^- и молекул воды.
3. В нейтральной среде ни ионов H^+, ни OH^-в левой части быть не должно. Однако в правой части среди продуктов реакции они могут появиться.

Алгоритм подбора коэффициентов в уравнениях ОВР методом ионно-электронного баланса:

1. Составить молекулярную схему реакции с указанием исходных веществ и продуктов реакции.

2. Составить полную ионно-молекулярную схему реакции, записывая слабые электролиты, малорастворимые, нерастворимые и газообразные вещества в молекулярном виде, а сильные электролиты – в ионном.

3. Исключив из ионно-молекулярной схемы ионы, не изменяющиеся в результате реакции (без учета их количества), переписать схему в кратком ионно-молекулярном виде.

4. Отметить элементы, изменяющие в результате реакции степень окисления; найти окислитель, восстановитель, продукты восстановления, окисления.

5. Составить схемы полуреакций окисления и восстановления, для этого:

а) указать восстановитель и продукт окисления, окислитель и продукт восстановления;

б) уравнять число атомов каждого элемента в левой и правой частях полуреакций (выполнить баланс по элементам) в последовательности: элемент, изменяющий степень окисления, кислород, другие элементы; при этом следует помнить, что в водных растворах в реакциях могут участвовать молекулы H_2O, ионы H^+ или OH^- в зависимости от характера среды:

Процесс	Кислая среда	Нейтральная среда	Щелочная среда
Связывание избытка кислорода	$O^{-2}+2H^+ =H_2O$	$O^{-2}+H_2O=2OH^-$	$O^{-2}+H_2O=2OH^-$
Восполнение недостатка кислорода	$H_2O= O^{-2}+2H^+$	$H_2O = O^{-2}+2H^+$	$2OH^-=O^{-2}+H_2O$

в) уравнять суммарное число зарядов в обеих частях полуреакций; для этого прибавить или отнять в левой части полуреакций необходимое число электронов (баланс по зарядам).

6. Найти наименьшее общее кратное (НОК) для числа отданных и полученных электронов.

7. Найти основные коэффициенты при каждой полуреакции. Для этого полученное в п.6 число (НОК) разделить на число электронов, фигурирующих в данной полуреакции.

8. Умножить полуреакции на полученные основные коэффициенты, сложить их между собой: левую часть с левой, правую – с правой (получить ионно-молекулярное уравнение реакции). При необходимости “привести подобные” ионы с учетом взаимодействия между ионами водорода и гидроксид-ионами: $H^+ + OH^- = H_2O$.

9. Расставить коэффициенты в молекулярном уравнении реакции.

10. Провести проверку по частицам, не участвующим в ОВР, исключенным из полной ионно-молекулярной схемы (п.3). При необходимости коэффициенты для них находят подбором.

11. Провести окончательную проверку по кислороду.

Пример 3. В кислой среде:

$K_2Cr_2O_7 + KJ + H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + J_2 + H_2O + K_2SO_4$

$3 \quad 2J^- - 2\bar{e} = J_2$

$1 \quad Cr_2O_7^{2-} + 6\bar{e} + 14H^+ = 2Cr^{+3} + 7H_2O$

Суммарное молекулярное уравнение реакции:

$K_2Cr_2O_7 + 6KJ + 7H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3J_2 + 7H_2O + 4K_2SO_4$

Пример 4. В щелочной среде:

$KCrO_2 + KClO_4 + KOH \rightarrow K_2CrO_4 + KCl + H_2O$

$8 \quad CrO_2^- - 3\bar{e} + 4OH^- \rightarrow CrO_4^{2-} + 2H_2O$

$3 \quad ClO_4^- + 8\bar{e} + 4H_2O \rightarrow Cl^- + 8OH^-$

Суммарное молекулярное уравнение реакции

$8KCrO_2 + 3KClO_4 + 8KOH \rightarrow 8K_2CrO_4 + 3KCl + 4H_2O$

Пример 5. В нейтральной среде:

$KMnO_4 + MnSO_4 + H_2O \rightarrow MnO_2 + K_2SO_4 + H_2SO_4$

$3 \quad Mn - 2\bar{e} + 2H_2O = MnO_2 + 4H^+$

$2 \quad MnO_4 + 3\bar{e} + 2H_2O = MnO_2 + 4OH^-$

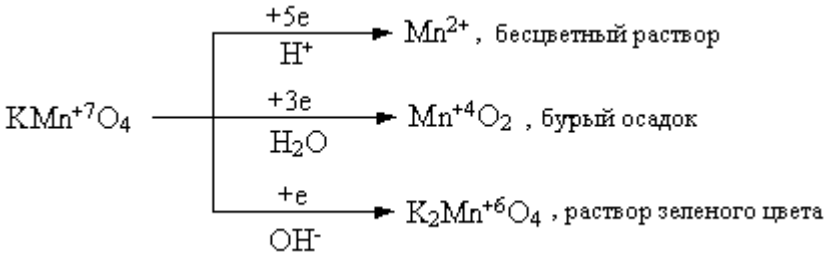
Суммарное молекулярное уравнение реакции:

$2KMnO_4 + 3MnSO_4 + 2H_2O = 5MnO_2 + K_2SO_4 + 2H_2SO_4$

Примеры некоторых часто используемых ОВР:

1) Окислительно-восстановительные реакции с участием перманганата калия

В зависимости от среды (кислая, нейтральная, щелочная) перманганат калия, выступая в качестве окислителя, дает различные продукты восстановления:



Ниже приведены реакции $KMnO_4$ с сульфидом калия в качестве восстановителя в различных средах В этих реакциях продуктом окисления сульфид-иона является свободная сера. В щелочной среде молекулы КОН не принимают участие в реакции, а лишь определяют продукт восстановления перманганата калия.

$$5\ K_2S + 2\ KMnO_4 + 8\ H_2SO_4 = 5\ S\downarrow + 2\ MnSO_4 + 6\ K_2SO_4 + 8\ H_2O,$$

$$3\ K_2S + 2\ KMnO_4 + 4\ H_2O \rightarrow 2\ MnO_2\downarrow + 3\ S\downarrow + 8\ KOH,$$

$$K_2S + 2\ KMnO_4 \xrightarrow{-(KOH)} 2\ K_2MnO_4 + S\downarrow.$$

2) Окислительно-восстановительные реакции с участием дихромата калия

В кислой среде дихромат калия является сильным окислителем. Смесь $K_2Cr_2O_7$ и концентрированной H_2SO_4 (хромпик, хромовая смесь) широко используется в лабораторной практике в качестве окислителя. Взаимодействуя с восстановителем одна молекула дихромата калия принимает шесть электронов, образуя соединения трехвалентного хрома:

$$6\ FeSO_4 + K_2Cr_2O_7 + 7\ H_2SO_4 = 3\ Fe_2(SO_4)_3 + Cr_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 7\ H_2O;$$

$$6\ KI + K_2Cr_2O_7 + 7\ H_2SO_4 = 3\ I_2\downarrow + Cr_2(SO_4)_3 + 4\ K_2SO_4 + 7\ H_2O.$$

3) Окислительно-восстановительные реакции с участием пероксида водорода

Пероксид водорода и нитрит калия проявляют преимущественно окислительные свойства:

$$H_2S + H_2O_2 = S\downarrow + 2\ H_2O,$$

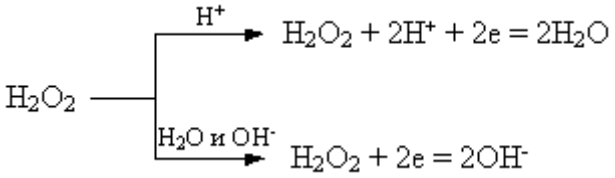
$$2\ KI + 2\ KNO_2 + 2\ H_2SO_4 = I_2\downarrow + 2\ K_2SO_4 + H_2O,$$

Однако, при взаимодействии с сильными окислителями (такими как, например, $KMnO_4$), пероксид водорода и нитрит калия выступают в качестве восстановитеей:

$$5\ H_2O_2 + 2\ KMnO_4 + 3\ H_2SO_4 = 5\ O_2 + 2\ MnSO_4 + K_2SO_4 + 8\ H_2O,$$

$$5\ KNO_2 + 2\ KMnO_4 + 3\ H_2SO_4 = 5\ KNO_3 + 2\ MnSO_4 + K_2SO_4 + 3\ H_2O.$$

Пероксид водорода в зависимости от среды восстанавливается по-разному:



При этом в результате реакций образуется вода или гидроксид-ионы:

$$2\ FeSO_4 + H_2O_2 + H_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + 2\ H_2O,$$

$$2\ KI + H_2O_2 = I_2\downarrow + 2\ KOH.$$

Задания для самостоятельной работы

Расставьте коэффициенты уравнениях методом полуреакций. Укажите окислитель и восстановитель.

Вариант 1.

1) $Zn + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow ZnSO_4 + SO_2\uparrow + H_2O$

2) $Br_2 + KOH \rightarrow KBr + KBrO_3 + H_2O$

3) $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4 + H_2O_2 \rightarrow O_2\uparrow + Cr_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + H_2O$

4) $C_3H_6 + KMnO_4 + H_2O \rightarrow MnO_2\downarrow + C_2H_6(OH)_2 + KOH$

Вариант 2

1) $Zn + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow ZnSO_4 + S\downarrow + H_2O$

2) $S + KOH \rightarrow K_2S + K_2SO_3 + H_2O.$

3) $BaS + HNO_{3(конц.)} \rightarrow Ba(NO_3)_2 + S\downarrow + NO_2\uparrow + H_2O$

4) $CH_2{=}C(CH_3)_2 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CH_3(CO)CH_3 + H_2O + CO_2\uparrow$

Вариант 3

1) $Zn + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow ZnSO_4 + H_2S\uparrow + H_2O$

2) $NO_2 + NaOH \rightarrow NaNO_2 + NaNO_3 + H_2O$

3) $CrCl_3 + Cl_2 + H_2O \rightarrow K_2Cr_2O_7 + HCl$

4) $CH_3C{=}C(CH_3)_2 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CH_3(CO)CH_3 + H_2O + CH_3COOH$

Вариант 4

1) $Al + H_2SO_{4(конц., гор.)} \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + H_2S\uparrow + H_2O$

2) $AuCl_3 + H_2O_2 + KOH \rightarrow Au + H_2O + O_2\uparrow + KCl$

3) $KMnO_4 + Fe(OH)_2 + H_2O \rightarrow MnO_2\downarrow + Fe(OH)_3\downarrow + KOH$

4) $C_5H_{10} + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + H_2O + C_2H_5COOH + CH_3COOH$

Вариант 5

1) $Ag + H_2SO_{4(конц., гор.)} \rightarrow Ag_2SO_4\downarrow + SO_2\uparrow + 2H_2O$

2) $NH_4HS + HNO_{3(конц.)} \rightarrow S\downarrow + 2NO_2\uparrow + NH_4NO_3 + 2H_2O$

3) $MnSO_4 + H_2O_2 + KOH \rightarrow MnO_2\downarrow + K_2SO_4 + H_2O$

4) $C_6H_{12} + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + H_2O + C_2H_5COOH$

Вариант 6

1) $Bi + H_2SO_4 \rightarrow Bi_2(SO_4)_3 + SO_2\uparrow + H_2O$

2) $CuS + HNO_3 \rightarrow NO_2\uparrow + CuSO_4 + H_2O$

3) $C + H_2SO_{4(конц.)} + K_2Cr_2O_{7(конц.)} \rightarrow CO_2\uparrow + Cr_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + H_2O$

4) $HCOH + NaOH + I_2 \rightarrow HCOONa + NaI + H_2O$

Вариант 7

1) $Ag + HNO_{3(разб.)} \rightarrow AgNO_3 + NO\uparrow + H_2O$

2) $Cr_2(SO_4)_3 + Br_2 + KOH \rightarrow K_2CrO_4 + KBr + K_2SO_4 + H_2O$

3) $Br_2 + S + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + HBr$

4) $CH_3C{\equiv}CCH_3 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CH_3COOH + H_2O$

Вариант 8

1) $Ba + HNO_{3(разб.)} \rightarrow Ba(NO_3)_2 + N_2O\uparrow + H_2O$

2) $MnO_2 + HCl \rightarrow MnCl_2 + H_2O + Cl_2\uparrow$

3) $As_2O_3 + NaOH + NaNO_3 \rightarrow Na_3AsO_4 + NaNO_2 + H_2O$

4) $C_6H_5\text{-}CH_3 + KMnO_4 \rightarrow C_6H_5COOK + KOH + MnO_2\downarrow + H_2O$

Вариант -9

1) $Be + HNO_{3(разб., гор.)} \rightarrow Be(NO_3)_2 + NO\uparrow + H_2O$

2) $P + H_2SO_4 \rightarrow H_3PO_4 + SO_2\uparrow + H_2O$

3) $Bi(NO_3)_3 + NaClO + NaOH_{(конц.)} \rightarrow NaBiO_3\downarrow + NaNO_3 + NaCl + H_2O$

4) $C_6H_5\text{-}C_2H_5 + KMnO_4 \rightarrow C_6H_5COOK + K_2CO_3 + MnO_2 + H_2O$

Вариант 10

1) $Cd + HNO_{3(конц.)} \rightarrow Cd(NO_3)_2 + NO_2\uparrow + 2H_2O$

2) $AlBr_{3(тверд.)} + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + Br_2 + SO_2\uparrow + H_2O$

3) $AsH_3 + NaOH_{(разб.)} + NaClO \rightarrow Na_3AsO_4 + NaCl + H_2O$

4) $C_6H_5\text{-}CH_3 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + C_6H_5\text{-}COOH + H_2O$

Вариант 11

1) $Ca + HNO_{3(разб.)} \rightarrow Ca(NO_3)_2 + N_2O\uparrow + H_2O$

2) $NH_4I_{(тверд.)} + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow I_2\downarrow + H_2S\uparrow + H_2O + NH_4HSO_4$

3) $Bi(OH)_3 + KOH_{(конц.)} + KMnO_4 \rightarrow KBiO_3\downarrow + K_2MnO_4 + H_2O$

4) $C_6H_5\text{-}CH(CH_3)_2 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + C_6H_5\text{-}COOH + H_2O + CO_2\uparrow$

Вариант 12

1) $Ba + HNO_{3(оч.\ разб.)} \rightarrow Ba(NO_3)_2 + NH_4NO_3 + H_2O$

2) $Au_2S_3 + HNO_{3(конц.)} \rightarrow Au\downarrow + H_2SO_4 + NO_2\uparrow + H_2O$

3) $HBrO_3 + H_2O + S \rightarrow HBr + H_2SO_4$

4) $C_6H_5\text{-}CH_3 + K_2Cr_2O_4 + H_2SO_4 \rightarrow Cr_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + C_6H_5\text{-}COOH + H_2O$

Вариант 13

1) $Bi + HNO_{3(разб.)} \rightarrow Bi(NO_3)_3 + NO\uparrow + H_2O$

2) $PbO_2 + HCl \rightarrow PbCl_2 + Cl_2 + H_2O$

3) $AsH_3 + H_2O + AgNO_3 \rightarrow As_2O_3\downarrow + Ag\downarrow + HNO_3$

4) $CH_3{\equiv}CCH_3 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CH_3COOH + H_2O + CO_2$

Вариант 14

1) $Cd + HNO_{3(конц.)} \rightarrow Cd(NO_3)_2 + NO_2\uparrow + H_2O$

2) $C_2N_2 + KOH \rightarrow KCN + KCNO + H_2O$

3) $H_2SO_3 + I_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + HI$

4) $C_4H_8 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CO_2\uparrow + H_2O + C_2H_5COOH$

Вариант 15

1) $Cu + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + SO_2\uparrow + H_2O$

2) $AlP + HNO_{3(конц.,\ гор.)} \rightarrow Al(NO_3)_3 + H_3PO_4 + NO_2\uparrow + H_2O$

3) $Br_2 + SO_2 + H_2O \rightarrow HBr + H_2SO_4$

4) $C_2H_4 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CO_2\uparrow + H_2O$

Вариант 16

1) $Cu + HNO_3 \rightarrow Cu(NO_3)_2 + NO + H_2O$

2) $H_2Cr_2O_7 + H_2O_2 \rightarrow H_2CrO_6 + H_2O.$

3) $Si + NaOH + H_2O \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2\uparrow$

4) $C_2H_2 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CO_2\uparrow + H_2O$

Вариант 17

1) $As + H_2SO_{4(конц.,\ гор.)} \rightarrow As_2O_3\downarrow + SO_2\uparrow + H_2O$

2) $B_2S_3 + HNO_{3(конц.)} \rightarrow H_3BO_3\downarrow + H_2SO_4 + NO_2\uparrow + H_2O$

3) $SiH_4 + NaOH + H_2O \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2\uparrow$

4) $C_6H_5\text{-}CH(CH_3)_2 + KMnO_4 + H_2O \rightarrow MnO_2\downarrow + C_6H_5COOK + K_2CO_3 + KOH$

Вариант 18

1) $Fe + H_2SO_{4(конц.)} \overset{\circ}{\rightarrow} Fe_2(SO_4)_3 + SO_2\uparrow + H_2O$

2) $I_2 + H_2O_2 \rightarrow HIO_3 + H_2O$

3) $B + KOH + H_2O \rightarrow KBO_2 + H_2\uparrow$

4) $C_3H_4 + KMnO_4 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + K_2SO_4 + CH_2(COOH)_2 + H_2O$

Вариант 19

1) $As + HNO_{3(конц.)} \rightarrow H_3AsO_4 + NO_2\uparrow + H_2O$

2) $K_2C_2O_4 + H_2SO_4 \rightarrow KHSO_4 + CO\uparrow + CO_2\uparrow + H_2O$

3) $Pb(CH_3COOH)_2 + CaOCl_2 + H_2O \rightarrow PbO_2\downarrow + CaCl_2 + CH_3COOH$

4) $CH_3COCH_3 + I_2 + NaOH \rightarrow CHI_3 + CH_3COONa + NaI + H_2O$

Вариант 20

1) $C + HNO_{3(конц., гор.)} \rightarrow CO_2\uparrow + NO_2\uparrow + H_2O$

2) $HBr_{(конц.)} + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow Br_2 + SO_2\uparrow + H_2O$

3) $AgNO_3 + NaOH + H_2O_2 \rightarrow Ag\downarrow + NaNO_3 + H_2O + O_2\uparrow$

4) $KMnO_4 + (COOH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow MnSO_4 + CO_2\uparrow + K_2SO_4 + H_2O$

Дополнительные уравнения

1. $Au_2S_3 + HNO_{3(конц.)} \rightarrow Au\downarrow + H_2SO_4 + NO_2\uparrow + H_2O$
2. $As_2S_3 + H_2SO_{4(конц.)} \rightarrow As_2O_3\downarrow + SO_2\uparrow + H_2O$
3. $HNO_3 + Cu_2S \rightarrow NO_2\uparrow + H_2O + CuSO_4 + Cu(NO_3)_2$
4. $SiC + NaOH + O_2 \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2O + Na_2CO_3$
5. $Bi(NO_3)_3 + Na_2O_2 + NaOH \rightarrow NaBiO_3 + NaNO_2 + H_2O + O_2$
6. $AgCN + HNO_{3(конц., гор.)} \rightarrow AgNO_3 + NO_2\uparrow + NH_4NO_3 + CO_2\uparrow$
7. $Al + NaOH + 6H_2O \rightarrow Na[Al(OH)_4] + H_2$
8. $Au + HCl + HNO_3 \rightarrow H[AuCl_4] + NO + H_2O$
9. $[Co(H_2O)_6]^{2+} + NH_3 + O_2 + H^+ \rightarrow [Co(NH_3)_6]^{3+} + H_2O.$
10. $Au + NaCN + H_2O + O_2 \rightarrow Na[Au(CN)_2] + NaOH$
11. $Pt + HNO_3 + HCl \rightarrow H_2[PtCl_6] + NO + H_2O$
12. $Na[Au(CN)_2] + Zn \rightarrow Na_2[Zn(CN)_4] + Au$
13. $Fe + C_6H_5COONa + H_2O + O_2 \rightarrow [Fe(C_6H_5COOH)_6](OH)_3 + NaOH$

Направление протекания окислительно-восстановительных реакций

Направление протекания ОВР в водном растворе устанавливается в стандартных условиях по значениям **стандартных потенциалов** φ° полуреакций восстановления:

Окисленная форма + ne^- → Восстановленная форма

Окислительно-восстановительные реакции протекают самопроизвольно, если разность стандартных электродных потенциалов окислителя и восстановителя, или э.д.с. окислительно-восстановительной реакции $\Delta E > 0$.

Стандартные условия протекания реакции: температура 298,15 К, давление в системе при отсутствии газообразных реагентов или продуктов 1 атмосфера (101325 Па), парциальное давление каждого газообразного реагента или продукта при их наличии 1 атмосфера. Стандартная концентрация каждой окисленной и восстановленной формы в растворе 1 моль/л. Стандартные потенциалы измеряют по отношению к стандартному водородному электроду, потенциал которого условно принят равным нулю.

Если значение φ° для окислительно-восстановительной пары, отрицательное, например

$Zn^{2+} + 2\ e^- \rightarrow Zn$; φ° = – 0,763 В

то реакция, в которой Zn^{2+} – окислитель и H_2 – восстановитель, характеризуется отрицательным значением разности стандартных потенциалов соответствующих пар.

$Zn^{2+} + H_{2(г)} \rightarrow Zn + 2\ H^+_{(р)}$ $\varphi^\circ_{Ок} - \varphi^\circ_{Вс} = -0{,}763 - (0) = -0{,}763$ В.

Направление ОВР определяет окислитель, у которого значение электродного потенциала больше. На практике самопроизвольно осуществляется обратный процесс: $Zn + 2\ H^+_{(р)} \rightarrow Zn^{2+} + H_{2(г)}$ $\varphi^\circ_{Ок} - \varphi^\circ_{Вс} = 0 - (-0{,}763) = +0{,}763$ В

Для положительных значений φ°, например пары Cu^{2+} / Cu

$Cu^{2+} + 2\ e^- = Cu$; φ° = + 0,338 В

реакция

$Cu^{2+} + H_{2(г)} = Cu + 2\ H^+_{(р)}$ $\varphi^\circ_{Ок} - \varphi^\circ_{Вс} = +0{,}338 - (0) = +0{,}338$ В

где 2 $H^+_{(р)}$ – окислитель и H_2 – восстановитель, характеризуется положительным значением разности потенциалов, и может протекать самопроизвольно.

Пример 1. Установить, в каком направлении возможно самопроизвольное протекание реакции

$2NaCl + Fe_2(SO_4)_3 \leftrightarrow 2FeSO_4 + Cl_2 + Na_2SO_4$

Запишем уравнения электронного баланса и стандартные электродные потенциалы электрохимических систем, участвующих в реакции :

$Cl_2 + 2e^- = 2Cl^-$, $\varphi_1^o = 1{,}36$ В;

$Fe^{3+} + e^- = Fe^{2+}$, $\varphi_2^o = 0{,}77$ В .

Поскольку $\varphi_1^o > \varphi_2^o$, то окислителем будет служить хлор, а восстановителем - ион Fe^{2+}; рассматриваемая реакция будет протекать так:

$2FeSO_4 + Cl_2 + Na_2SO_4 \rightarrow 2NaCl + Fe_2(SO_4)_3$

Пример 2. Установить, в каком направлении возможно самопроизвольное протекание реакции

$K_2Cr_2O_7 + 14HCl \leftrightarrow 2CrCl_3 + 3Cl_2 + 7H_2O$

Запишем уравнения электронно-ионного баланса и стандартные электродные потенциалы электрохимических систем, участвующих в реакции:

$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e = 2Cr^{3+} + 7H_2O$ $\varphi^o_1 = +1{,}33$ В

$Cl_2 + 2e = 2Cl^-$ $\varphi^o_2 = +1{,}36$ В

Поскольку $\varphi_2^o > \varphi_1^o$, то окислителем будет служить хлор, а восстановителем – бихромат-ион; рассматриваемая реакция будет протекать так::

$2CrCl_3 + 3Cl_2 + 7H_2O \rightarrow K_2Cr_2O_7 + 14HCl$

В примере 1 стандартные электродные потенциалы взаимодействующих электрохимических систем существенно различались, так что направление протекания процесса однозначно определялось значениями φ^o при любых концентрациях реагирующих веществ. В тех случаях, когда сравниваемые

значения φ^o близки (разность не более 0,3 В), направление протекания процесса может изменяться в зависимости от концентраций участников реакции (пример 2).

Величина окислительно-восстановительного потенциала в условиях, отличающихся от стандартных, определяется уравнением Нернста:

$$\varphi = \varphi^0 + \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{[Ox]}{[\mathrm{Re}\, d]},$$

где φ – окислительно-восстановительный потенциал в данных условиях, В;

φ^0 – стандартный окислительно-восстановительный потенциал, В;

R – универсальная газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К));

T – абсолютная температура, K;

n – число электронов, принимающих участие в потенциалопределяющей полуреакции;

F – постоянная Фарадея (F = 96484.56 Кл/моль);

[Ox]– концентрация окисленной формы ионов;

[Red]– концентрация восстановленной формы ионов.

Концентрация твердой фазы принимается за единицу.

Для стандартной температуры 298 К и с переходом от натурального логарифма к десятичному уравнение Нернста будет иметь вид

$$\varphi = \varphi^0 + \frac{0{,}059}{n} \cdot \lg \frac{[Ox]}{[\mathrm{Re}\, d]},$$

Пример 3. Определить направление возможного самопроизвольного протекания реакции

$$2Hg + 2Ag^+ \leftrightarrow 2Ag + Hg_2^{2+}$$

при стандартной температуре и следующих концентрациях ионов:

а) $[Ag^+] = 10^{-4}$ моль/л , $[Hg_2^{2+}] = 10^{-1}$моль/л;

б) $[Ag^+] = 10^{-1}$моль/л , $[Hg_2^{2+}] = 10^{-4}$моль/л.

Выпишем значения стандартных электродных потенциалов взаимодействующих электрохимических систем:

$Hg_2^{2+} + 2e^- = 2Hg$, $\varphi_1^o = 0{,}79$ В;

$Ag^+ + e^- = Ag$, $\varphi_2^o = 0{,}80$ В.

По уравнению Нернста вычислим значения электродных потенциалов при указанных в условиях задачи концентрациях.

а) $\varphi_1 = \varphi_1^o + 0{,}059/2 \cdot \lg [Hg_2^{2+}] = 0{,}79 + 0{,}030 \lg 10^{-1} = 0{,}79 - 0{,}03 = 0{,}76$ В;

$\varphi_2 = \varphi_2^o + 0{,}059 \cdot \lg [Ag^+] = 0{,}80 + 0{,}059 \lg 10^{-4} = 0{,}80 - 0{,}24 = 0{,}56$ В.

В данном случае $\varphi_1 > \varphi_2$, реакция будет протекать справа налево.

б) $\varphi_1 = 0{,}79 + 0{,}030 \cdot \lg 10^{-4} = 0{,}79 - 0{,}12 = 0{,}67$ В;

$\varphi_2 = 0{,}80 + 0{,}059 \cdot \lg 10^{-1} = 0{,}80 - 0{,}06 = 0{,}74$ В.

Теперь $\varphi_1 < \varphi_2$, и реакция протекает слева направо.

Зависимость окислительной способности некоторых веществ от кислотности среды так же определяется уравнением Нернста. Например, для полуреакции

$$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightarrow Mn^{2+} + 4\ H_2O$$

окислительно-восстановительный потенциал можно вычислить по формуле

$$\varphi = \varphi^0 + \frac{0{,}059}{5} \cdot \lg \frac{[MnO_4^-] \cdot [H^+]^8}{[Mn^{2+}]}, \text{ или}$$

$$\varphi = 1{,}507 + 0{,}012 \cdot \lg \frac{[MnO_4^-]}{[Mn^{2+}]} - 0{,}095 pH$$

Потенциалы процесса зависит от pH среды и будет тем больше, чем кислее раствор. Зависимость окислительного потенциала $KMnO_4$ от концентрации ионов водорода пользуются для фракционного окисления анионов галогенидов до свободных галогенов. При pH от 5 до 6 перманганат окисляет только йодиды до йода (не действуя на бромиды и хлориды), при pH = 3 окисляются бромиды, и только при значительно более высокой кислотности окисляются хлориды.

Задания для самостоятельной работы

Обоснуйте возможность самопроизвольного протекания реакций №1 вашего варианта на стр. 16-19, используя Приложение.

Приложение

Таблица 1

СТАНДАРТНЫЕ ЭЛЕКТРОДНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

Элемент	Реакция	E^0	Элемент	Реакция	E^0
Ag	α -$Ag_2S + 2\bar{e} = 2Ag + S^{2-}$	-0,70	B	$BF_4^- + 3e = B + 4F^-$	-1,04
	$Ag(CN)_2^- + \bar{e} = Ag + 2CN^-$	-0,29		$H_3BO_3 + 3H^+ + 3e = B + 3H_2O$	-0,869
	$AgI + \bar{e} = Ag + I^-$	-0,152		$BO_3^{3-} + 6H^+ + 3e = B + 3H_2O$	-0,165
	$AgCN + \bar{e} = Ag + CN^-$	-0,04	Ba	$Ba^{2+} + 2e = Ba$	-2,905
	$Ag(S_2O_3)_2^{3-} + \bar{e} = Ag + 2S_2O_3^{2-}$	0,01	Be	$Be^{2+} + 2e = Be$	-1,847
	$AgBr + \bar{e} = Ag + Br^-$	0,071		$Be(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Be + 2H_2O$	-1,820
	$AgCl + \bar{e} = Ag + Cl^-$	0,222		$BeO_2^{2-} + 4H^+ + 2e = Be + 2H_2O$	-0,909
	$Ag_2O + H_2O + 2\bar{e} = 2Ag + 2OH^-$	0,344	Bi	$Bi_2O_3 + 3H_2O + 6e = 2Bi + 6OH^-$	-0,46
	$Ag(NH_3)_2^+ + \bar{e} = Ag + 2NH_3$	0,373		$BiOCl + 2H^+ + 3e = Bi + Cl^- + H_2O$	0,16
	$Ag_2CrO_4 + 2\bar{e} = 2Ag + CrO_4^{2-}$	0,446		$Bi^{3+} + 3e = Bi$	0,215
	$Ag_2C_2O_4 + 2\bar{e} = 2Ag + C_2O_4^{2-}$	0,472		$BiO^+ + 2H^+ + 3e = Bi + H_2O$	0,32
	$AgBrO_3 + \bar{e} = Ag + BrO_3^-$	0,55		$Bi_2O_3 + 6H^+ + 6e = 2Bi + 3H_2O$	0,371
	$2AgO + H_2O + 2\bar{e} = Ag_2O + 2OH^-$	0,60		$NaBiO_3$(т) + $6H^+$+ 2e = Bi^{3+} + Na^+ + $3H_2O$	1,6 - 1,808
	$Ag^+ + \bar{e} = Ag$	0,799	Br	$2BrO^- + 2H_2O + 2e = Br_2 + 4OH^-$	0,45
	$Ag_2O + 2H^+ + 2\bar{e} = 2Ag + H_2O$	1,173		$2BrO_3^- + 6H_2O + 10e = Br_2 + 12OH^-$	0,50
	$2AgO + 2H^+ + 2\bar{e} = Ag_2O + H_2O$	1,398		$BrO_3^- + 2H_2O + 4e = BrO^- + 4OH^-$	0,54
Al	$AlO_2^- + 2H_2O + 3\bar{e} = Al + 4OH^-$	-2,35		$BrO_3^- + 3H_2O + 6e = Br^- + 6OH^-$	0,61
	$Al(OH)_3 + 3\bar{e} = Al + 3OH^-$	-2,31		$BrO^- + H_2O + 2e = Br^- + 2OH^-$	0,76
	$AlF_6^{3-} + 3\bar{e} = Al + 6F^-$	-2,07		$Br_3^- + 2e = 3Br^-$	1,05
	$Al^{3+} + 3e = Al$	-1,663		Br_2(ж) + 2e = $2Br^-$	1,065
	$Al(OH)_3 + 3H^+ + 3e = Al + 3H_2O$	-1,471		$BrO_3^- + 6H^+ + 6e = Br^- + 3H_2O$	1,44
	$AlO_2^- + 4H^+ + 3e = Al + 2H_2O$	-1,262		$2BrO_3^- + 12H^+ + 10e = Br_2 + 6H_2O$	1,52
As	$As + 3H^+ + 3e = AsH_3$	-0,60		$2HBrO + 2H^+ + 2e = Br_2 + 2H_2O$	1,59
	$HAsO_2 + 3H^+ + 3e = As + 2H_2O$	0,248	C	$HCOO^- + 2H_2O + 2e = HCHO + 3OH^-$	-1,07
	$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e = HAsO_2 + 2H_2O$	0,559		$2CO_2 + 2H^+ + 2e = H_2C_2O_4$	-0,49
	$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e = H_3AsO_3 + H_2O$	0,58		$CO_2 + 2H^+ + 2e = HCOOH$	-0,20
Au	$Au(CN)_2 + e = Au + 2CN^-$	-0,61		C(графит) + $4H^+$ + 4e = CH_4	-0,132
	$AuBr_4^- + 2e = AuBr_2^- + 2Br^-$	0,802		$CO_2 + 2H^+ + 2e = CO + H_2O$	-0,12
	$AuCl_4^- + 2e = AuCl_2^- + 2\ Cl^-$	0,926		$HCOOH + 2H^+ + 2e = HCHO + H_2O$	-0,01
	$AuBr_2^- + e = Au + 2Br^-$	0,959		$HCOOH + 4H^+ + 4e = CH_3OH + H_2O$	0,145
	$AuCl_2^- + 2e = Au + 2Cl^-$	1,15		$HCOO^- + 3H^+ + 2e = HCHO + H_2O$	0,167
	$Au^{3+} + 2e = Au^+$	1,401		$CH_3CHO + 2H^+ + 2e = C_2H_5OH$	0,19
	$Au^{3+} + 3e = Au$	1,498		$CO_3^{2-} + 6H^+ + 4e = HCHO + 2H_2O$	0,197
	$Au^+ + 3e = Au$	1,692		$HCOO^- + 5H^+ + 4e = CH_3OH + H_2O$	0,199
Элемент	Реакция	E^0	Элемент	Реакция	E^0

C	$CO_3^{2-} + 8H^+ + 6e = CH_3OH + 2H_2O$	0,209	Co	$Co(OH)_2 + 2e = Co + 2OH^-$	-0,73
	$CO_3^{2-} + 3H^+ + 2e = HCOO^- + H_2O$	0,227		$CoCO_3 + 2e = Co + CO_3^{2-}$	-0,64
	$HCHO + 2H^+ + 2e = CH_3OH$	0,232		$Co(NH_3)_6^{2+} + 2e = Co + 6NH_3$	-0,42
	$2CO_3^{2-} + 4H^+ + 2e = C_2O_4^{2-} + 2H_2O$	0,441		$Co^{2+} + 2e = Co$	-0,277
	$C_2H_5OH + 2H^+ + 2e = C_2H_6 + H_2O$	0,46		$Co(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Co + 2H_2O$	0,095
	$CO_3^{2-} + 6H^+ + 4e = C(графит) + 3H_2O$	0,475		$Co(NH_3)_6^{3+} + e = Co(NH_3)_6^{2+}$	0,1
	$CO + 6H^+ + 6e = CH_4 + H_2O$	0,497		$CoO + 2H^+ + 2e = Co + H_2O$	0,166
	$CH_3OH + 2H^+ + 2e = CH_4 + H_2O$	0,59		$Co(OH)_3 + e = Co(OH)_2 + OH^-$	0,17
Ca	$Ca^{2+} + 2e = Ca$	-2,866		$Co^{3+} + 3e = Co$	0,33
Cd	$CdS + 2e = Cd + S^{2-}$	-1,175		$Co^{3+} + e = Co^{2+}$	1,38 - 1,842
	$Cd(CN)_4^{2-} + 2e = Cd + 4CN^-$	-1,09	Cr	$Cr(OH)_2 + 2e = Cr + 2OH^-$	-1,4
	$Cd(OH)_2 + 2e = Cd + 2OH^-$	-0,81		$Cr(OH)_3 + 3e = Cr + 3OH^-$	-1,3
	$Cd(NH_3)_4^{2+} + 2e = Cd + 4NH_3$	-0,61		$CrO_2^- + 2H_2O + 3e = Cr + 4OH^-$	-1,2
	$Cd^{2+} + 2e = Cd$	-0,403		$Cr^{2+} + 2e = Cr$	-0,913
	$Cd(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Cd + 2H_2O$	0,005		$Cr^{3+} + 3e = Cr$	-0,744
	$CdO + 2H^+ + 2e = Cd + H_2O$	0,063		$Cr(OH)_3 + 3H^+ + 3e = Cr + 3H_2O$	-0,654
Ce	$Ce^{3+} + 3e = Ce$	-2,48		$Cr^{3+} + e = Cr^{2+}$	-0,407
	$Ce^{4+} + e = Ce^{3+}$ (1M H_2SO_4)	1,44		$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e = Cr(OH)_3 + 5OH^-$	-0,13
	$Ce^{4+} + e = Ce^{3+}$ (1M HNO_3)	1,61		$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 12e = 2Cr + 7H_2O$	0,294
	$Ce^{4+} + e = Ce^{3+}$ (1M $HClO_4$)	1,70		$CrO_4^{2-} + 8H^+ + 6e = Cr + 4H_2O$	0,366
	$Ce^{4+} + e = Ce^{3+}$	1,77		$CrO_4^{2-} + 4H^+ + 3e = CrO_2^- + 2H_2O$	0,945
Cl	$ClO_4^- + H_2O + 2e = ClO_3^- + 2OH^-$	0,36		$CrO_2^- + 4H^+ + e = Cr^{2+} + 2H_2O$	1,188
	$2ClO^- + 2H_2O + 2e = Cl_2 + 4OH^-$	0,40		$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e = 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1,333
	$ClO_4^- + H_2O + 8e = Cl^- + 8OH^-$	0,56		$CrO_4^{2-} + 8H^+ + 3e = Cr^{3+} + 4H_2O$	1,477
	$ClO_3^- + 3H_2O + 6e = Cl^- + 6OH^-$	0,63	Cs	$Cs^+ + e = Cs$	-2,923
	$ClO_2 + 2H_2O + 5e = Cl^- + 4OH^-$	0,85	Cu	$Cu_2S + 2e = 2Cu + S^{2-}$	-0,89
	$ClO^- + H_2O + 2e = Cl^- + 2OH^-$	0,88		$CuS + 2e = Cu + S^{2-}$	-0,71
	$ClO_3^- + 2H^+ + e = ClO_2 + H_2O$	1,15		$Cu(CN)_2^- + e = Cu + 2CN^-$	-0,43
	$ClO_4^- + 2H^+ + 2e = ClO_3^- + H_2O$	1,189		$Cu_2O + H_2O + 2e = 2Cu + 2OH^-$	-0,36
	$ClO_2 + 4H^+ + 4e = 2HCl + H_2O$	1,351		$Cu(OH)_2 + 2e = Cu + 2OH^-$	-0,22
	$Cl_2 + 2e = 2Cl^-$	1,3595		$CuI + e = Cu + I^-$	-0,185
	$ClO_4^- + 8H^+ + 8e = Cl^- + 4H_2O$	1,38		$Cu(NH_3)_2^+ + e = Cu + 2NH_3$	-0,12
	$2ClO_4^- + 16H^+ + 14e = Cl_2 + 8H_2O$	1,39		$Cu(NH_3)_4^{2+} + 2e = Cu + 4NH_3$	-0,07
	$ClO_2 + 5H^+ + 5e = HCl + 2H_2O$	1,436		$Cu(NH_3)_4^{2+} + 2e = Cu(NH_3)_2^+ + 2NH_3$	-0,01
	$ClO_3^- + 6H^+ + 6e = Cl^- + 3H_2O$	1,451		$CuI_2^- + e = Cu + 2I^-$	0,00
	$2ClO_3^- + 12H^+ + 10e = Cl_2 + 6H_2O$	1,47		$CuBr + e = Cu + Br^-$	0,03
	$HClO + H^+ + 2e = Cl^- + H_2O$	1,494		$CuCl + e = Cu + Cl^-$	0,137
	$ClO_2 + 4H^+ + 5e = Cl^- + 2H_2O$	1,51		$Cu^{2+} + e = Cu^+$	0,153
	$2ClO_2 + 8H^+ + 8e = Cl_2 + 4H_2O$	1,549		$CuCl_2^- + e = Cu + 2Cl^-$	0,177
	$HClO_2 + 3H^+ + 4e = Cl^- + 2H_2O$	1,57		$2Cu^{2+} + H_2O + 2e = Cu_2O + 2H^+$	0,203
	$2HClO + 2H^+ + 2e = Cl_2 + 2H_2O$	1,63		$Cu^{2+} + 2e = Cu$	0,345
	$2HClO_2 + 6H^+ + 6e = Cl_2 + 4H_2O$	1,64		$Cu^{2+} + 2Cl^- + e = CuCl_2^-$	0,463
Co	β -$CoS + 2e = Co + S^{2-}$	-1,07		$Cu^+ + e = Cu$	0,520
	α -$CoS + 2e = Co + S^{2-}$	-0,90		$Cu^{2+} + Cl^- + e = CuCl$	0,538
Cu	$CuO + 2H^+ + 2e = Cu + H_2O$	0,570	Hg	$HgBr_4^{2-} + 2e = Hg + 4Br^-$	0,21

	$Cu(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Cu + 2H_2O$	0,609		$Hg_2Cl_2 + 2K^+ + 2e = 2Hg + 2KCl$ (тв)	0,2415
	$Cu^{2+} + Br^- + e = CuBr$	0,640		$Hg_2Cl_2 + 2e = 2Hg + 2Cl^-$	0,268
	$2CuO + 2H^+ + 2e = Cu_2O + H_2O$	0,669		$Hg_2Cl_2 + 2e = 2Hg + 2Cl^-$ (1M KCl)	0,28
	$Cu^{2+} + I^- + e = CuI$	0,86		$Hg_2Cl_2 + 2e = 2Hg + 2Cl^-$ (0,1M KCl)	0,334
	$Cu^{2+} + 2CN^- + e = Cu(CN)_2$	1,12		$HgCl_4^{2-} + 2e = Hg + 4Cl^-$	0,48
Dy	$Dy^{3+} + 3e = Dy$	-2,353		$Hg_2SO_4 + 2e = 2Hg + SO_4^{2-}$	0,6151
Eu	$Eu^{2+} + 2e = Eu$	-3,395		$Hg_2^{2+} + 2e = 2Hg$	0,788
	$Eu^{3+} + e = Eu^{2+}$	-0,429		$Hg^{2+} + 2e = Hg$	0,850
F	$F_2O + 2H^+ + 4e = 2F^- + H_2O$	2,1		$2Hg^{2+} + 2e = Hg_2^{2+}$	0,920
	$F_2 + 2e = 2F^-$	2,87		$HgO + 2H^+ + 2e = Hg + H_2O$	0,926
Fe	$FeS + 2e = Fe + S^{2-}$	-0,95	Ho	$Ho^{3+} + 3e = Ho$	-2,319
	$Fe(OH)_2 + 2e = Fe + 2OH^-$	-0,877	I	$IO_3^- + 2H_2O + 4e = IO^- + 4OH^-$	0,14
	$FeCO_3 + 2e = Fe + CO_3^{2-}$	-0,756		$2IO_3^- + 6H_2O + 10e = I_2 + 12OH^-$	0,21
	$Fe(OH)_3 + e = Fe(OH)_2 + OH^-$	-0,56		$IO_3^- + 3H_2O + 6e = I^- + 6OH^-$	0,25
	$Fe^{2+} + 2e = Fe$	-0,440		$2IO^- + H_2O + 2e = I_2 + 4OH^-$	0,45
	$Fe_3O_4 + 8H^+ + 8e = 3Fe + 4H_2O$	-0,085		$IO^- + H_2O + 2e = I^- + 2OH^-$	0,49
	$Fe_2O_3 + H_2O + 2H^+ + 2e = 2Fe(OH)_2$	-0,057		$I_2 + 2e = 2I^-$	0,536
	$Fe_2O_3 + 6H^+ + 6e = 2Fe + 3H_2O$	-0,051		$I_3^- + 2e = 3I^-$	0,545
	$Fe(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Fe + 2H_2O$	-0,047		$IO_3^- + 2H_2O + 4e = IO^- + 4OH^-$	0,56
	$Fe^{3+} + 3e = Fe$	-0,037		$HIO + H^+ + 2e = I^- + H_2O$	0,99
	$Fe(OH)_3 + 3H^+ + 3e = Fe + 3H_2O$	0,059		$2ICl_2^- + 2e = I_2 + 4Cl^-$	1,06
	$Fe(OH)_3 + H^+ + e = Fe(OH)_2 + H_2O$	0,271		$IO_3^- + 6H^+ + 6e = I^- + 3H_2O$	1,085
	$Fe(CN)_6^{3-} + e = Fe(CN)_6^{4-}$	0,356		$IO_3^- + 5H^+ + 4e = HIO + 2H_2O$	1,14
	$Fe^{3+} + e = Fe^{2+}$ (1M H_2SO_4)	0,68		$2IO_3^- + 12H^+ + 10e = I_2 + 6H_2O$	1,19
	$Fe^{3+} + e = Fe^{2+}$ (1M HCl)	0,70		$2HIO + 2H^+ + 2e = I_2 + 2H_2O$	1,45
	$Fe(CN)_6^{3-} + e = Fe(CN)_6^{4-}$ (1M HCl)	0,71		$H_5IO_6 + H^+ + 2e = IO_3^- + 3H_2O$	1,60
	$Fe^{3+} + e = Fe^{2+}$	0,771	Ir	$IrO_2 + 4H^+ + 4e = Ir + H_2O$	0,93
	$Fe_3O_4 + 8H^+ + 2e = 3Fe^{2+} + 4H_2O$	0,980		$Ir^{3+} + 3e = Ir$	1,15
Ga	$Ga^{3+} + 3e = Ga$	-0,53	K	$K^+ + e = K$	-2,924
Gd	$Gd^{3+} + 3e = Gd$	-2,397	La	$La^{3+} + 3e = La$	-2,522
Ge	$H_2GeO_3 + 4H^+ + 2e = Ge^{2+} + 3H_2O$	-0,363	Li	$Li^+ + e = Li$	-3,045
	$GeO_2 + 4H^+ + 4e = Ge + 2H_2O$	-0,15	Mg	$Mg(OH)_2 + 2e = Mg + 2OH^-$	-2,69
	$H_2GeO_3 + 4H^+ + 4e = Ge + 3H_2O$	-0,13		$Mg^{2+} + 2e = Mg$	-2,363
	$Ge^{2+} + 2e = Ge$	0,000		$Mg(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Mg + 2H_2O$	-1,862
H	$2H_2O + 2e = H_2 + 2OH^-$	-0,828	Mn	$MnCO_3 + 2e = Mn + CO_3^{2-}$	-1,48
	$2H^+ + 2e = H_2$	0,0000		$Mn^{2+} + 2e = Mn$	-1,18
	$H_2O_2 + 2H^+ + 2e = 2H_2O$	1,776		$Mn(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Mn + 2H_2O$	-0,727
Hf	$Hf^{4+} + 4e = Hf$	-1,70		$MnO_4^- + e = MnO_4^{2-}$	0,564
	$HfO_2 + 4H^+ + 4e = Hf + 2H_2O$	-1,57		$MnO_4^- + 2H_2O + 3e = MnO_2 + 4OH^-$	0,60
Hg	$HgS + 2e = Hg + S^{2-}$	-0,69		$MnO_2 + 4H^+ + 2e = Mn^{2+} + 2H_2O$	1,228
	$Hg(CN)_4^{2-} + 2e = Hg + 4CN^-$	-0,37		$Mn_2O_3 + 6H^+ + 2e = 2Mn^{2+} + 3H_2O$	1,443
	$Hg_2I_2 + 2e = 2Hg + 2I^-$	-0,041		$MnO_4^- + 8H^+ + 5e = Mn^{2+} + 4H_2O$	1,507
	$HgI_4^{2-} + 2e = Hg + 4I^-$	-0,04		$Mn^{3+} + e = Mn^{2+}$ (8M H_2SO_4)	1,509
	HgO(красная) $+ H_2O + 2e = Hg + 2OH^-$	0,098		$MnO_4^- + 4H^+ + 3e = MnO_2 + 2H_2O$	1,692
	$Hg_2Br_2 + 2e = 2Hg + 2Br^-$	0,140		$MnO_4^{2-} + 4H^+ + 2e = MnO_2 + 2H_2O$	2,257
Mo	$H_2MoO_4 + 2H^+ + 2e = MoO_2 + 2H_2O$	-1,091	Nd	$Nd^{3+} + 3e = Nd$	-2,431

	$MoO_4^{2-} + 4H_2O + 6e = Mo + 8OH^-$	-1,05	Ni	γ-NiS + 2e = Ni + S^{2-}	-1,04
	$Mo^{3+} + 3e = Mo$	-0,200		α-NiS + 2e = Ni + S^{2-}	-0,83
	$MoO_2 + 4H^+ + 4e = Mo + 2H_2O$	-0,072		$Ni(OH)_2 + 2e = Ni + 2OH^-$	-0,72
	$MoO_4^{2-} + 8H^+ + 6e = Mo + 4H_2O$	0,154		$Ni(NH_3)_6^{2+} + 2e = Ni + 6NH_3$	-0,49
	$MoO_3 + 2H^+ + 2e = MoO_2 + H_2O$	0,320		$NiCO_3 + 2e = Ni + CO_3^{2-}$	-0,45
	$MoO_4^{2-} + 4H^+ + 2e = MoO_2 + 2H_2O$	0,606		$Ni^{2+} + 2e = Ni$	-0,25
N	$3N_2 + 2\bar{e} = 2N_3^-$	-3,4		$Ni(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Ni + 2H_2O$	0,110
	$3N_2 + 2H^+ + 2\bar{e} = 2HN_3$	-3,1		$NiO + 2H^+ + 2e = Ni + H_2O$	0,116
	$N_2 + 4H_2O + 2\bar{e} = 2NH_2OH + 2OH^-$	-3,04		$NiO_2 + 4H^+ + 2e = Ni^{2+} + 2H_2O$	1,68
	$N_2 + 4H_2O + 4\bar{e} = N_2H_4 + 4OH^-$	-1,16	O	$O_2 + 2H_2O + 4e = 4OH^-$	0,401
	$N_2 + 8H_2O + 6\bar{e} = 2NH_4OH + 6OH^-$	-0,74		$O_2 + 2H^+ + 2e = H_2O_2$	0,682
	$NO_2^- + H_2O + \bar{e} = NO + 2OH^-$	-0,46		$H_2O_2 + 2e = 3OH^-$	0,88
	$NO_2^- + 6H_2O + 6\bar{e} = NH_4OH + 7OH^-$	-0,15		$O_2 + 4H^+ + 4e = 2H_2O$	1,229
	$NO_3^- + 2H_2O + 3\bar{e} = NO + 4OH^-$	-0,14		$O_3 + H_2O + 3e = O_2 + 2OH^-$	1,24
	$NO_3^- + 7H_2O + 8\bar{e} = NH_4OH + 9OH^-$	-0,12		$O_3 + 6H^+ + 6e = 3H_2O$	1,511
	$NO_3^- + H_2O + 2\bar{e} = NO_2^- + 2OH^-$	0,01		$H_2O_2 + 2H^+ + 2e = 2H_2O$	1,776
	$N_2 + 6H^+ + 6\bar{e} = 2NH_3$	0,057		$O_3 + 2H^+ + 2e = O_2 + H_2O$	2,07
	$N_2H_4 + 4H_2O + 2\bar{e} = 2NH_4OH + 2OH^-$	0,1	Os	$OsO_2 + 2H_2O + 4e = Os + 4OH^-$	-0,15
	$N_2 + 8H^+ + 6\bar{e} = 2NH_4^+$	0,275		$OsCl_6^{3-} + e = Os^{2+} + 6Cl^-$	0,4
	$2NO_2^- + 4H_2O + 6\bar{e} = N_2 + 8OH^-$	0,41		$OsO_4 + 8H^+ + 8e = Os + 4H_2O$	0,85
	$NH_2OH + 2H_2O + 2\bar{e} = NH_4OH^- + 2OH^-$	0,42		$OsCl_6^{2-} + e = OsCl_6^{3-}$	0,85
	$2NO_2 + 4H_2O + 8e = N_2 + 8OH^-$	0,53		$Os^{2+} + 2e = Os$	0,85
	$NO_3^- + 2H^+ + e = NO_2 + H_2O$	0,78		$OsO_4 + 4H^+ + 4e = OsO_2 + 2H_2O$	0,96
	$NO_3^- + 2H^+ + e = NO_2 + H_2O$	0,80	P	$H_2PO_2^- + e = P + 2OH^-$	-2,05
	$2NO + 2H_2O + 4e = N_2 + 4OH^-$	0,85		$HPO_3^{2-} + 2H_2O + 2e = H_2PO_2^- + 3OH^-$	-1,57
	$HNO_2 + 7H^+ + 6e = NH_4^+ + 2H_2O$	0,864		$PO_4^{3-} + 2H_2O + 2e = HPO_3^{2-} + 3OH^-$	-1,12
	$NO_3^- + 10H^+ + 8e = NH_4^+ + 3H_2O$	0,87		$2H_3PO_4 + 2H^+ + 2e = H_4P_2O_6 + 2H_2O$	-0,94
	$2NO_2 + 2e = 2NO_2^-$	0,88		$P + 3H_2O + 3e = PH_3 + 3OH^-$	-0,89
	$N_2O + H_2O + 2e = N_2 + 2OH^-$	0,94		$H_3PO_2 + H^+ + e = P + 2H_2O$	-0,51
	$NO_3^- + 3H^+ + 2e = HNO_2 + 2H_2O$	0,94		$H_3PO_3 + 3H^+ + 3e = P(бел) + 3H_2O$	-0,502
	$NO_3^- + 4H^+ + 3e = NO + 2H_2O$	0,957		$H_3PO_3 + 3H^+ + 2e = H_3PO_2 + H_2O$	-0,50
	$NO_3^- + 4H^+ + 3e = NO + 2H_2O$	0,96		$H_3PO_3 + 3H^+ + 3e = P(кр) + 3H_2O$	-0,454
	$HNO_2 + H^+ + e = NO + H_2O$	1,00		$H_3PO_4 + 5H^+ + 5e = P(бел) + 4H_2O$	-0,411
	$NO_2 + 2H^+ + 2e = NO + H_2O$	1,03		$H_3PO_4 + 4H^+ + 4e = H_3PO_2 + 2H_2O$	-0,39
	$NO_2 + H^+ + e = HNO_2$	1,09		$H_3PO_4 + 5H^+ + 5e = P(кр) + 4H_2O$	-0,383
	$2NO_3^- + 10H^+ + 8e = N_2O + 5H_2O$	1,116		$H_3PO_4 + 2H^+ + 2e = H_3PO_3 + H_2O$	-0,276
	$2NO_3^- + 12H^+ + 10e = N_2 + 6H_2O$	1,246		$H_3PO_3 + 2H^+ + 2e = H_3PO_2 + H_2O$	-0,50
	$2HNO_2 + 4H^+ + 4e = N_2O + 3H_2O$	1,297		$P + 3H^+ + 3e = PH_3$	0,06
	$2NO_2 + 8H^+ + 8e = N_2 + 4H_2O$	1,36		$H_4P_2O_6 + 2H^+ + 2e = 2H_3PO_3$	0,38
	$2HNO_2 + 6H^+ + 6e = N_2 + 4H_2O$	1,45	Pb	$PbS + 2e = Pb + S^{2-}$	-0,93
	$2NO + 4H^+ + 4e = N_2 + 2H_2O$	1,678		$PbO + H_2O + 2e = Pb + 2OH^-$	-0,58
	$N_2O + 2H^+ + 2e = N_2 + H_2O$	1,766		$PbCO_3 + 2e = Pb + CO_3^{2-}$	-0,506
Na	$Na^+ + e = Na$	-2,714		$PbI_2 + 2e = Pb + 2I^-$	0,365
Pb	$PbSO_4 + 2e = Pb + SO_4^{2-}$	-0,3563	S	$S + 2H^+ + 2e = H_2S$	0,141

	$PbF_2 + 2e = Pb + 2F^-$	-0,350		$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e = H_2SO_3 + H_2O$	0,17
	$PbBr_2 + 2e = Pb + 2Br^-$	-0,280		$SO_3^{2-} + 6H^+ + 6e = S^{2-} + 3H_2O$	0,231
	$PbCl_2 + 2e = Pb + 2Cl^-$	-0,268		$2SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e = S_2O_3^{2-} + 5H_2O$	0,29
	$Pb^{2+} + 2e = Pb$	-0,126		$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e = H_2S + 4H_2O$	0,311
	$PbO_3^{2-} + H_2O + 2e = PbO_2^{2-} + 2OH^-$	0,2		$SO_4^{2-} + 8H^+ + 6e = S + 4H_2O$	0,357
	$PbO + 2H^+ + 2e = Pb + H_2O$	0,248		$2H_2SO_3 + 2H^+ + 4e = S_2O_3^{2-} + 3H_2O$	0,40
	$Pb(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Pb + H_2O$	0,277		$H_2SO_3 + 4H^+ + 4e = S + 3H_2O$	0,449
	$PbO_2 + H_2O + 2e = PbO + 2OH^-$	0,28		$S_2O_3^{2-} + 6H^+ + 4e = 2S + 3H_2O$	0,5
	$Pb_3O_4 + 2H^+ + 2e = 3PbO + H_2O$	0,972		$2SO_3^{2-} + 6H^+ + 4e = S_2O_3^{2-} + 3H_2O$	0,705
	$PbO_2 + 4H^+ + 2e = Pb^{2+} + 2H_2O$	1,449-1,455		$S_2O_8^{2-} + 2e = 2SO_4^{2-}$	2,01
	$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e = PbSO_4 + 2H_2O$	1,685	Sb	$SbO_2^- + 2H_2O + 3e = Sb + 4OH^-$	-0,675
	$Pb^{4+} + 2e = Pb^{2+}$	1,694		$Sb + 3H^+ + 3e = SbH_3$	-0,51
Pd	$Pd(OH)_2 + 2e = Pd + 2OH^-$	0,07		$SbO_3^- + H_2O + 2e = SbO_2^- + 2OH^-$	-0,43
	$PdI_6^{2-} + 2e = PdI_4^{2-} + 2I^-$	0,623		$Sb_2O_3 + 6H^+ + 6e = 2Sb + 3H_2O$	0,152
	$PdCl_4^{2-} + 2e = Pd + 4Cl^-$	0,623		$SbO^+ + 2H^+ + 3e = Sb + H_2O$	0,212
	$PdO + 2H^+ + 2e = Pd + H_2O$	0,896		$SbO_3^- + 2H^+ + 3e = SbO_2^- + H_2O$	0,353
	$PdCl_6^{2-} + 4e = Pd + 6Cl^-$	0,96		$SbO_2^- + 4H^+ + 3e = Sb + 2H_2O$	0,446
	$Pd^{2+} + 2e = Pd$	0,987		$Sb_2O_5 + 6H^+ + 4e = 2SbO^+ + 3H_2O$	0,581
	$PdBr_6^{2-} + 2e = PdBr_4^{2-} + 2Br^-$	0,993		$Sb_2O_5 + 4H^+ + 4e = Sb_2O_3 + 2H_2O$	0,671
	$PdO_2 + 2H^+ + 2e = PdO + H_2O$	1,283	Sc	$Sc^{3+} + 3e = Sc$	-2,077
	$PdCl_6^{2-} + 2e = PdCl_4^{2-} + 2Cl^-$	1,288	Se	$Se + 2e = Se^{2-}$	-0,92
Pt	$PtS + 2e = Pt + S^{2-}$	-0,95		$Se + 2H^+ + 2e = H_2Se$	-0,40
	$PtS_2 + 2e = PtS + S^{2-}$	-0,64		$SeO_3^{2-} + 3H_2O + 4e = Se + 6OH^-$	-0,366
	$Pt(OH)_2 + 2e = Pt + 2OH^-$	0,15		$SeO_4^{2-} + H_2O + 2e = SeO_3^{2-} + 2OH^-$	0,05
	$PtI_6^{2-} + 2e = PtI_4^{2-} + 2I^-$	0,393		$H_2SeO_3 + 4H^+ + 4e = Se + 3H_2O$	0,741
	$PtBr_4^{2-} + 2e = Pt + 4Br^-$	0,58		$SeO_4^{2-} + 4H^+ + 2e = H_2SeO_3 + H_2O$	1,15
	$PtBr_6^{2-} + 2e = PtBr_4^{2-} + 2Br^-$	0,59	Si	$SiO_3^{2-} + 3H_2O + 4e = Si + 6OH^-$	-1,7
	$PtCl_6^{2-} + 2e = PtCl_4^{2-} + 2Cl^-$	0,720		$SiF_6^{2-} + 4e = Si + 6F^-$	-1,2
	$PtCl_4^{2-} + 2e = Pt + 4Cl^-$	0,73		$SiO_3^{2-} + 6H^+ + 4e = Si + 3H_2O$	-0,455
	$Pt(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Pt + 2H_2O$	0,980		$Si + 4H^+ + 4e = SiH_4$	0,102
	$PtO_2 + 2H^+ + 2e = Pt(OH)_2$	1,045	Sn	$SnS + 2e = Sn + S^{2-}$	-0,94
	$Pt^{2+} + 2e = Pt$	1,188		$Sn(OH)_6^{2-} + 2e = HSnO_2^- + H_2O + 3OH^-$	-0,93
Ra	$Ra^{2+} + 2e = Ra$	-2,925		$HSnO_2^- + H_2O + 2e = Sn + 3OH^-$	-0,91
Rb	$Rb^+ + e = Rb$	-2,925		$SnF_6^{2-} + 4e = Sn + 6F^-$	-0,25
	$SO_4^{2-} + H_2O + 2e = SO_3^{2-} + 2OH^-$	-0,93		$Sn^{2+} + 2e = Sn$	-0,136
	$2SO_4^{2-} + 5H_2O + 8e = S_2O_3^{2-} + 10OH^-$	-0,76		$SnO_2 + 2H^+ + 2e = SnO + H_2O$	-0,108
	$SO_3^{2-} + 3H_2O + 4e = S + 6OH^-$	-0,66		$SnO_2 + 4H^+ + 4e = Sn + 2H_2O$	-0,106
	$2SO_3^{2-} + 3H_2O + 4e = S_2O_3^{2-} + 6OH^-$	-0,58		$SnO + 2H^+ + 2e = Sn + H_2O$	-0,104
	$S_2^{2-} + 2e = 2S^{2-}$	-0,524		$Sn(OH)_2 + 2H^+ + 2e = Sn + 2H_2O$	-0,091
S	$S + 2e = S^{2-}$	-0,48		$SnCl_6^{2-} + 2e = SnCl_4^{2+} + 2Cl^-$	0,14
	$2S + 2e = S_2^{2-}$	-0,476		$Sn^{4+} + 2e = Sn^{2+}$	0,151
	$S + H^+ + 2e = HS^-$	-0,065	Sr	$Sr^{2+} + 2e = Sr$	-2,888
	$S_2O_3^{2-} + 6H^+ + 8e = 2S^{2-} + 3H_2O$	-0,006	Te	$Te + 2e = Te^{2-}$	-1,14
	$S_4O_6^{2-} + 2e = 2S_2O_3^{2-}$	0,08		$Te + 2H^+ + 2e = H_2Te$	-0,72
	$SO_4^{2-} + 8H^+ + 8e = S^{2-} + 4H_2O$	0,149		$TeO_3^{2-} + 2H_2O + 4e = Te + 6OH^-$	-0,57
	$TeO_2 + 4H^+ + 4e = Te + 2H_2O$	0,529		$V^{2+} + 2e = V$	-1,175

	$TeO_4^{2-} + 2H^+ + 2e = TeO_3^{2-} + H_2O$	0,892		$V^{3+} + e = V^{2+}$	-0,255
	$H_6TeO_6 + 2H^+ + 2e = TeO_2 + 4H_2O$	1,02		$VO_2^+ + 4H^+ + 5e = V + 2H_2O$	-0,25
Ti	$Ti^{2+} + 2e = Ti$	-1,63		$VO_2^{2+} + e = VO^+$	-0,044
	$TiO + 2H^+ + 2e = Ti + H_2O$	-1,306		$VO_2^+ + 4H^+ + 3e = V^{2+} + 2H_2O$	0,360
	$TiF_6^{2-} + 4e = Ti + 6F^-$	-1,19	V	$V_2O_5 + 6H^+ + 2e = 2VO^{2+} + 3H_2O$	0,958
	$TiO_2 + 4H^+ + 4e = Ti + 2H_2O$	-0,86		$VO_2^+ + 2H^+ + e = VO^{2+} + H_2O$	1,004
	TiO_2(рутил) $+ H^+ + 4e = Ti^{3+} + 2H_2O$	-0,666		$VO_4^{3-} + 6H^+ + 2e = VO^+ + 3H_2O$	1,256
	TiO_2(рутил) $+ 2H^+ + 4e = Ti^{2+} + 2H_2O$	-0,502		$H_2VO_4^- + 4H^+ + e = VO^{2+} + 3H_2O$	1,314
	$Ti^{3+} + e = Ti^{2+}$	-0,368		$WO_4^{2-} + 4H_2O + 6e = W + 8OH^-$	-1,05
	$Ti^{4+} + e = Ti^{3+}$ (5M H_3PO_4)	-0,15	W	$WO_2 + 4H^+ + 4e = W + 2H_2O$	-0,119
	$TiO^{2+} + 2H^+ + 2e = Ti^{2+} + H_2O$	-0,135		$WO_3 + 6H^+ + 6e = W + 3H_2O$	-0,09
	$TiO^{2+} + 2H^+ + e = Ti^{3+} + H_2O$	0,10		$W_2O_5 + 2H^+ + 2e = 2WO_2 + H_2O$	-0,031
Tl	$Tl_2S + 2e = 2Tl + S^{2-}$	-0,93		$2WO_3 + 2H^+ + 2e = W_2O_5 + H_2O$	-0,029
	$TlI + e = Tl + I^-$	-0,753		$WO_4^{2-} + 8H^+ + 6e = W + 4H_2O$	0,049
	$TlBr + e = Tl + Br^-$	-0,658		$2WO_4^{2-} + 6H^+ + 2e = W_2O_5 + 3H_2O$	0,801
	$TlCl + e = Tl + Cl^-$	-0,557		$ZnS + 2e = Zn + S^{2-}$	-1,405
	$TlOH + e = Tl + OH^-$	-0,344	Zn	$Zn(CN)_4^{2-} + 2e = Zn + 4CN^-$	-1,26
	$Tl^+ + e = Tl$	-0,3363		$Zn(OH)_2 + 2e = Zn + 2OH^-$	-1,245
	$Tl(OH)_3 + 2e = TlOH + 2OH^-$	-0,05		$Zn(OH)_4^{2-} + 2e = Zn + 4OH^-$	-1,22
	$Tl_2O_3 + 3H_2O + 4e = 2Tl^+ + 6OH^-$	0,02		$ZnO_2^{2-} + 2H_2O + 2e = Zn + 4OH^-$	-1,216
	$TlOH + H^+ + e = Tl + H_2O$	0,778		$ZnCO_3 + 2e = Zn + CO_3^{2-}$	-1,06
	$Tl^{3+} + 2e = Tl^+$	1,252		$Zn(NH_3)_4^{2+} + 2e = Zn + 4NH_3$	-1,04
U	$UO_2 + 2H_2O + 4e = U + 4OH^-$	-2,39		$Zn^{2+} + 2e = Zn$	-0,763
	$U^{3+} + 3e = U$	-1,798		$ZnO_2^{2-} + 4H^+ + 2e = Zn + 2H_2O$	0,441
	$U^{4+} + e = U^{3+}$	-0,607		$ZrO^{2+} + 2H^+ + 4e = Zr + H_2O$	-1,570
	$UO_2^{2+} = UO_2^+$	0,05	Zr	$ZrO_2 + 4H^+ + 4e = Zr + 2H_2O$	-1,553
	$UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e = U^{4+} + 2H_2O$	0,334		$Zr^{4+} + 4e = Zr$	-1,539
	$UO_2^+ + 4H^+ + e = U^{4+} + 2H_2O$	0,62			

Список литературы

Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Общая и неорганическая химия.: учебник 5-е изд. Изд-во Книжный дом «Либроком» 2015. 592 с.

Глинка Н.Л. Общая химия.: учебник / под ред. В.А. Попкова, А.В. Бабкова. 18-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Юрайт»; ИД «Юрайт», 2011. 886 с.

Глинка Н.Л. Общая химия. Задачи и упражнения: учебно-практическое пособие. Изд-во «Юрайт»; ИД «Юрайт», 2014. 240 с.

Хомченко И.Г. Общая химия. Сборник задач и упражнений. Изд-во «Новая волна», 2011. 256 с.

Учебное издание

Наталья Анатольевна Зайцева, Ирина Альбертовна Низова

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ХИМИЯ»

ЧАСТЬ II

Окислительно-восстановительные реакции

Учебное пособие

Редактор изд-ва

Компьютерная верстка Н.*А.Зайцевой*

Подписано в печать .Бумага писчая. Формат 60×84 1/16.
Печать на ризографе. Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. Уч.-изд. л. 1,0 .Тираж 100 .Заказ

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу _____ С.А. Упоров
14.10.2020

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАДАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки
квалификация выпускника: **специалист**

Автор: Дружинин А.В., доцент, канд. техн. наук

Екатеринбург
2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1 10
Создание таблиц базы данных «Реализация товаров» 10
Создание файла базы данных Access 10
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2 18
Работа с простыми запросами 18
Конструирование запросов на выборку с условием отбора 18
Вычисляемые поля в запросах 21
Параметры в запросах 23
Групповые операции в запросах 26
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3 29
Работа с многотабличными запросами 29
Запросы на изменение 33
Задание для самостоятельной работы 36
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4 37
Работа с формами 37
Условное форматирование элементов управления 38
Создание разделенной формы 40
Многотабличные формы 41
Создание многотабличной формы с помощью мастера 42
Одиночная многотабличная форма 45
Задание для самостоятельной работы 49
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5 49
Работа с отчетами 49
Задание для самостоятельной работы 51
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6 52
Создание главной кнопочной формы 52
с использованием макросов 52
Создание управляющих кнопок на экране 55
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ 60
Указания к выполнению работы 60
Варианты заданий 60
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 71

ВВЕДЕНИЕ

Система управления базами данных

СУБД (система управления базами данных) является универсальным программным инструментом создания и обслуживания баз данных и приложений пользователя в самых разных предметных областях. СУБД обеспечивает создание, многоаспектный доступ к данным и использование одних и тех же данных различными задачами и приложениями пользователей.

СУБД поддерживаются различные модели данных. *Модель данных* – это метод (принцип) логической организации данных, используемый СУБД. Наиболее известными являются иерархическая, сетевая и реляционная модели.

В СУБД для персональных компьютеров (настольных СУБД) поддерживается преимущественно *реляционная модель*, которую отличает простота и единообразие представления данных простейшими *двумерными таблицами.*

Основной логической структурной единицей манипулирования данными является *строка* таблицы – *запись*. *Структура записи* определяется составом входящих в неё *полей*. Совокупность полей записи соответствует логически связанным реквизитам, характеризующим некоторую сущность предметной области.

Типовыми функциями СУБД по манипулированию данными являются выборка, добавление, удаление, изменение данных.

- *Выборка данных* – выборка записей из одной или нескольких взаимосвязанных таблиц в соответствии с заданными условиями.
- *Добавление* и *удаление* данных – добавление новых записей в таблицы и удаление существующих.
- *Изменение данных* – изменение значений данных в полях существующих записей.

Данные из одной или нескольких взаимосвязанных таблиц могут подвергаться обработке. К операциям *обработки* относятся, например, расчеты в пределах каждой записи, группировка записей в соответствии с *заданным* критерием группировки и обработка записей выделенных групп с помощью статистических функций, таких как суммирование, определение максимального, подсчет числа записей в группе и т. п.

СУБД Access включает разнообразные и многочисленные относительно автономные инструментальные средства, ориентированные на создание объектов базы данных и приложений пользователя.

- *Разнообразие мастера* в режиме ведения диалога с пользователем позволяют создавать объекты и выполнять разнообразные функции по реорганизации объектов базы данных и приложений пользователя.
- *Средства программирования* СУБД включают язык запросов *SQL*, язык макрокоманд и язык объектно-ориентированного программирования для приложений *Microsoft Visual Basic for Applications (VBA).*
- *Средства графического конструирования* позволяют создавать объекты базы данных и объекты приложения с помощью многочисленных графических элементов, не прибегая непосредственно к программированию. Среди многочисленных средств графического конструирования и диалоговых средств Access следует выделить средства для создания:
- таблиц и схем баз данных, отображающих их связи;
- запросов выборки, отбирающих и объединяющих данные нескольких таблиц в виртуальную таблицу, которая может использоваться во многих задачах приложения;
- запросов на изменение данных базы;
- экранных форм, предназначенных для ввода, просмотра и обработки данных в диалоговом режиме;
- отчетов, предназначенных для ввода, просмотра и вывода на печать данных из базы и результатов их обработки в удобном для пользователя виде.

Реляционная база данных

База данных является организованной на машинном носителе совокупностью взаимосвязанных данных и содержит сведения о различных сущностях одной предметной области: реальных объектах, процессах, событиях или явлениях.

Реляционная база данных представляет собой множество взаимосвязанных двумерных таблиц – *реляционных таблиц*, называемых также *отношениями*, в каждой из которых содержаться сведения об одной сущности автоматизируемой предметной области.

Логическую структуру реляционной базы данных образует совокупность реляционных таблиц, между которыми установлены логические связи.

В таблицах базы должны сохраняться все данные, необходимые для решения задач предметной области, причем каждый элемент данных должен храниться в базе только в одном экземпляре. Для создания таблиц,

соответствующих реляционной модели данных, используется процесс, называемый нормализацией данных. *Нормализация* – это удаление из таблиц повторяющихся данных путем их переноса в новые таблицы, записи которых не содержат повторяющихся значений.

Структура реляционной таблицы определяется составом полей. Каждое *поле* отражает определенную характеристику сущности. Для поля указывается *тип* и *размер* элементарного данного, размещаемого в нем, и ряд др. свойств. Содержимое поля отображается в столбце таблицы. Столбец таблицы содержит данные одного типа.

Содержание таблицы заключено в её строках, однотипных по структуре, каждая строка таблицы содержит данные о конкретном экземпляре сущности и называется *записью*.

Для однозначного определения (*идентификации)* каждой записи таблица должна иметь *уникальный (первичный) ключ.* По значению ключа таблицы отыскивается единственная запись в таблице. Ключ может состоять из одного или нескольких полей таблицы. Значение уникального ключа не может повторяться в нескольких записях.

Логические связи между таблицами дают возможность объединять данные из разных таблиц. Связь каждой пары таблиц задается одинаковыми полями в них – *ключом связи*. Таким образом, обеспечивается рациональное хранение недублированных данных и их объединение в соответствии с требованиями решаемых задач.

В нормализованной реляционной базе данных связь двух таблиц характеризуется отношениями записей типа «один-к-одному» (1:1) или «один-ко-многим» (1:M). Отношение 1:1 предполагает, что каждой записи одной таблицы соответствует одна запись другой таблицы. Отношение типа 1:M предполагает, что каждой записи первой таблицы соответствует много записей во второй, но каждой записи второй таблицы соответствует только одна запись в первой.

Для двух таблиц, находящихся в отношении типа 1:M, связь устанавливается по уникальному ключу таблицы, представляющей в отношении сторону «один», – *главной таблицы* в связи. Во второй таблице, представляющей в отношении сторону «многие» и называемой *подчиненной,* этот ключ связи может быть либо частью уникального ключа, либо не входить в состав ключа. В подчиненной таблице ключ связи называется ещё *внешним ключом*.

Схема данных

В СУБД Access процесс создания реляционной базы данных включает создание *схемы данных*. Схема данных наглядно отображает логическую структуру базы данных: таблицы и связи между ними, а также обеспечивает использование установленных в ней связей при обработке данных.

Для нормализованной базы данных, основанной на одно-многозначных и однозначных отношениях между таблицами, в схеме данных для связей таких таблиц по первичному ключу или уникальному индексу главной таблицы могут устанавливаться параметры *связной целостности*.

При поддержании целостности взаимосвязанных данных не допускается наличия записи в подчиненной таблице, если в главной таблице отсутствует связанная с ней запись. Соответственно при первоначальной загрузке базы данных, а также корректировке, добавлении и удалении записей система допускает выполнение операции только в том случае, если она не приводит к нарушению целостности. Связи, определенные в схеме данных, автоматически используются для объединения таблиц при разработке многотабличных форм, запросов, отчетов, существенно упрощая процесс их конструирования. В схеме связи могут устанавливаться для любой пары таблиц, имеющих одинаковое поле, позволяющее объединять эти таблицы. **Объекты Access**

База данных Access включает следующие сохраняемые в одном accdbфайле объекты:

- *таблицы, запросы, схемы данных,* непосредственно имеющие отношение к базе данных;
- *формы, отчеты, макросы* и *модули*, называемые *объектами приложения.*

Формы и отчеты предназначены для типовых процессов обработки данных: просмотра, обновления, поиска по заданным критериям, получения отчетов. Эти объекты приложений конструируются из графических элементов, называемых *элементами управления*. Основные элементы управления служат для отображения полей таблиц, являющихся источниками данных объекта.

Для автоматизации доступа к объектам и их взаимодействия используется программный код. Только с помощью программного кода получается полноценное приложение пользователя, функции которого доступны через меню, панели инструментов и формы. Для создания программного кода служат модули на языке *VBA* и макросы.

Каждый объект и элемент управления имеет свои свойства, определяя которые можно настраивать их. С каждым объектом и элементом управления связывается набор событий, которые могут обрабатываться макросами или

процедурами обработки событий на VBA, входящими в состав модулей форм, отчетов.

Объекты представлены в области навигации окна базы данных Access. Все операции по работе с объектами и приложениями начинаются в этом окне.

- *Таблицы* создаются пользователем для хранения данных об одной сущности – одном информационном объекте модели данных предметной области. Таблица состоит из полей (столбцов) и записей (строк). Каждое поле содержит одну характеристику информационного объекта предметной области. В записи собраны сведения об одном экземпляре информационного объекта. База данных Access может включать до 32768 объектов (в том числе формы, отчеты и т. д.). Одновременно может открываться до 2048 таблиц.
- *Запросы*. Запросы на выборку служат для выборки нужных данных из одной или нескольких связанных таблиц. Результатом выполнения запроса является виртуальная таблица. В запросе можно указать, какие поля исходных таблиц следует включить в запись таблицы запроса и как отобрать нужные записи. Таблица запроса может быть использована с другими таблицами базы при обработке данных. Запросы на изменение позволяют обновлять, удалять или добавлять данные в таблицы, а также создавать новые таблицы на основе уже существующих.
- *Схема данных* определяет, с помощью каких полей таблицы связываются между собой, как будет выполняться объединение данных этих таблиц, нужно ли проверять связную целостность при добавлении и удалении записей, изменение ключей таблиц. Схемы данных в области навигации в окне базы данных отображаются только в проектах Access, работающих с базами данных сервера. Для отображения схемы данных в базах данных Access используется команда **Схема данных**, размещенная на вкладке ленты **Работа с базами данных** в группе **Отношения**.
- *Формы* являются основным средством создания диалогового интерфейса приложения пользователя. Форма может создаваться для работы с электронными документами, сохраняемыми в таблицах базы данных. Вид таких документов может соответствовать привычному для пользователя бумажному документу. Форма используется для разработки интерфейса по управлению приложением. Включаемые в форму процедуры обработки событий позволяют управлять процессом обработки данных в приложении. Такие процедуры хранятся в модуле формы. В формы могут вставляться рисунки, диаграммы, звуковые фрагменты, видео. Возможна разработка форм с набором вкладок, с

каждой из которых связано выполнение той или иной функции приложения.

- *Отчеты* предназначены для формирования на основе данных базы выходных документов любых форматов, содержащих результаты решения задач пользователя, и вывода их на печать. Как и формы, отчеты могут включать процедуры обработки событий. Использование графических объектов позволяет дополнять данные отчета иллюстрациями. Отчеты обеспечивают возможность анализа данных при использовании фильтрации, агрегирования и представления данных источника в различных разрезах. *Макросы* являются программами, состоящими из последовательностей макрокоманд, которые выполняются по вызову или при наступлении некоторого события в объекте приложения или его элементе управления. Макросы данных выполняются при наступлении некоторого события в исходных таблицах. Макросы позволяют автоматизировать некоторые действия в приложении пользователя. Создание макросов осуществляется в диалоговом режиме путем выбора нужных макрокоманд и задания параметров, используемых ими при выполнении.
- *Модули* содержат процедуры на языке *Visual Basic for Applications*. Могут создаваться процедуры-программы, процедуры-функции, которые разрабатываются пользователем, и процедуры для обработки событий.

Интерфейс пользователя Access

Для Access 2013 разработан интерфейс пользователя, упрощающий доступ к многочисленным функциональным возможностям в процессе создания и работы с объектами базы данных и приложений пользователя.

Основу этого интерфейса составляют *ленты* и *область навигации.* Собранные на одной ленте команды четко соответствуют задачам, выполняемым в Access, что позволяет легко находить нужную команду.

Основные элементы интерфейса пользователя в Access 2013:

- *страницы*, предназначенные для управления файлами баз данных. Стартовая страница отображается при запуске Access и позволяет открыть существующие файлы баз данных или создать новые. В процессе работы доступны страницы, открываемые при щелчке на цветном значке **Файл**.

Они содержат команды для сохранения, сжатия и восстановления базы данных, определения параметров и ряд др.;

- *лента* – широкая полоса, расположенная в верхней части окна Access. Она содержит стандартные вкладки с группами наиболее часто используемых команд, контекстные вкладки, которые появляются только тогда, когда их использование допустимо, и *панель быстрого доступа* – небольшую панель инструментов, на которую можно добавить нужные команды. Лента является основой интерфейса пользователя и обеспечивает быстрый доступ к набору команд, применимых к выполняемым в базе данных в текущий момент работам;
- *коллекция (галерея)* – элемент интерфейса, который не просто отображает команды, а показывает набор результатов выполнения этих команд с отображением внешнего вида вариантов выбора;
- *диалоговые окна* могут выводиться при выполнении команд для уточнения операции и передачи параметров. В некоторых группах вкладок ленты имеются кнопки вызова диалоговых окон;
- *контекстное меню* вызывается щелчком правой кнопкой мыши на элементе объекта. Содержит команды, зависящие от контекста – элемента объекта, с которым работает пользователь, или выполняемой задачи; *панель быстрого доступа* – единственная панель инструментов, предусмотренная в интерфейсе. Она обеспечивает доступ одним нажатием кнопки к наиболее часто используемым командам. Это панель настраивается в соответствии с предпочтениями пользователя;
- *область навигации* расположена в левой части окна. В ней отображаются объединенные в группы объекты базы данных;
- *вкладки документов* – таблицы, запросы, формы, отчеты и макросы отображаются на вкладках в рабочем пространстве окна Access – окне документов;
- *строка состояния* – полоса в нижней части окна программы, в которой отображаются сведения о состоянии объекта и располагаются кнопки, позволяющие изменить режим его представления;
- *мини-панель инструментов* – прозрачный элемент, подключенный к объекту, который появляется над выбранным текстом и позволяет легко отформатировать его;
- *панель сообщений* – это единственное средство вывода всех предупреждений системы безопасности. Отображается, когда в открываемой базе данных имеется любое потенциально опасное выполняемое содержимое.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1
Создание таблиц базы данных «Реализация товаров»

Создать базу данных для учета реализации товаров со складов. Организовать хранение информации в создаваемой базе данных с помощью четырех таблиц: «Товары», «Фирмы», «Склады» и «Продажи».

Этапы проектирования базы данных:

1. Исследование предметной области и формулировка основных допущений (накладываемых условий). На этом этапе составляется список всех форм и отчетов, которые могут быть затребованы пользователями вашей БД.
2. Анализ данных. Составить перечень всех элементов данных, входящих в формы и отчеты, и сгруппировать их в таблицы БД.
3. Установить, какие взаимосвязи существуют между элементами данных. Определить первичные и вторичные (внешние) ключи отношений. Организовать поля данных в таблицах.

Создать базу данных «Реализация товаров», при условии, что на одном складе может храниться только один вид товара.

Создание файла базы данных Access

Для создания файла новой локальной базы данных щелкните в области создания базы данных стартового окна Access на элементе **Пустая база данных** (рис. 1.1). В открывшемся окне введите имя файла в поле **Имя файла** – например, ***Реализация товаров***.

Щелчком по кнопке **Создать,** завершите процесс создания пустого файла новой базы данных. В результате по умолчанию откроется окно созданной базы данных с пустой таблицей с именем **Таблица1** в режиме таблицы (рис. 1.2).

Рис. 1.1. Определение имени и местоположения файла новой базы данных

Так как создание таблиц будет происходить при помощи конструктора таблиц, поэтому закройте таблицу при помощи щелчка по значку «**Закрыть**».

Рис. 1.2. **Таблица1** в режиме таблицы

Задание 1. Создание таблицы базы данных «Реализация товаров»

Рассмотрим последовательность действий при создании таблиц. Для этого начнем создание таблицы «Товар» с определения её структуры в режиме конструктора таблиц. На вкладке ленты **Создание** в группе **Таблицы** выполним команду **Конструктор таблиц** (рис. 1.3).

Рис. 1.3. Лента с открытой вкладкой **Создание**

В окне конструктора **Таблица1** определим все поля таблицы «Товар». Для каждого поля таблицы «Товар» определим **Имя поля**, **Тип данных.**

Рис. 1.4. Таблица «Товары» в режиме «**Конструктор**»

Теперь определим первичный ключ таблицы. Выделим поле «**Код товара»**, щелкнув кнопкой мыши на области маркировки, слева от имени поля, и нажмем кнопку **Ключевое поле** на вкладке ленты **Конструктор** в группе **Сервис**. Признаком установки ключа является изображение ключа слева от имени поля .

Сохраним созданную структуру таблицы и присвоим имя новой таблице – «Товар». Для этого выполним команду **Сохранить** на Панели быстрого доступа или на вкладке **ФАЙЛ**. В окне **Сохранение** введем имя таблицы.

При сохранении таблицы происходит обновление файла базы данных, в которую помещается созданная таблица. Таблица «Товар» появиться в списке объектов **Таблицы** в области навигации открытой базы данных «Реализация товаров».

После сохранения структуры таблицы переходите ко второму этапу создания таблицы – созданию записей. Для этого переключитесь в режим таблицы нажатием кнопки **Режим** на ленте конструктора или выбором нужного режима при открытии списка данной кнопки (рис. 1.5).

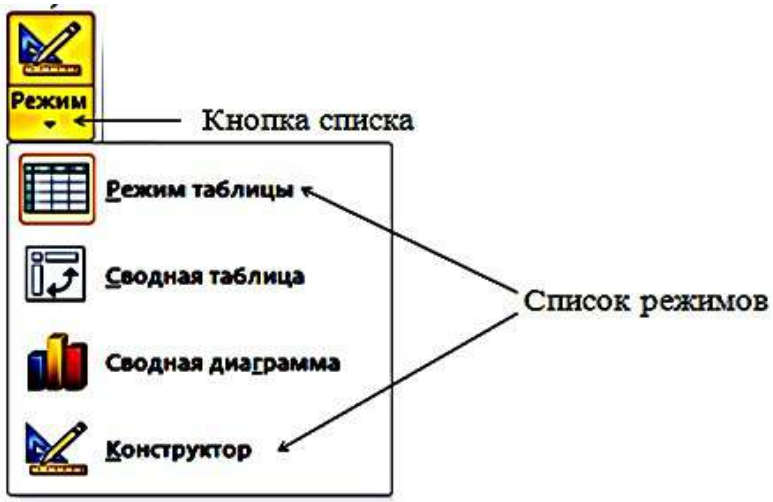


Рис. 1.5. Выбор режима представления таблицы

Как и в режиме конструктора, в режиме таблицы можно удалить столбец. При этом следует помнить, что удаляются все данные столбца, и отменить удаление невозможно. Удаление поля первичного ключа в режиме таблицы невозможно. Для этого необходимо использовать режим конструктора.

Открыть таблицу для ввода исходных данных. Установить курсор в первую строку таблицы и ввести исходные данные. Ввод данных в каждое поле таблицы завершать нажатием клавиши **Enter.** По окончании ввода данных при необходимости увеличить ширину полей. Записать таблицу «Товар» на диск.

Товары

Код товара	Наименование	Марка	Номер склада	Количество	Цена
1	Тахеометр	SP FOKUS 6	1	5	319 463,00 ₽
2	Тахеометр	SP FOKUS 6W	1	7	357 487,00 ₽
3	Тахеометр	Soutn NTS-365 R	2	6	225 000,00 ₽
4	Тахеометр	Soutn NTS-362 R	2	5	240 000,00 ₽
5	Теодолит	3Т2КП	3	9	84 193,00 ₽
6	Теодолит	4Т15П	3	5	58 764,00 ₽
7	Теодолит	4Т30П	3	8	50 625,00 ₽
8	Теодолит	VEGA TEO 5	3	10	30 000,00 ₽
9	Нивелир	4Н -2КЛ	4	15	16 680,00 ₽
10	Нивелир	4Н-3КЛ	4	18	12 500,00 ₽
(№)					

Рис. 1.6. Таблица «Товары» в режиме таблицы

Задание 2. Создание таблицы «Фирмы»

Для поля Телефон следует задать маску ввода: **(# # #) # # # - # # - # #**

Рис. 1.7. Таблица «Фирмы» в режиме «**Конструктор**»

Фирмы

Код фирмы	Название	Адрес	Телефон	Контактное лицо	Должность
1	ООО "Геомар Недра"	Москва, Ленина, 80	(495)618-05-10	Долженко И.М.	заведующий
2	ООО "Навгеоком"	Екатеринбург, Народной воли, 65	(343)253-53-55	Васильева З.О.	начальница
3	ООО "А-ГЕО"	Белгород, Мокроусова, 7	(904)095-70-45	Ашихмин Р.Ю.	кладовщик
4	ГеоСтройПрибор	Воронеж, Жуков, 3	(473)271-21-44	Яковлева Ю.К.	менеджер

Рис. 1.8. Таблица «Фирмы» в режиме таблицы

Задание 3. Создание таблицы «Склады»

Рис. 1.9. Таблица «**Склады**» в режиме «**Конструктор**»

Склады

Номер склада	Телефон	Адрес	Заведующий
1	(343)381-88-88	Екатеринбург, пер. Базовый, 7	Амелина И.В.
2	(343)379-51-62	В-Пышма, пер. Индустриальный, 1	Мясников Д.О.
3	(343)275-18-22	Екатеринбург, Монтажников, 18а	Куликова А.Н.
4	(343)310-22-22	Екатеринбург, Радищева, 4	Ромашенко К.Д.

Рис. 1.10. Таблица «**Склады**» в режиме «**Таблицы**»

Задание 4. Создание таблицы «Продажи»

1. Ввести в первой строке имя поля: **Дата продажи** и выбрать для него тип Дата/время.
2. Сформировать поле **Код фирмы** и выбрать для него числовой тип.
3. Указать в качестве источника данных для поля **Код фирмы** список кодов фирмы, внесенных в поле с таким же названием в таблицу «Фирмы», рис. 1.11.
4. Не переводя курсор со строки **Код фирмы**, щелкнуть мышью по закладке **Подстановка.**
5. Щелкнуть мышью по слову **Поле** в строке **Тип элемента управления**, а затем – по появившейся при этом кнопке **Раскрыть список**.
6. Выбрать щелчком мыши из раскрывшегося списка строку **Поле со списком**.
7. Щелкнуть мышью по незаполненному полю в строке **Источник строк**, а затем – по появившейся при этом кнопке **Раскрыть список**.
8. Щелчком мыши выбрать строку с названием таблицы «Фирмы».

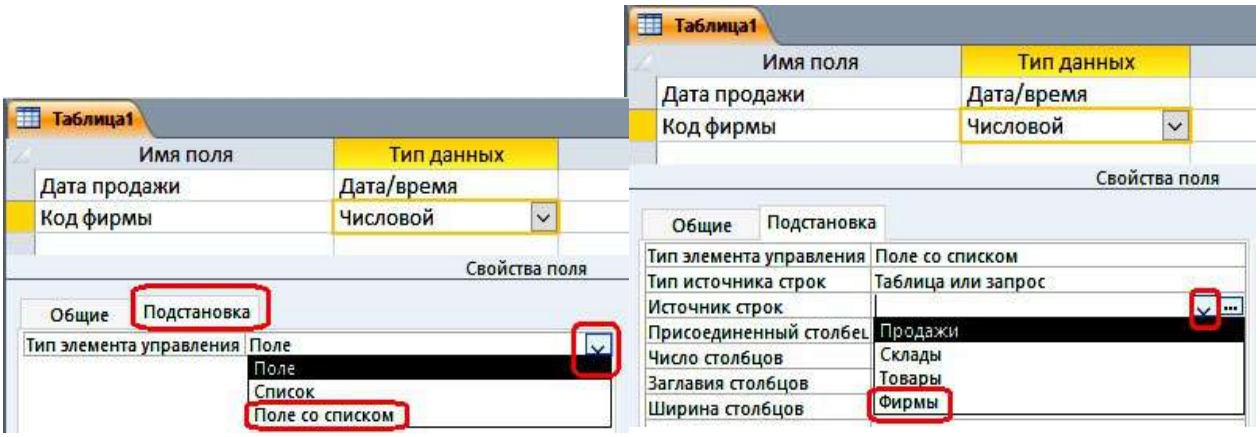


Рис. 1.11. Окно таблицы с подстановкой в режиме «**Конструктора**»

Рис. 1.12. Окно таблицы с выбором источника строк

Рис. 1.13. Окно таблицы «**Продажи**» в режиме «**Конструктора»**

Дата прода	Код фирмы	Код товара	Количество	Скидки
15.01.2018	4	10	10	5
19.01.2018	1	2	6	10
20.01.2018	3	5	8	5
25.01.2018	2	4	4	10
27.01.2018	1	1	4	15
30.01.2018	3	7	4	10
02.02.2018	2	3	5	5
05.02.2018	4	9	10	10
10.02.2018	3	8	9	10
15.02.2018	3	5	8	10

Рис. 1.14. Таблица «**Продажи**» в режиме «**Таблицы**»

Задание 5. Создание схемы данных

Создание схемы данных начинается с выполнения команды **Схема данных** в группе **Отношения** на вкладке ленты **Работа с базами данных**. В результате выполнения этой команды открывается окно схемы данных и диалоговое окно **Добавление таблицы**, в котором осуществляется выбор таблиц, включаемых в схему (рис. 1.15).

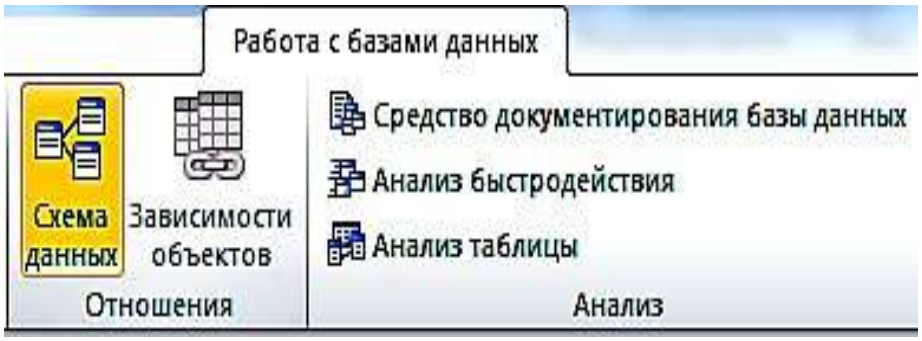


Рис. 1.15. Вкладка ленты **Работа с базами данных**

В окне **Добавление таблицы** отображаются все таблицы и запросы, содержащиеся в базе данных. Выберем вкладку **Таблицы** и с помощью кнопки **Добавить** разместим в окне **Схема данных** все ранее созданные таблицы базы данных «Реализация товаров». При создании связей в схеме данных используется проект структуры реляционной базы данных, в котором показаны все одно-многозначные связи таблиц. Реализуются связи с помощью добавления в связанные таблицы общих полей, называемых *ключом связи.*

На рис. 1.16 в созданной схеме данных БД «Реализация товаров» все связи отмечены символами **1** или ∞. Это свидетельствует о том, что одно-многозначные связи установлены правильно (по простому и составному ключу).

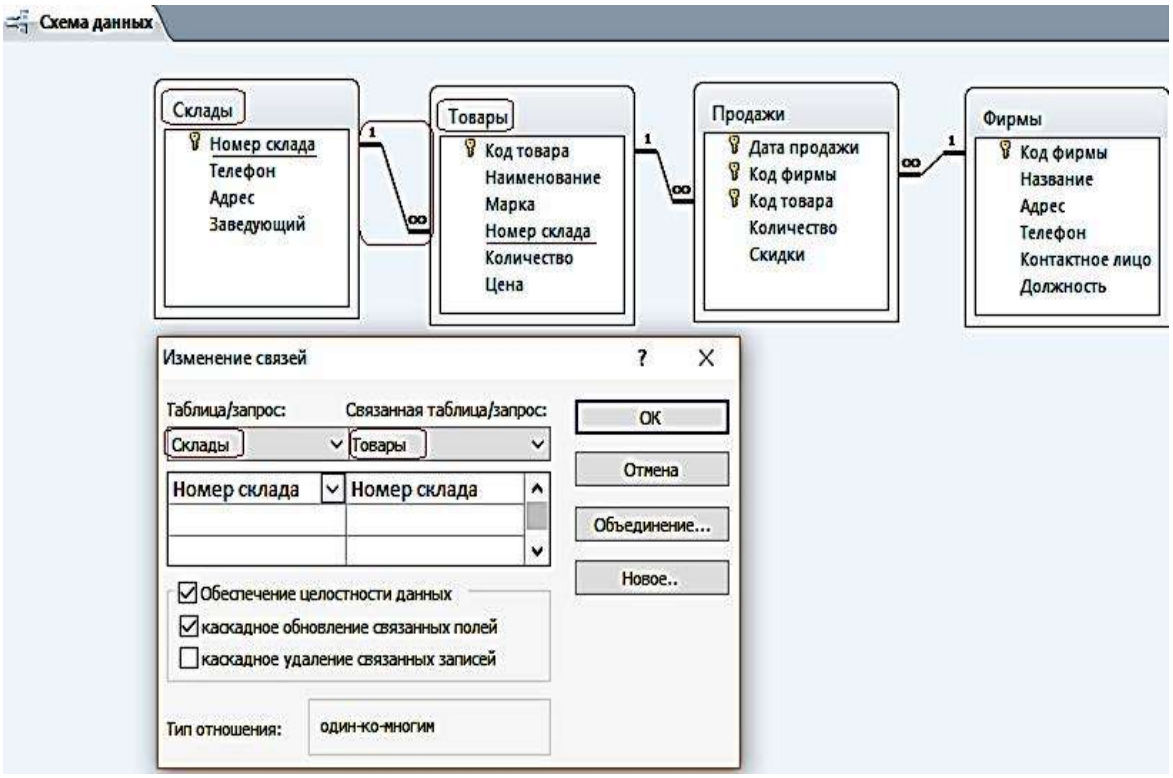


Рис. 1.16. Схема данных БД «**Реализация товаров**»

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

Работа с простыми запросами

Конструирование запросов на выборку с условием отбора

Задание 1. Выбрать товар по его наименованию

1. Для создания запроса в окне базы данных выберите вкладку ленты – **Создание** и в группе **Запросы** нажмите кнопку **Конструктор запросов**.

2. В окне **Добавление таблицы** выберите таблицу «Товар» и нажмите кнопку добавить. Выбранная таблица будет отображена в области схемы данных запроса. Закройте окно **Добавление таблицы**, нажав кнопку **Закрыть.** На ленте появляется и автоматически активизируется новая вкладка **Работа с запросами / Конструктор**, на которой цветом выделен тип создаваемого запроса – **Выборка.**

3. В окне конструктора (рис. 2.1) последовательно перетащите из списка полей таблицы «Товар» поля **Наименование, Марка и Цена** в столбцы бланка запроса в строку **Поле**. Для этого необходимо щелкнуть двойным щелчком на имени поля таблицы в схеме данных запроса.

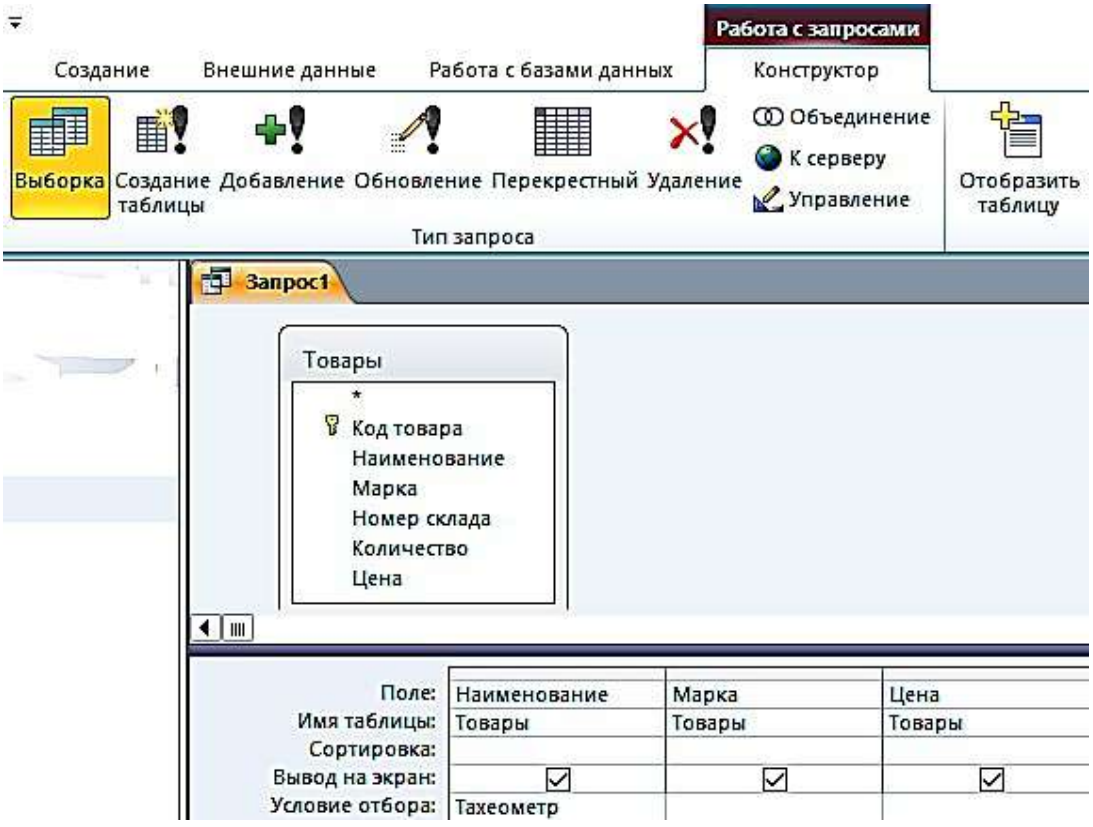


Рис. 2.1. Окно конструктора запроса на выборку

4. Запишите в строке **Условия отбора** наименование товара – Тахеометр. Используемое в выражении текстовое значение вводится в двойных кавычках, которые добавляются автоматически.

5. Выполните запрос, щелкнув по кнопке **Выполнить !** или на кнопке **Режим** в группе **Результаты**. На экране откроется окно запроса в режиме таблицы с записью из таблицы «Товар», отвечающий заданным условиям (рис. 2.2). Дайте ему имя **2_По наименованию Тахеометр**.

1_По наименованию Тахеометр

Наименование	Марка	Цена
Тахеометр	SP FOKUS 6	319 463,00 ₽
Тахеометр	SP FOKUS 6W	357 487,00 ₽
Тахеометр	Soutn NTS-365 R	225 000,00 ₽
Тахеометр	Soutn NTS-362 R	240 000,00 ₽

Рис. 2.2. Просмотр запроса в режиме «**Таблицы»**

Задание 2. Выбрать товары, цена которых менее 100 000 руб. и более 20 000 руб., и количество больше или равно 9

1. Создайте новый запрос в режиме конструктора, добавьте таблицу «Товар». В окне конструктора последовательно перетащите из списка полей таблицы «Товар» в бланк запроса поля (рис. 2.3).

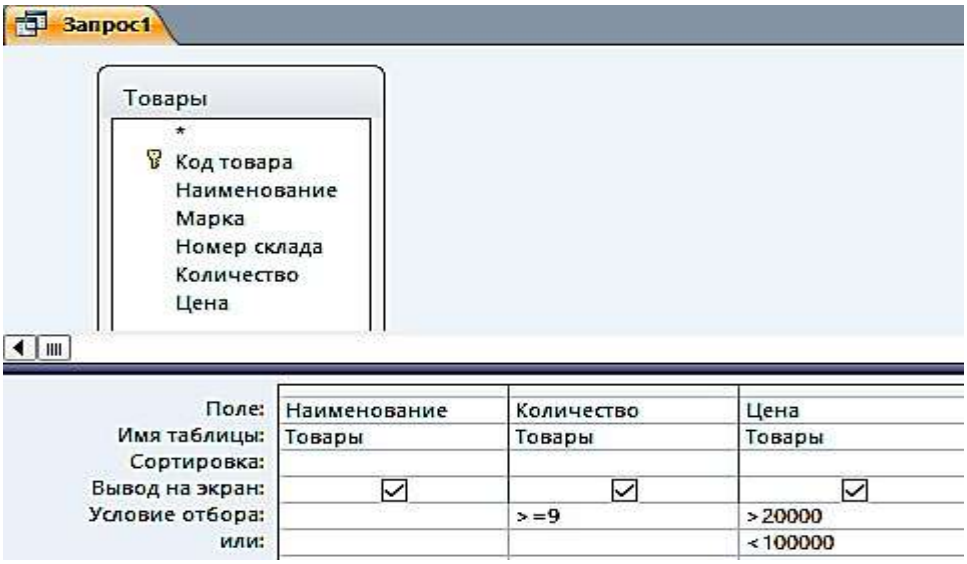


Рис. 2.3. Окно конструктора запроса на выборку с логическими операциями в условии отбора

2. Запишите **Условия отбора**, как показано в бланке запроса. Между условиями, записанными в одной строке, выполняется логическая операция

AND. Между условиями, записанными в разных строках, выполняется логическая операция OR.

3. Выполните запрос. Дайте ему имя **2_Цена_количество** (рис. 2.4).

2_Цена_количество

Наименование	Количество	Цена
Теодолит	9	84 193,00 ₽
Теодолит	5	58 764,00 ₽
Теодолит	8	50 625,00 ₽
Теодолит	10	30 000,00 ₽
Нивелир	15	16 680,00 ₽
Нивелир	18	12 500,00 ₽

Рис. 2.4. Просмотр запроса в режиме «**Таблицы**»

Задание 3. Выбрать скидки, равные 10, за заданный период (после 25 января 2018 г.) (рис. 2.5, 2.6)

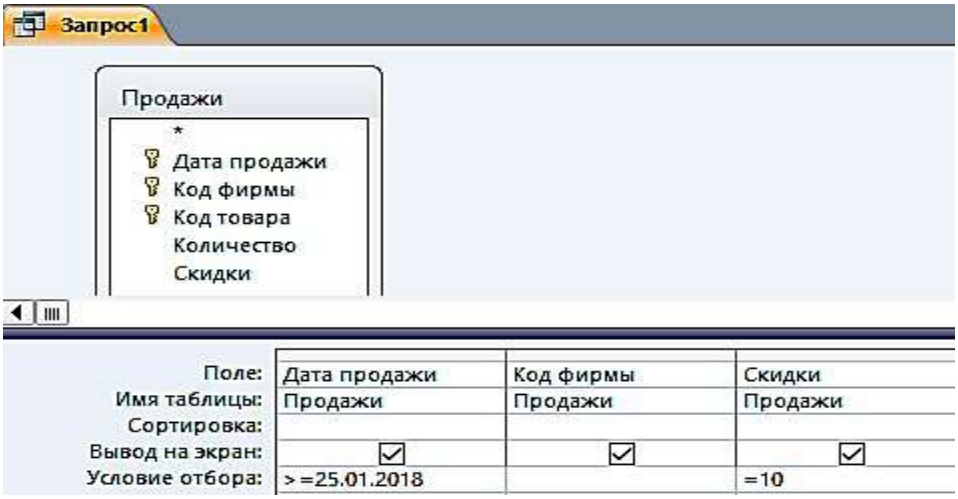


Рис. 2.5. Окно конструктора запроса на выборку
с логическими операциями в условии отбора

3_Дата_скидка

Дата прода	Код фирмы	Скидки
25.01.2018	2	10
30.01.2018	3	10
05.02.2018	4	10
10.02.2018	3	10
15.02.2018	3	10

Рис. 2.6. Просмотр запроса в режиме «**Таблицы**»

Вычисляемые поля в запросах

В запросе, как и в таблице, для каждой записи могут производиться вычисления с числовыми, строковыми значениями или со значениями дат с использованием данных из одного или нескольких полей. Результат вычисления образует в таблице запроса новое вычисляемое поле (рис. 2.7).

Рис. 2.7. Запрос с вычисляемым полем

Задание 4. В таблице «Товар» вычислить Цену с НДС, при ставке НДС 35 %

1. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку для таблицы «Товары». Перетащите в бланк запроса поля **Наименование, Марка, Номер склада, Количество, Цена** (рис. 2.8).

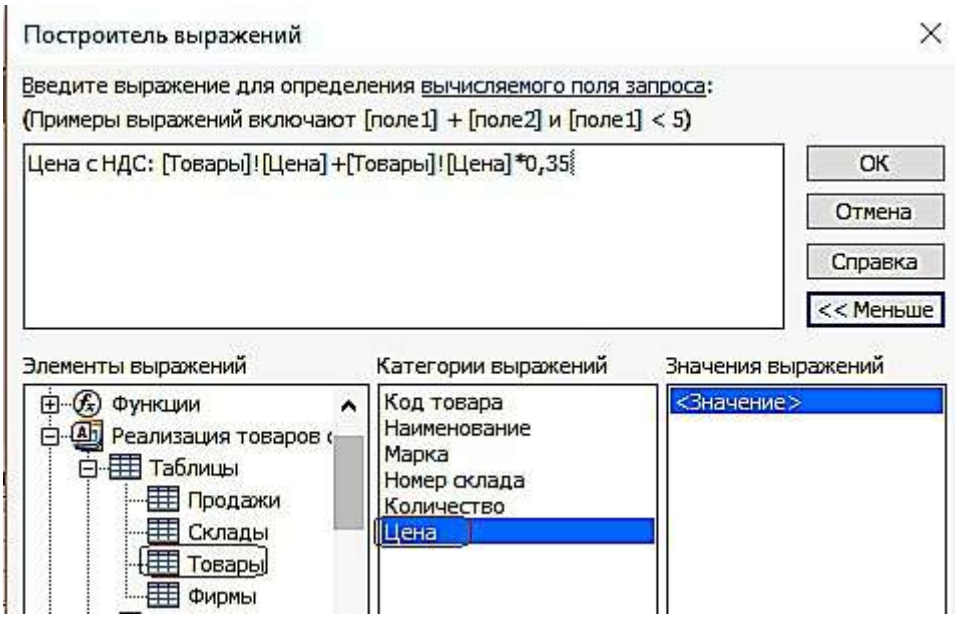


Рис. 2.8. Построитель выражений

Для подсчета цены с учетом НДС создайте после поля Цена вычисляемое поле **Цена с НДС** (с правой стороны) при помощи построителя.

2. Вызовите построитель выражений, нажав кнопку **Построитель** в группе **Настройка запроса** ленты «**Конструктор**». Курсор мыши должен быть установлен предварительно в ячейке ввода выражения.

3. В левой верхней части окна **Построитель выражений** (см. рис. 2.8) выберите свою базу данных «Реализация товаров со складов», далее выберите таблицу «**Товары**», на которой построен запрос. Справа отобразится список её полей. Последовательно выбирайте нужные поля и операторы, двойным щелчком вставляя в выражение. Выражение сформируется в верхней части окна. Обратите внимание – построитель перед именем поля указал имя таблицы, которой оно принадлежит, и отделил его от имени поля восклицательным знаком.

4. Слово «Выражение» удаляйте, иначе оно выдает, синтаксическую ошибку.

Полученный запрос «**4_Цена с НДС**» в режиме «**Таблицы»** изображен на рис. 2.9.

4_Цена с НДС

Наименование	Марка	Номер склада	Количество	Цена	Цена с НДС
Тахеометр	SP FOKUS 6	1	5	319 463,00 ₽	431 275,05 ₽
Тахеометр	SP FOKUS 6W	1	7	357 487,00 ₽	482 607,45 ₽
Тахеометр	Soutn NTS-365 R	2	6	225 000,00 ₽	303 750,00 ₽
Тахеометр	Soutn NTS-362 R	2	5	240 000,00 ₽	324 000,00 ₽
Теодолит	3Т2КП	3	9	84 193,00 ₽	113 660,55 ₽
Теодолит	4Т15П	3	5	58 764,00 ₽	79 331,40 ₽
Теодолит	4Т30П	3	8	50 625,00 ₽	68 343,75 ₽
Теодолит	VEGA TEO 5	3	10	30 000,00 ₽	40 500,00 ₽
Нивелир	4Н -2КЛ	4	15	16 680,00 ₽	22 518,00 ₽
Нивелир	4Н-3КЛ	4	18	12 500,00 ₽	16 875,00 ₽

Рис. 2.9. Просмотр запроса «**4_Цена с НДС**» в режиме «**Таблицы»**

Задание 5. В вычисляемых полях и условиях отбора можно использовать встроенные функции. Необходимо выбрать количество продаж, в заданном месяце

1. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку по таблице «Продажи».

2. Создайте вычисляемое поле **Заданный месяц** (в правой) пустой ячейке строки, записав туда одно из выражений: а Format([Продажи]![Дата продажи];"mmmm") – эта функция возвратит полное название месяца;

b или Format([Продажи]![Дата продажи];"mm") – эта функция возвратит номер месяца;

3. Для отбора продаж в заданном месяце, в вычисляемом поле в строку **Условие отбора** введите название месяца, например, – Январь, или номер месяца, например, 1, в соответствии с параметром в функции Format (рис. 2.10, 2.11).

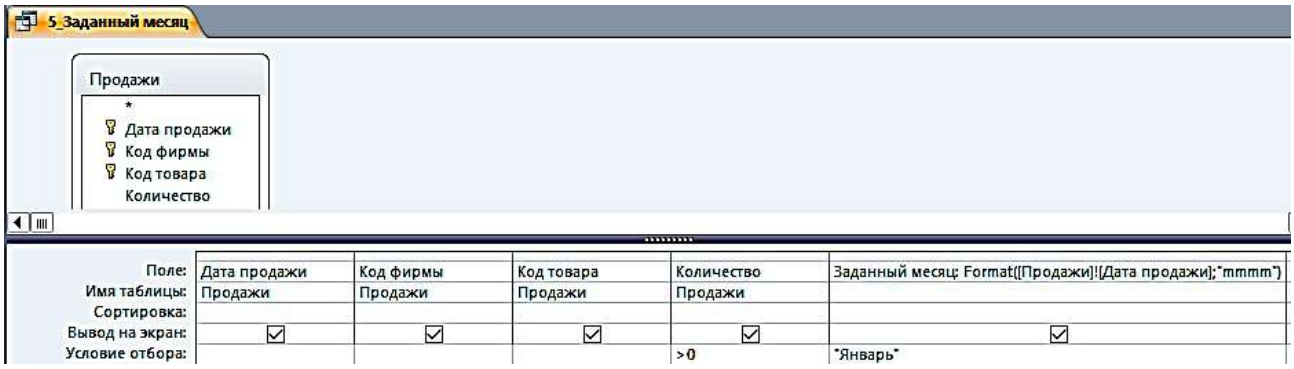


Рис. 2.10. Запрос с функцией выделения из даты полного названия месяца в вычисляемом поле

5_Заданный месяц

Дата продажи	Код фирмы	Код товара	Количество	Заданный месяц
15.01.2018	4	10	10	Январь
19.01.2018	1	2	6	Январь
20.01.2018	3	5	8	Январь
25.01.2018	2	4	4	Январь
27.01.2018	1	1	4	Январь
30.01.2018	3	7	4	Январь

Рис. 2.11. Просмотр запроса «**5_Заданный месяц**» в режиме «**Таблицы**»

Параметры в запросах

При решении практических задач удобнее вводить выражение в условие отбора в процессе выполнения запроса в диалоге с пользователем, не переходя в режим конструктора. Обеспечить такой диалог можно с помощью *параметра запроса.* Имя параметра запроса задается в строке **Условие отбора** в квадратных скобках. При выполнении запроса это имя появиться в диалоговом окне **Введите значение параметра.**

Задание 6. Скопируйте запрос «5_Заданный месяц» и переименуйте его в «6_Параметрический запрос»

1. Замените в условии отбора рассмотренного запроса название месяца Январь на имя параметра – [Название месяца].

2. Выполните запрос. Открывшееся диалоговое окно (рис. 2.12) позволит ввести значение параметра запроса – **Название месяца**.

3. Введите Январь и получите результат.

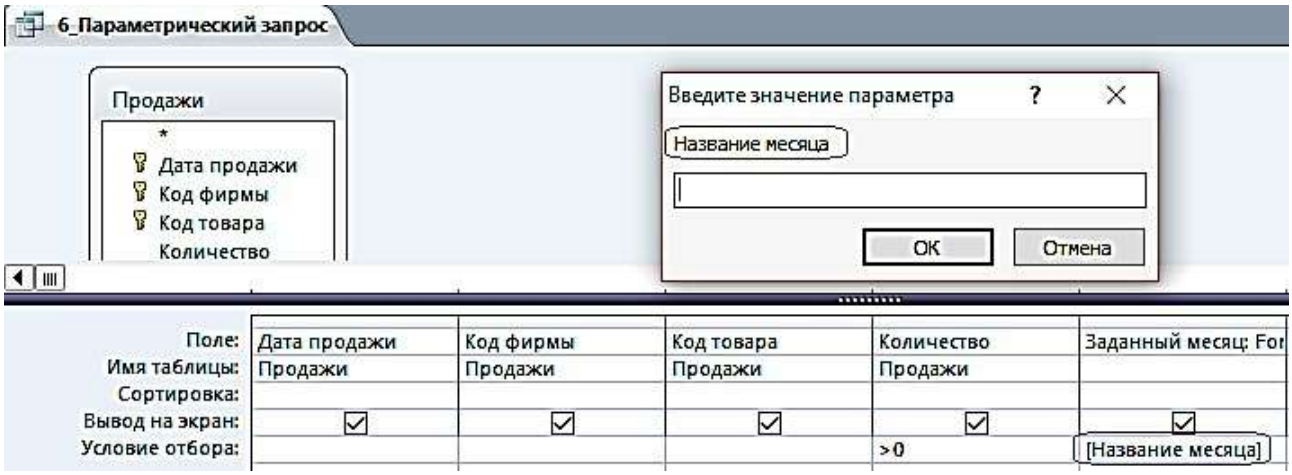


Рис. 2.12. Диалоговое окно ввода значения параметра

Параметры запроса могут быть использованы не только в выражениях условий отбора, но и для ввода значений операндов в вычисляемых полях.

Задание 7. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку для таблицы «Товар»

Перетащите в бланк запроса поля Наименование и Цена. Для увеличения цены на заданный процент в вычисляемое поле запишите выражение с параметром запроса [На сколько процентов увеличить?]/100 (рис. 2.13).

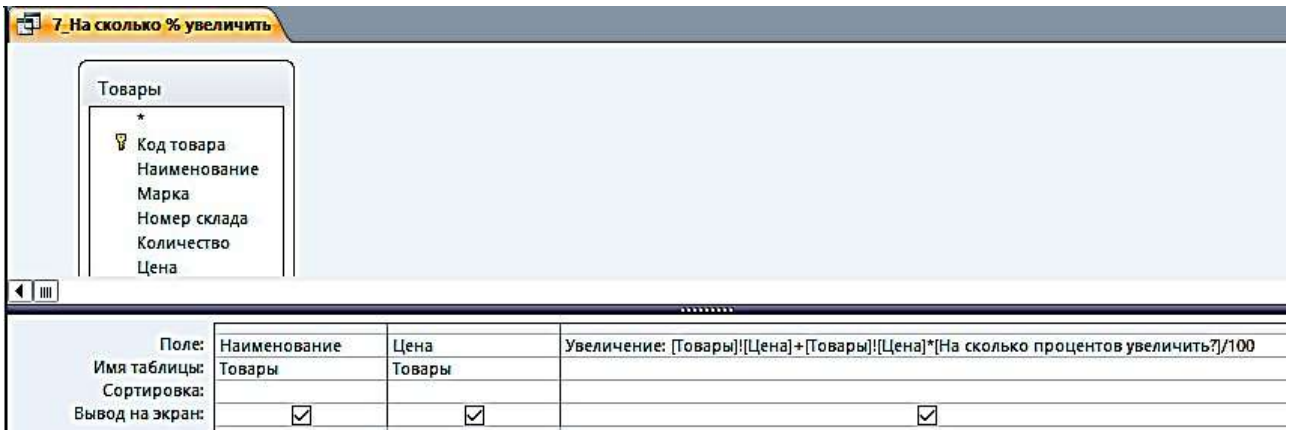


Рис. 2.13. Использование параметра в выражении вычисляемого поля

Задание 8. Скопируйте запрос «**7_На сколько % увеличить**» и переименуйте его в «**8_Проценты**» (рис. 2.14)

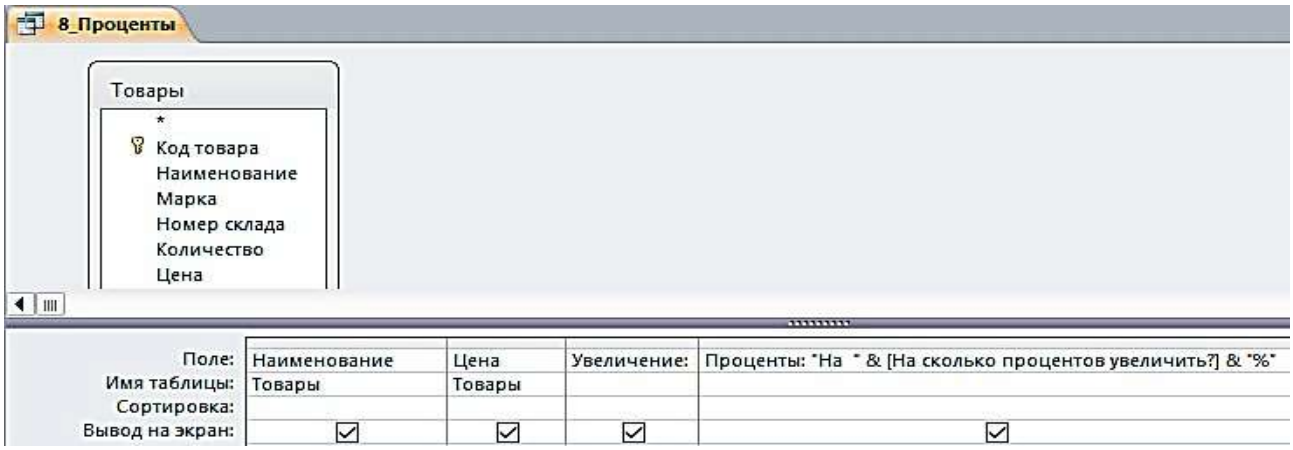


Рис. 2.14. Использование параметра в выражении вычисляемого поля «**Проценты**»

После выполнения предыдущего запроса в таблице отображается результат вычисления с использованием введенного значения параметра. Однако значение параметра при этом не выводится. Для отображения в таблице запроса введенного значения параметра дополните запрос ещё одним вычисляемым полем, в котором запишите выражение:

Проценты: "На " & [На сколько процентов увеличить?] & "%".

Теперь в таблице запроса появится поле «**Проценты»**, в котором будет записано, например, при вводе 35 – **На 35 %** (рис. 2.15).

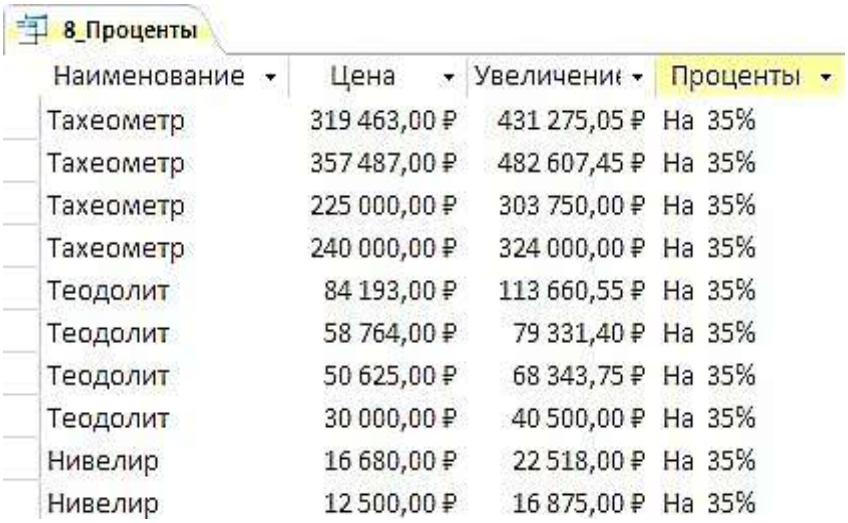


Рис. 2.15. Просмотр запроса «**8_Проценты**» в режиме «**Таблицы**»

Групповые операции в запросах

Групповые операции позволяют выделить группы записей с одинаковыми значениями в указанных полях и вычислить итоговые данные для каждой из групп по др. полям, используя одну из статистических функций. Статистические функции применимы к полям с типом данных **Числовой, Денежный, Дата и время**.

Задание 9. Запрос с функцией **Sum**

Определите суммарное количество и цену каждого из товаров.

1. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку из таблицы «**Товары**».
2. Из списка таблицы перетащите в бланк запроса поле «**Наименование**». По этому полю будет производиться группировка записей таблицы.
3. Перетащите в бланк запроса поля «**Количество**» и «**Цена**», по которым будет подсчитываться суммарное количество каждого из товаров.
4. Выполните команду **Итоги** из группы **Показать или Скрыть**. В бланке запроса появится новая строка **Групповая операция** со значением **Группировка** во всех полях запроса.
5. В столбцах «**Количество**» и «**Цена**» замените слово **Группировка** на функцию **Sum**. Для этого вызовите раскрывающийся список и выберите эту функцию (рис. 2.16).

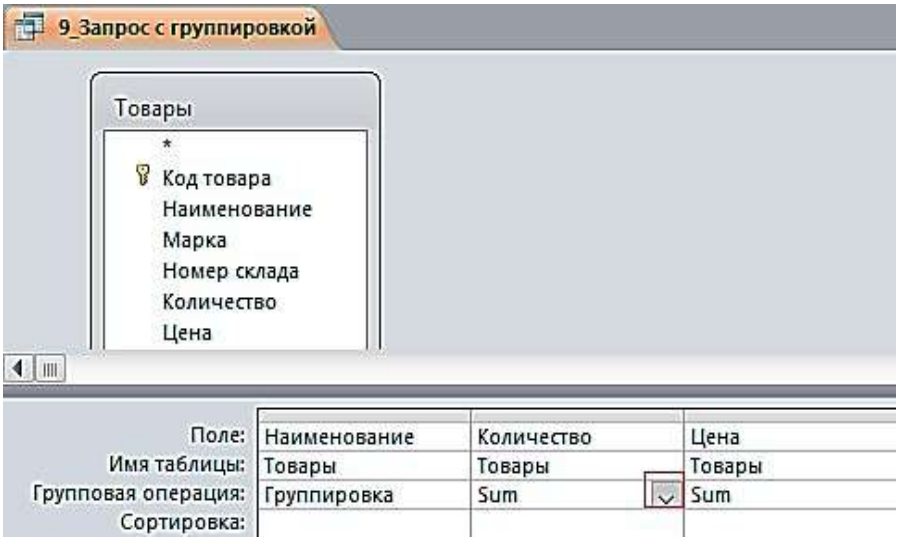


Рис. 2.16. Запрос с группировкой по коду товара и суммированием количества и цены в группе

Для отображения результата запроса (рис. 2.17) щелкните по кнопке **Выполнить** в группе **Результаты**.

Рис. 2.17. Результат подсчета суммарного количества и цены

Задание 10. Запрос с функцией **Count**

Определите, сколько раз продавался товар по коду фирмы.

1. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку из таблицы «Продажи».

2. Из списка таблицы перетащите в бланк запроса поле «**Код фирмы**». По этому полю будет производиться группировка записей таблицы.

3. Перетащите в бланк запроса поле «**Количество**», по которому будет происходить подсчет числа товаров с одинаковыми номерами фирм.

4. Выполните команду **Итоги** из группы **Показать или Скрыть**. В бланке запроса появится новая строка **Групповая операция** со значением **Группировка** во всех полях запроса.

5. В столбце «**Количество**» замените слово **Группировка** на функцию Count. Для этого вызовите раскрывающийся список и выберите эту функцию
(рис. 2.18).

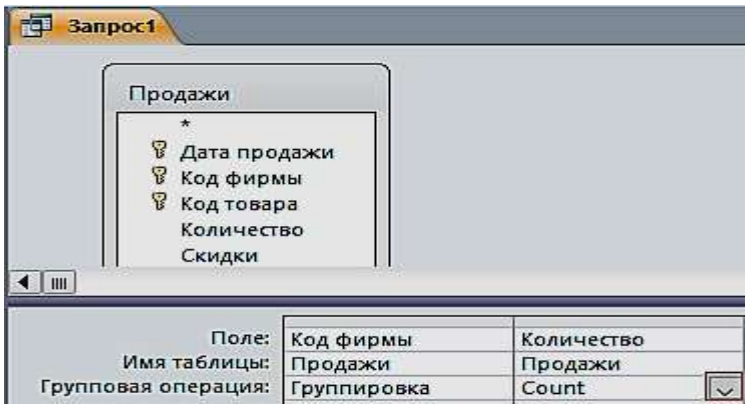


Рис. 2.18. Запрос для подсчета количества товара по коду фирмы

6. Сохраните запрос под именем «**10_Число продаж по коду фирмы**». Результат запроса показан на рис. 2.19.

10_Число продаж по коду фирмы

Код фирмы	Count-Количество
1	2
2	2
3	4
4	2

Рис. 2.19. Результат подсчета количества товара по коду фирмы

Задание 11. Запрос с отображением строки итогов по столбцу

Строка итогов используется для быстрого расчета и отображения в столбце таблицы или запроса в режиме таблицы таких значений, как итоговая сумма, среднее, минимальное и максимальное, количество значений.

1. Для добавления строки итогов в таблицу запроса откройте запрос «**1_По наименованию тахеометр»** в режиме таблицы. На вкладке ленты **Главная** в группе **Записи** выполните команду **Итоги**. В таблице отобразится строка **Итог**.

2. В строке **Итог** нажмите кнопку раскрывающегося списка в столбце «**Цена**», для которого требуется выполнить расчет, и выберите в списке **Сумма** (рис. 2.20).

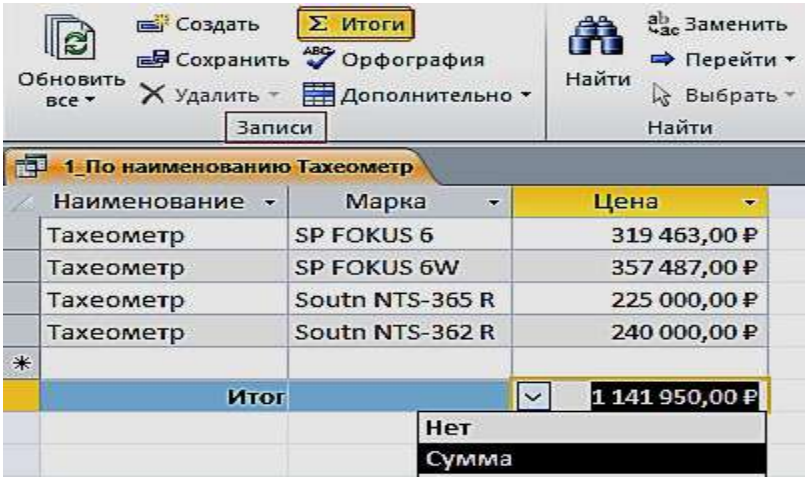


Рис. 2.20. Результат отображения строки итогов с расчетом суммы по столбцу

3. Для того, чтобы скрыть строку итогов, повторно выполните команду **Итоги**.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3
Работа с многотабличными запросами

Многотабличный запрос позволяет сформировать записи результата путем объединения взаимосвязанных записей из таблиц базы данных и выбора из них нужных полей и записей. Многотабличный запрос часто осуществляет объединение данных, которые на этапе проектирования были разделены на множество таблиц, отвечающих требованиям нормализации.

При конструировании многотабличного запроса важнейшим условием является правильное представление о том, как идет объединение записей таблиц при формировании результата.

Рассмотрим технологию конструирования многотабличного запроса на выборку для расчета разности количества товаров и количества проданных товаров.

Задание 1. Запрос с вычисляемым полем «**Остаток**»

1. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку для таблиц «**Товары**» и «**Продажи**». Перетащите в бланк запроса из таблицы «**Товары**» поля «**Наименование**», «**Марка**», «**Количество**», и из таблицы «**Продажи**» поле «**Количество**».
2. Для подсчета разности количества товаров создайте после поля «**Количество**», вычисляемое поле «**Остаток**» (с правой стороны), при помощи построителя (рис. 3.1).

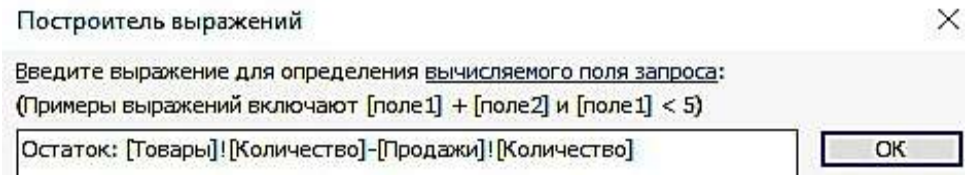


Рис. 3.1. Построитель выражений

3. Вызовите построитель выражений, нажав кнопку **Построитель** в группе **Настройка запроса** ленты «**Конструктор**». Курсор мыши должен быть установлен предварительно в ячейке ввода выражения (рис. 3.2).

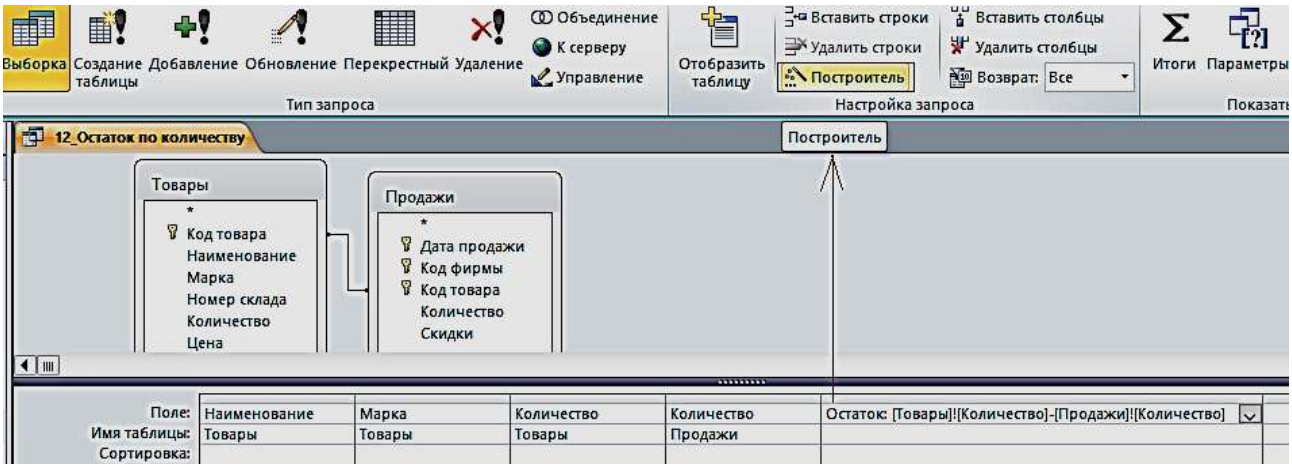


Рис. 3.2. Запрос с вычисляемым полем

4. В левой части окна **Построитель выражений** выберите свою базу данных «**Реализация товаров со складов**», далее выберите таблицу «**Товары**». Справа отобразится список её полей. Выберите поле «**Количество**» и знак минус, двойным щелчком вставляя в выражение. Снова выберите таблицу «**Продажи**» и поле «**Количество**» (рис. 3.3).

12_Остаток по количеству

Наименование	Марка	Товары.Количество	Продажи.Количество	Остаток
Тахеометр	SP FOKUS 6	5	4	1
Тахеометр	SP FOKUS 6W	7	6	1
Тахеометр	Soutn NTS-365 R	6	5	1
Тахеометр	Soutn NTS-362 R	5	4	1
Теодолит	3Т2КП	9	8	1
Теодолит	3Т2КП	9	8	1
Теодолит	4Т30П	8	4	4
Теодолит	VEGA TEO 5	10	9	1
Нивелир	4Н -2КЛ	15	10	5
Нивелир	4Н-3КЛ	18	10	8

Рис. 3.3 Результат запроса «**Остаток по количеству**»

5. Слово «Выражение» удаляйте, оно выдает, синтаксическую ошибку.

Задание 2. Формирование запроса об увеличении цены на 15 % в феврале месяце

1. Создайте в режиме конструктора запрос на выборку для таблиц «**Товары**» и «**Продажи**». Перетащите в бланк запроса из таблицы «**Продажи**» поле «**Дата продажи**», а из таблицы «**Товары**» поля «**Наименование**», «**Марка**», «**Номер склада**», «**Количество**», «**Цена**».

2. Создайте новое поле «**Новая цена**». Для этого создайте после поля Цена, вычисляемое поле «**Новая Цена**» (с правой стороны) при помощи построителя.

3. Вызовите построитель выражений, нажав кнопку **Построитель** в группе **Настройка запроса** ленты «**Конструктор**». Курсор мыши должен быть установлен предварительно в ячейке ввода выражения. В окне «**Построитель выражений**» выбрать «**Элементы выражений**», в нем найти название своей базы данных, затем Таблицы «**Товары**» и в поле «**Категории выражений**» выбрать «**Цена**», а с клавиатуры набрать «*1,05».

4. В поле «**Дата продажи**» введите условие отбора >=01.02.2018 (рис. 3.4).

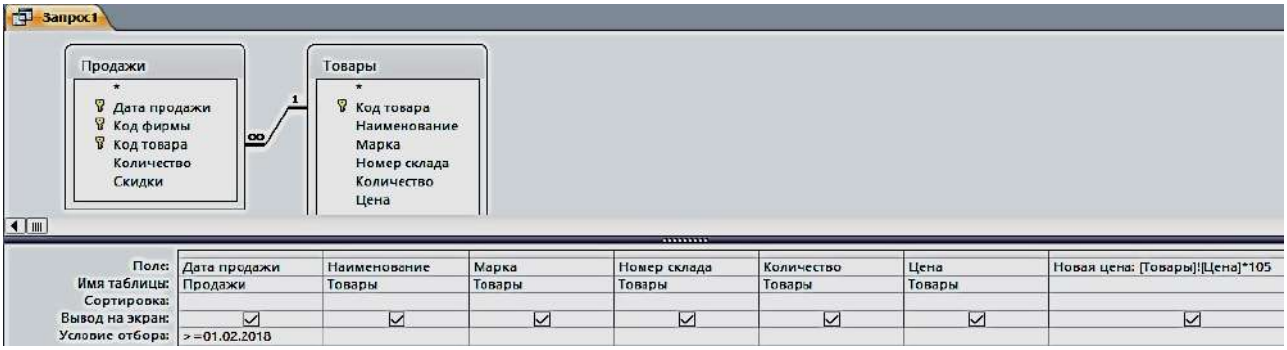


Рис. 3.4. Запрос «**Новая цена**» в режиме конструктора

5. Сохранить запрос с именем «**Новая цена**» (рис. 3.5).

13_Цена в феврале

Дата прода	Наименование	Марка	Номер склада	Количество	Цена	Новая цена
02.02.2018	Тахеометр	Soutn NTS-365 R	2	6	225 000,00 ₽	23 625 000,00 ₽
15.02.2018	Теодолит	3Т2КП	3	9	84 193,00 ₽	8 840 265,00 ₽
10.02.2018	Теодолит	VEGA TEO 5	3	10	30 000,00 ₽	3 150 000,00 ₽
05.02.2018	Нивелир	4Н -2КЛ	4	15	16 680,00 ₽	1 751 400,00 ₽

Рис. 3.5. Результат запроса «**Новая цена**»

Задание 3. Создание запроса о товарах на складе в г. Екатеринбурге (рис. 3.6, 3.7)

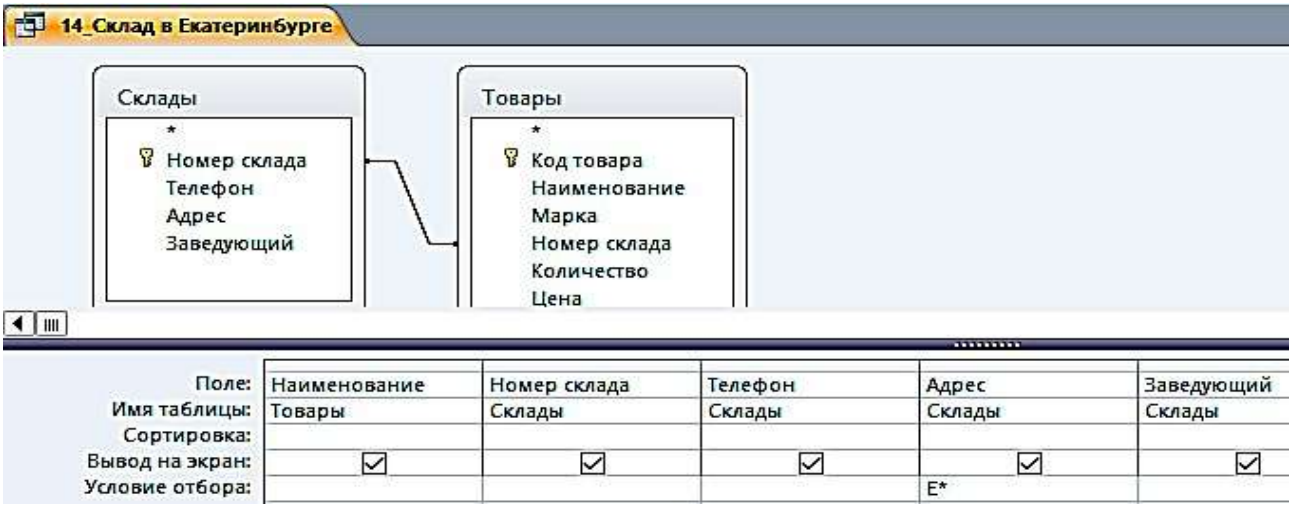


Рис. 3.6. Запрос «**Склад в Екатеринбурге**» в режиме Конструктора

14_Склад в Екатеринбурге

Наименование	Номер склада	Телефон	Адрес	Заведующий
Тахеометр	1	(343)381-88-88	Екатеринбург, пер. Базовый, 7	Амелина И.В.
Тахеометр	1	(343)381-88-88	Екатеринбург, пер. Базовый, 7	Амелина И.В.
Теодолит	3	(343)275-18-22	Екатеринбург, Монтажников, 18а	Куликова А.Н.
Теодолит	3	(343)275-18-22	Екатеринбург, Монтажников, 18а	Куликова А.Н.
Теодолит	3	(343)275-18-22	Екатеринбург, Монтажников, 18а	Куликова А.Н.
Теодолит	3	(343)275-18-22	Екатеринбург, Монтажников, 18а	Куликова А.Н.
Нивелир	4	(343)310-22-22	Екатеринбург, Радищева, 4	Ромашенко К.Д.
Нивелир	4	(343)310-22-22	Екатеринбург, Радищева, 4	Ромашенко К.Д.

Рис. 3.7. Результат запроса «**Склад в Екатеринбурге**»

Задание 4. Создание запроса о товарах в феврале, с вычисляемым полем «**Сумма**» и отображения строки итогов с расчетом суммы по этому столбцу (рис. 3.8, 3.9)

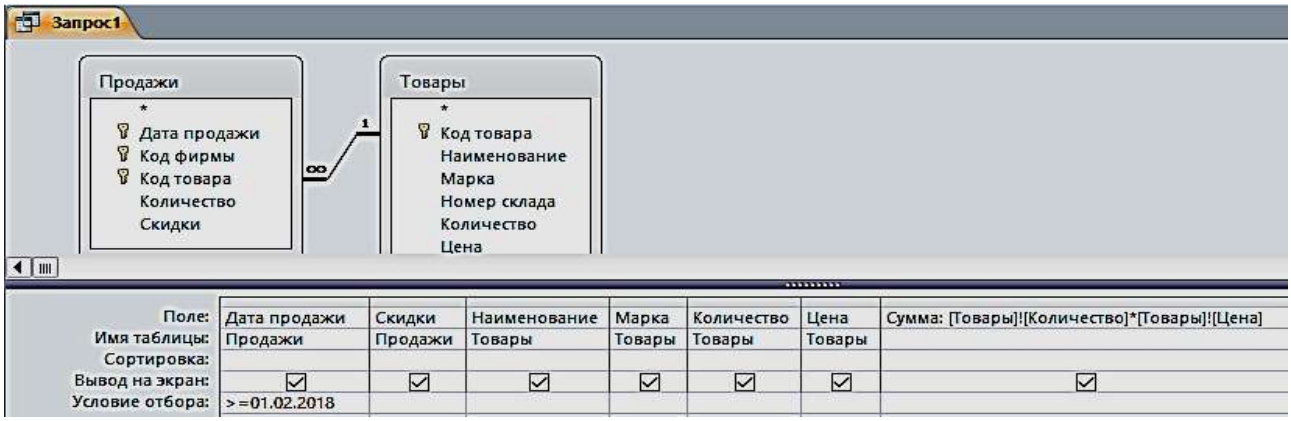


Рис. 3.8. Запрос «**Стоимость**» в режиме Конструктора

15_Стоимость

Дата прода	Скидки	Наименование	Марка	Количество	Цена	Сумма
02.02.2018	5	Тахеометр	Soutn NTS-365 R	6	225 000,00 ₽	1 350 000,00 ₽
15.02.2018	10	Теодолит	3Т2КП	9	84 193,00 ₽	757 737,00 ₽
10.02.2018	10	Теодолит	VEGA TEO 5	10	30 000,00 ₽	300 000,00 ₽
05.02.2018	10	Нивелир	4Н -2КЛ	15	16 680,00 ₽	250 200,00 ₽
Итог						2 657 937,00 ₽

Нет
Сумма

Рис. 3.9. Результат запроса «**Стоимость**» и итог с расчетом суммы по столбцу

Задание 5. Создание запроса из четырех таблиц (рис. 3.10, рис. 3.11)

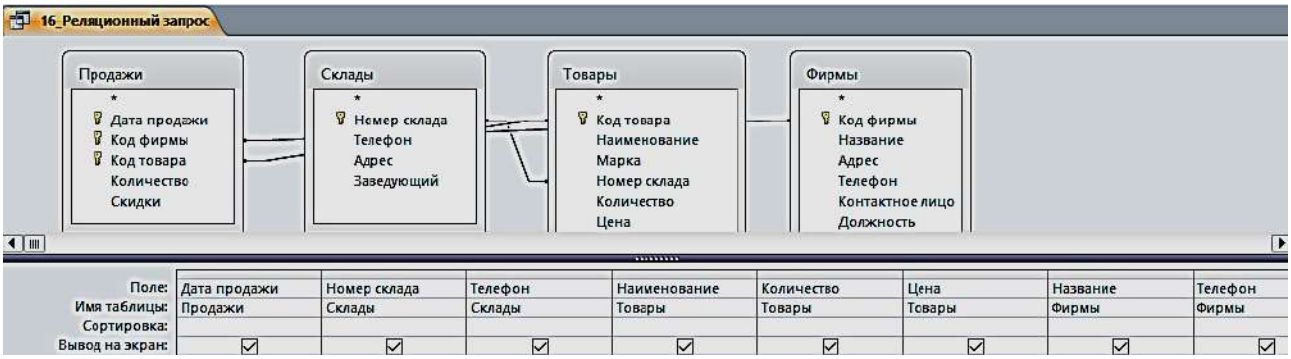


Рис. 3.10. Реляционный запрос в режиме Конструктора

16_Реляционный запрос

Дата продажи	Номер склада	Склады.Телефон	Наименование	Количество	Цена	Название	Фирмы.Телефон
15.01.2018	4	(343)310-22-22	Нивелир	18	12 500,00 ₽	ГеоСтройПрибор	(473)271-21-44
19.01.2018	1	(343)381-88-88	Тахеометр	7	357 487,00 ₽	ООО "Геомар Недра"	(495)618-05-10
20.01.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	9	84 193,00 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45
25.01.2018	2	(343)379-51-62	Тахеометр	5	240 000,00 ₽	ООО "Навгеоком"	(343)253-53-55
27.01.2018	1	(343)381-88-88	Тахеометр	5	319 463,00 ₽	ООО "Геомар Недра"	(495)618-05-10
30.01.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	8	50 625,00 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45
02.02.2018	2	(343)379-51-62	Тахеометр	6	225 000,00 ₽	ООО "Навгеоком"	(343)253-53-55
05.02.2018	4	(343)310-22-22	Нивелир	15	16 680,00 ₽	ГеоСтройПрибор	(473)271-21-44
10.02.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	10	30 000,00 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45
15.02.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	9	84 193,00 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45

Рис. 3.11. Результат сложного запроса

Запросы на изменение

К запросам на изменение относятся запросы на обновление данных в записях таблицы базы, на добавление и удаление записей из таблицы, а также запросы на создание таблицы из записей, сформированных в нем.

Задание 6. Создать запрос на обновление таблицы «Товары». Увеличьте цену товара на 20 %:

1. Создайте запрос на выборку, путем отбора соответствующих полей. Присвойте ему имя «**17_Обновление**».

2. Откройте этот запрос в режиме Конструктора. Выполните команду **Запрос – Обновление** – Введите в строке «**Обновление**» выражение для новых значений [Цена]*1,2 (рис. 3.12). Закройте запрос. У запроса изменится вид значка. Проверьте правильность его выполнения (рис. 3.13).

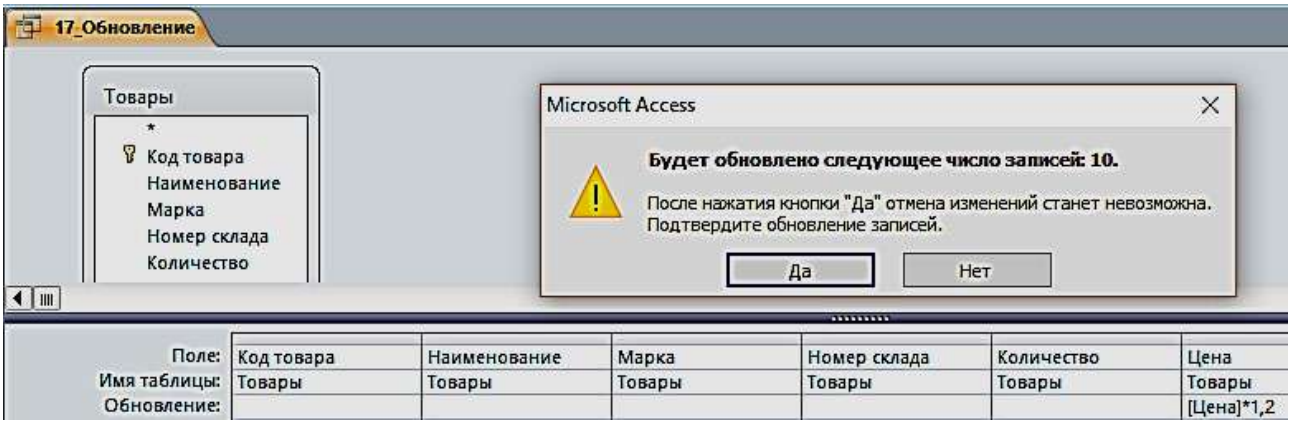


Рис. 3.12. Запрос на обновление в режиме Конструктора

Рис. 3.13. С правой стороны результат обновления таблицы

Цена
319 463,00 ₽
357 487,00 ₽
225 000,00 ₽
240 000,00 ₽
84 193,00 ₽
58 764,00 ₽
50 625,00 ₽
30 000,00 ₽
16 680,00 ₽
12 500,00 ₽

17_Обновление

Цена
383 355,60 ₽
428 984,40 ₽
270 000,00 ₽
288 000,00 ₽
101 031,60 ₽
70 516,80 ₽
60 750,00 ₽
36 000,00 ₽
20 016,00 ₽
15 000,00 ₽

Задание 6. Создать запрос на создание новой таблицы «18_Создание таблицы»:

1. Создайте запрос на выборку по всем таблицам путем отбора нужных полей. Присвойте ему имя и проверьте правильность его выполнения.

2. В области навигации выделите названный запрос и с помощью команды контекстного меню откройте его в режиме Конструктора.

3. Преобразуйте этот запрос на выборку в запрос на создание таблицы, выполнив команду **Создание таблицы** в группе **Тип запроса** на вкладке Конструктора, или выбрав команду контекстного меню запроса **Тип запроса – Создание таблицы.**

4. В окне **Создание таблицы** введите имя создаваемой таблицы «Объединенная» (рис. 3.14).

5. Для того чтобы просмотреть, какие записи будут помещены в новую таблицу, щелкните по кнопке **Режим** на ленте Конструктора запросов в группе **Результаты**.

6. Выполните запрос. Откроется окно сообщений с запрашиваемым разрешением (рис. 3.15). Подтвердите согласие на создание новой таблицы. После этого таблицу можно увидеть в списке таблиц области навигации (рис. 3.16).

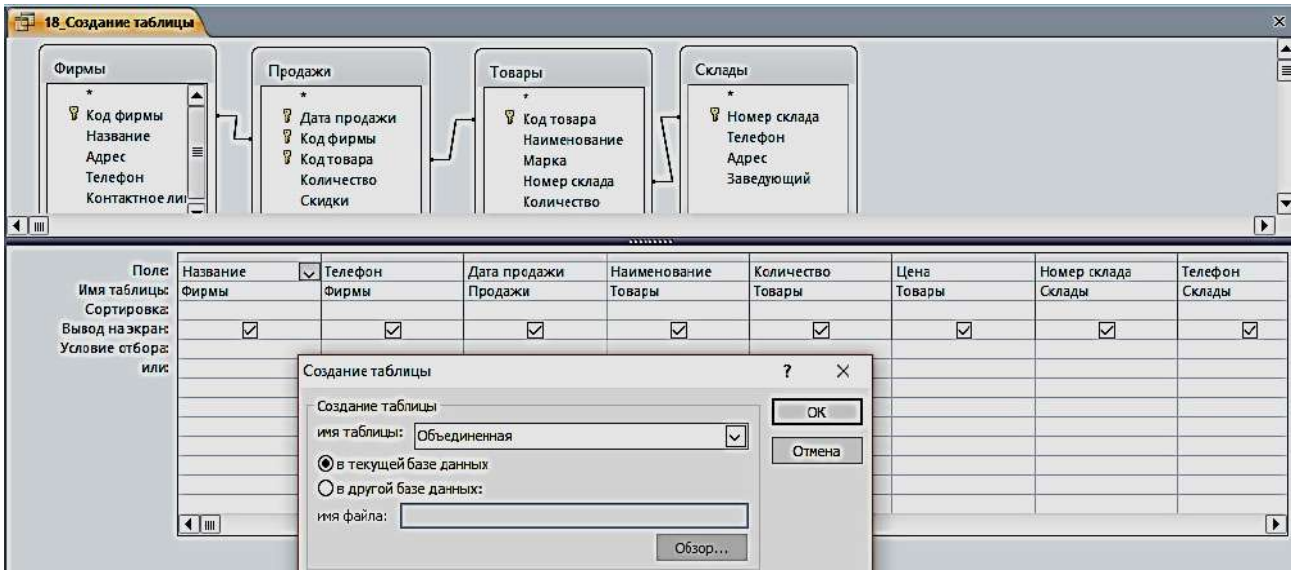


Рис. 3.14. Определение имени таблицы, создаваемой в запросе

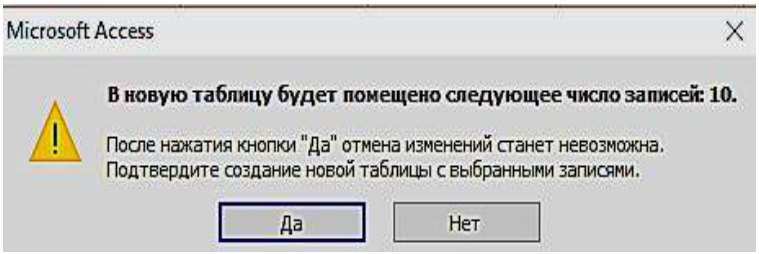


Рис. 3.15. Окно сообщений

Объединенная

Название	Фирмы_Телефон	Дата продажи	Наименование	Количество	Цена	Номер склада	Склады_Телефон
ООО "Геомар Недра"	4956180510	19.01.2018	Тахеометр	7	428 984,40 ₽	1	3433818888
ООО "Геомар Недра"	4956180510	27.01.2018	Тахеометр	5	383 355,60 ₽	1	3433818888
ООО "Навгеоком"	3432535355	25.01.2018	Тахеометр	5	288 000,00 ₽	2	3433795162
ООО "Навгеоком"	3432535355	02.02.2018	Тахеометр	6	270 000,00 ₽	2	3433795162
ООО "А-ГЕО"	9040957045	20.01.2018	Теодолит	9	101 031,60 ₽	3	3432751822
ООО "А-ГЕО"	9040957045	30.01.2018	Теодолит	8	60 750,00 ₽	3	3432751822
ООО "А-ГЕО"	9040957045	10.02.2018	Теодолит	10	36 000,00 ₽	3	3432751822
ООО "А-ГЕО"	9040957045	15.02.2018	Теодолит	9	101 031,60 ₽	3	3432751822
ГеоСтройПрибор	4732712144	15.01.2018	Нивелир	18	15 000,00 ₽	4	3433102222
ГеоСтройПрибор	4732712144	05.02.2018	Нивелир	15	20 016,00 ₽	4	3433102222

Рис. 3.16. Результат запроса на создание новой таблицы

Задание для самостоятельной работы

1. По таблице «Товары» сформировать запрос по наименованию товаров на букву Т.
2. По таблице «Товары» сформировать запрос на выборку товаров, цена которых более 100 000 рублей и количество больше или равно 5.
3. По таблице «Продажи» сформировать запрос на выборку товаров, скидки которых равны 5, за период меньше или равный 02 февраля 2018 г.
4. По таблице «**Товары**» сформировать запрос с вычисляемым полем, вычислить цену с НДС, при ставке 18 %.
5. Создать параметрический запрос, в котором выдавалось бы сообщение «**Введите наименование товара**».
6. По таблице «**Товары**» сформировать запрос с вычисляемым полем, об увеличении цены на 10 % в январе месяце.
7. По таблице «**Товары**» сформировать запрос с вычисляемым полем, вычислить сумму за январь.
8. По таблице «**Товары**» сформировать запрос с вычисляемым полем, найти увеличение количества нивелиров в 2 раза.
9. Создать новую таблицу, состоящую из таблиц «**Продажи**» и «**Фирмы**», с полями на ваш выбор (поле – количество обязательно).
10. По новой созданной таблице создать запрос на обновление количества товара в 3 раза.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4
Работа с формами

Формы являются основой разработки диалоговых приложений пользователя с базой данных. Работая с формой, пользователь может добавлять, удалять и изменять записи таблиц, получать расчетные данные. Форма состоит из элементов управления, которые отображают поля таблиц и графические элементы, не связанные с полями таблиц. Элементы управления предназначены для разработки макета формы: размещение полей таблиц и запросов, надписей, внедряемых объектов (рисунков, диаграмм), вычисляемых полей, кнопок, выполняющих печать и открывающих др. объекты или задачи.

Однотабличная форма предназначена для загрузки, просмотра и корректировки данных одной таблицы. Источником данных такой формы служит единственная таблица. Она может быть создана одним щелчком мыши с помощью команд автоматического создания формы: **Форма, Разделенная форма** или **Несколько элементов**, размещенных на вкладке **Создание** в группе **Формы** (рис. 4.1).

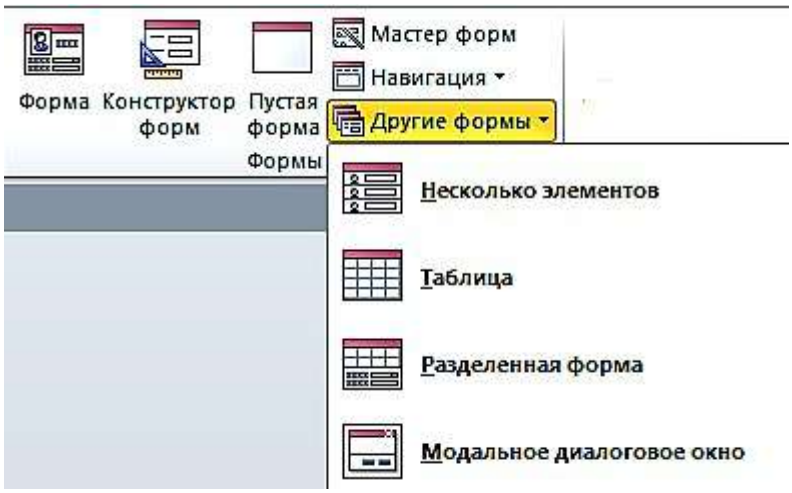


Рис. 4.1. Команды группы формы на вкладке ленты **Создание**

Задание 1. Создать однотабличную форму «**Товары для ввода, просмотра и корректировки данных**» таблицы «**Товары**». Чтобы источником записей формы стала таблица «**Товары**», выберите её в области навигации и выполните команду форма на вкладке **Создание**. Эта команда обеспечит автоматическое создание формы на основе только выбранной таблицы (рис. 4.2).

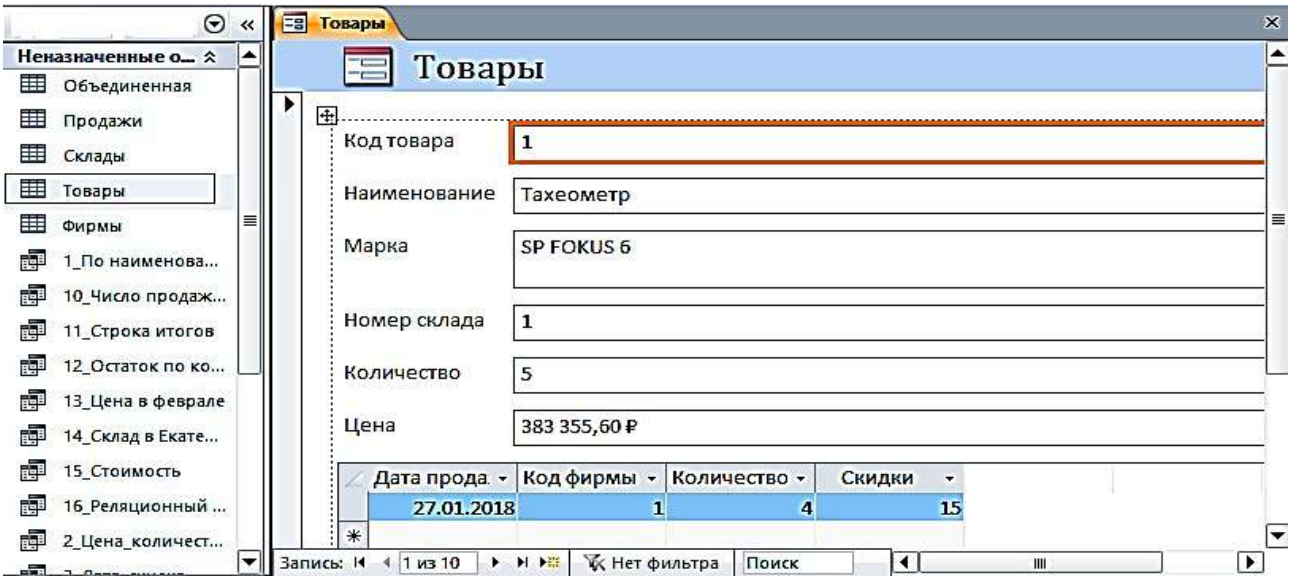


Рис. 4.2. Форма, полученная по команде **Форма**, для работы с таблицей «**Товары**»

Условное форматирование элементов управления

Для изменения внешнего вида элемента управления в форме**,** в зависимости от одного или нескольких условий используйте условное форматирование.

Задание 2. Изменить в форме «**Товары**» цвет денежных значений в поле «**Цена**» на красный, заливку на желтый, шрифт жирный, когда они оказываются выше заданной величины, например, 100 000 руб.

1. Выберите поле Цена, в котором нужно произвести изменения. На вкладке ленты **Формат** в группе **Форматирование элементов управления** выберите команду **Условное форматирование**. Откроется диалоговое окно **Диспетчер правил условного форматирования** (рис. 4.3).

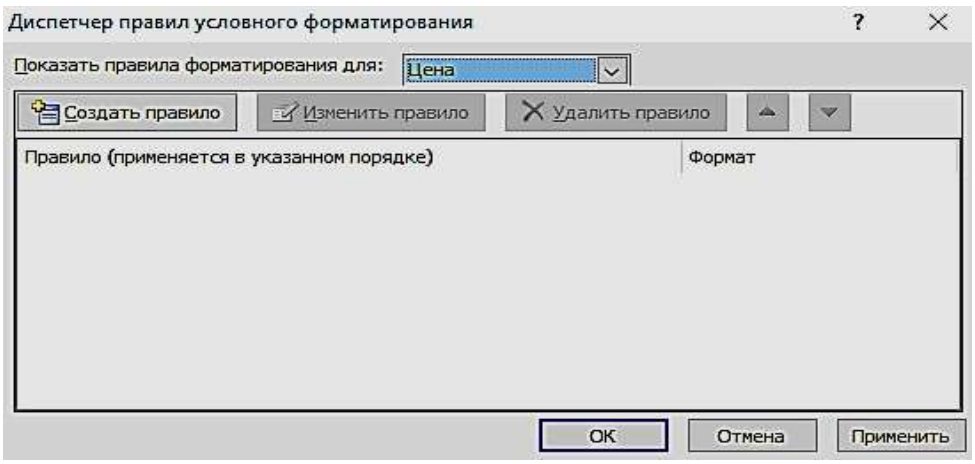


Рис. 4.3. Окно с пустым списком правил форматирования

2. Чтобы создать первое правило условного форматирования щелкните по кнопке **Создать правило**.

3. В окне **Новое правило форматирования** выберите тип правила и сформируйте описание правил, согласно которым будет производиться заданное форматирование поля.

4. В первом поле со списком выберите пункт **Значения поля**, во втором выберите тип сравнения – **больше** и введите постоянное значение в третье поле – 100000, не используя знака денежных единиц.

5. Выберите начертание шрифта, цвет и другие параметры форматирования. Нажмите кнопку ОК (рис. 4.4).

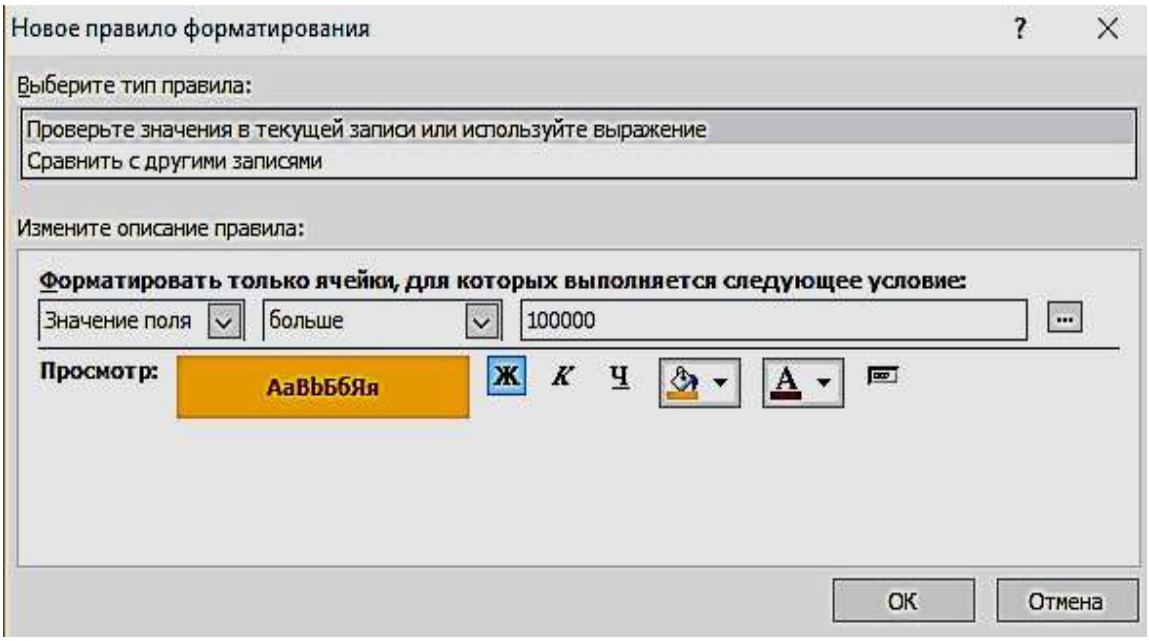


Рис. 4.4. Окно определения условий форматирования

Задание 3. Создать однотабличную форму «**Склады**». Для создания выбрать таблицу «**Склады**», использовать команду **Форма**, автоматически будет создана форма, содержащая встроенную подчиненную таблицу «**Товары**». Источником записей главной формы будет таблица «**Склады**». Такое поведение команды **Форма** вызвано тем, что таблица «**Склады**» имеет подчиненную таблицу «**Товары**», с которой она находиться в отношении 1:∞, и эта связь определена в схеме данных (рис. 4.5).

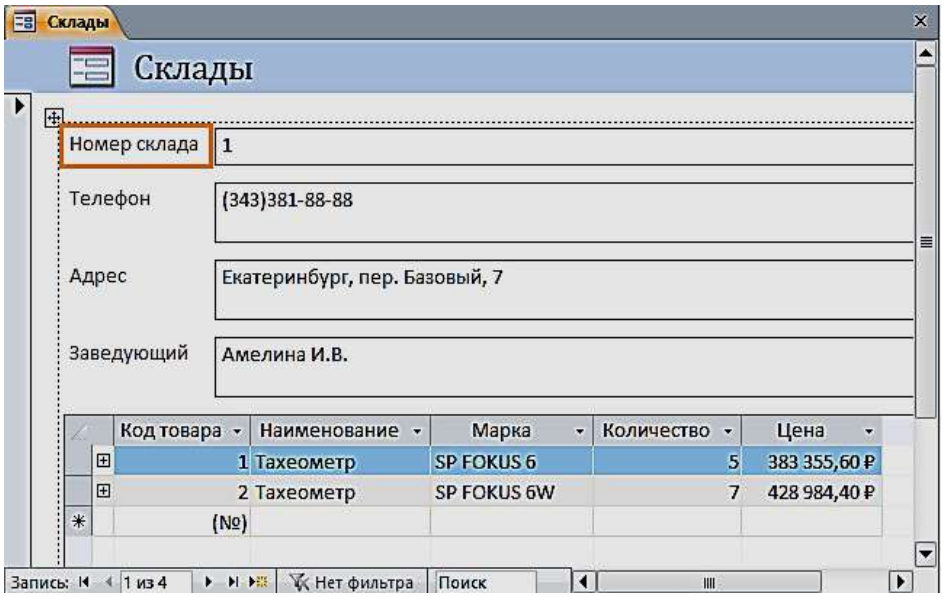


Рис. 4.5. Форма по таблице «**Склады**» с встроенной подчиненной «**Товары**»

Создание разделенной формы

Разделенная форма позволяет синхронно отображать данные одного источника в двух представлениях: в режиме формы и в режиме таблицы.

Задание 4. Создать однотабличную разделенную форму для работы с данными таблицы «**Продажи**». Выберите таблицу «**Продажи**» в области навигации и выполните команду **Разделенная форма** на вкладке ленты **Создание** в группе **Формы**. Эта команда обеспечит автоматическое создание формы на основе только одной выбранной таблицы. Созданная форма отобразится в режиме макета (рис. 4.6).

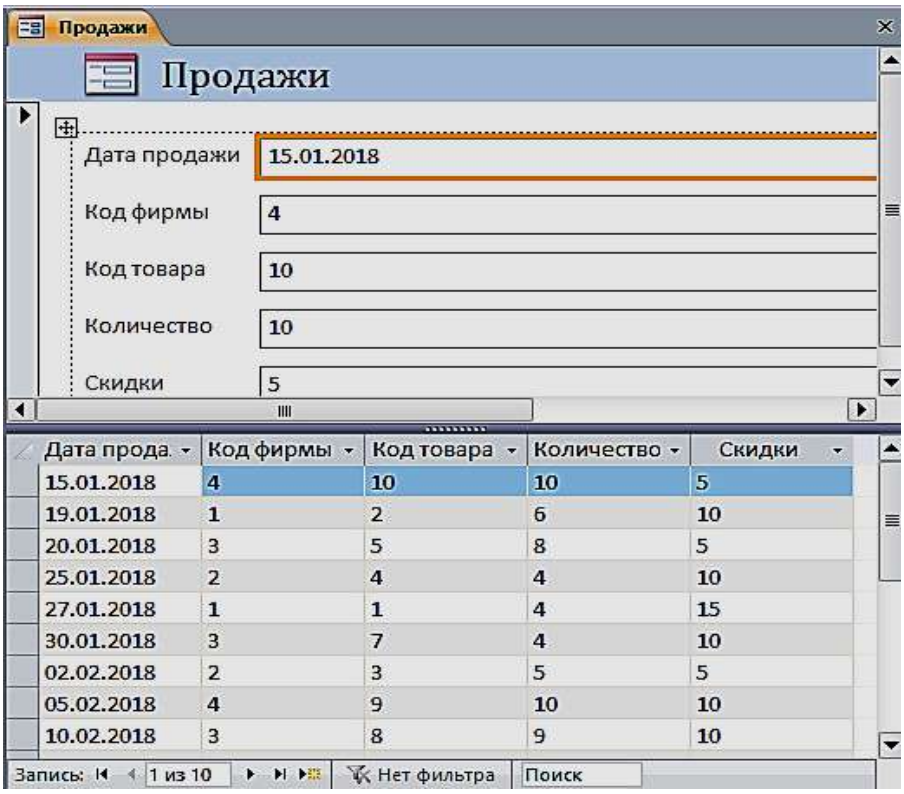


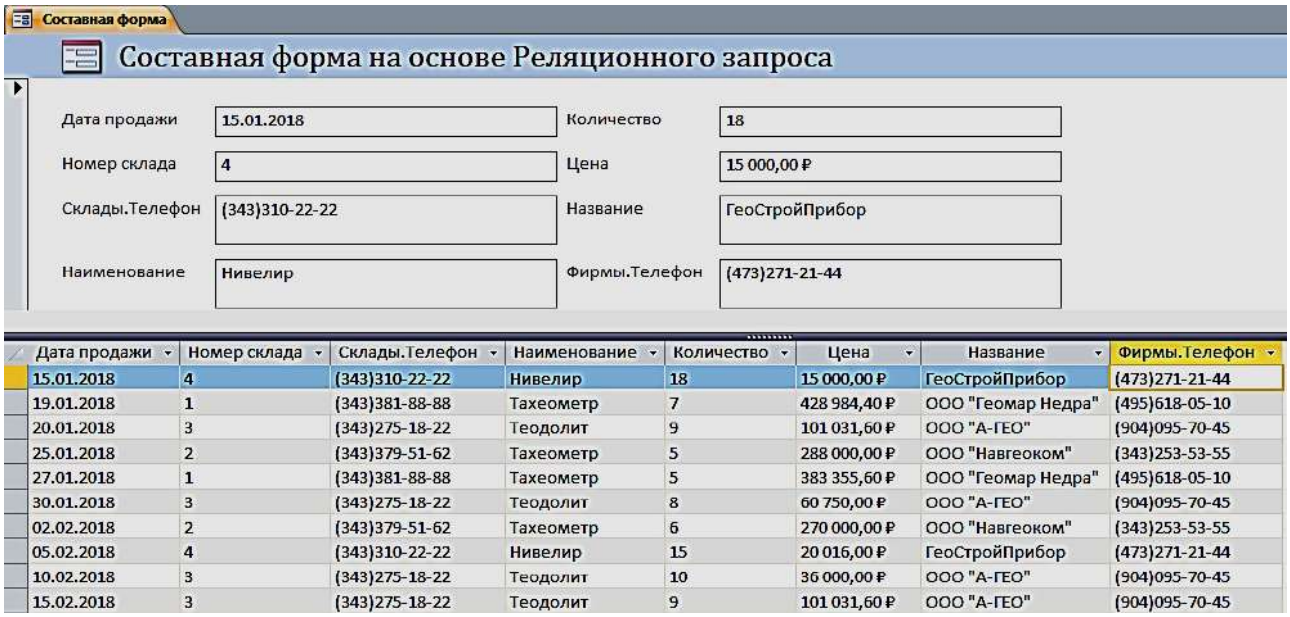
Рис. 4.6. Разделенная форма «**Продажи**»

Многотабличные формы

Многотабличная форма создается для работы с данными нескольких взаимосвязанных таблиц. Источником данных такой формы является многотабличный запрос. При этом форма может быть простой, отображающей одну запись в столбик, или ленточной, отображающей все записи в табличном виде с надписями в заголовке формы. Для такой формы могут быть использованы команды **Форма** или **Несколько элементов**.

Многотабличная форма может быть составной: состоять из главной формы и одной или нескольких подчиненных включаемых форм.

Задание 5. Создать составную форму воспользовавшись реляционным запросом. Выберите запрос «**16_реляционный запрос**» в области навигации и выполните команду **Форма** на вкладке **Создание**. Эта команда обеспечит автоматическое создание формы на основе выбранного запроса (рис. 4.7). В режиме Конструктора можно изменить заголовок.



Дата продажи	Номер склада	Склады.Телефон	Наименование	Количество	Цена	Название	Фирмы.Телефон
15.01.2018	4	(343)310-22-22	Нивелир	18	15 000,00 ₽	ГеоСтройПрибор	(473)271-21-44
19.01.2018	1	(343)381-88-88	Тахеометр	7	428 984,40 ₽	ООО "Геомар Недра"	(495)618-05-10
20.01.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	9	101 031,60 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45
25.01.2018	2	(343)379-51-62	Тахеометр	5	288 000,00 ₽	ООО "Навгеоком"	(343)253-53-55
27.01.2018	1	(343)381-88-88	Тахеометр	5	383 355,60 ₽	ООО "Геомар Недра"	(495)618-05-10
30.01.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	8	60 750,00 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45
02.02.2018	2	(343)379-51-62	Тахеометр	6	270 000,00 ₽	ООО "Навгеоком"	(343)253-53-55
05.02.2018	4	(343)310-22-22	Нивелир	15	20 016,00 ₽	ГеоСтройПрибор	(473)271-21-44
10.02.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	10	36 000,00 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45
15.02.2018	3	(343)275-18-22	Теодолит	9	101 031,60 ₽	ООО "А-ГЕО"	(904)095-70-45

Рис. 4.7. Составная форма

Создание многотабличной формы с помощью мастера

Основным средством создания многотабличной формы можно считать мастер форм, который, запросив у пользователя сведения о включаемых в форму полях из нескольких взаимосвязанных таблиц и запросов, создает составную или одиночную форму.

Задание 6. С помощью мастера создайте форму для работы с данными о продажах товаров

Для вызова мастера форм выполните на вкладке ленты **Создание** в группе **Формы** команду **Мастер форм**. Отобразится окно мастера **Создания форм**, представленное на рис. 4.8.

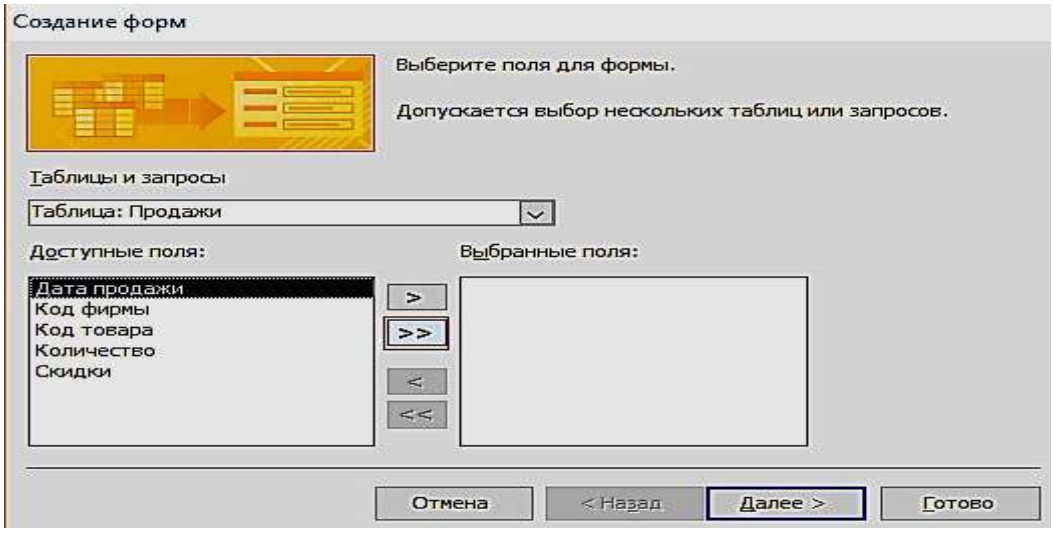


Рис. 4.8. Выбор таблиц и полей для создаваемой формы

Если предварительно в области навигации не была выбрана таблица «**Продажи**», выберите её в раскрывающемся списке **Таблицы и запросы** диалогового окна мастера. Затем отберите из списка **Доступные поля,** в нашем случае все, кроме поля «**Скидки**» (рис. 4.9).

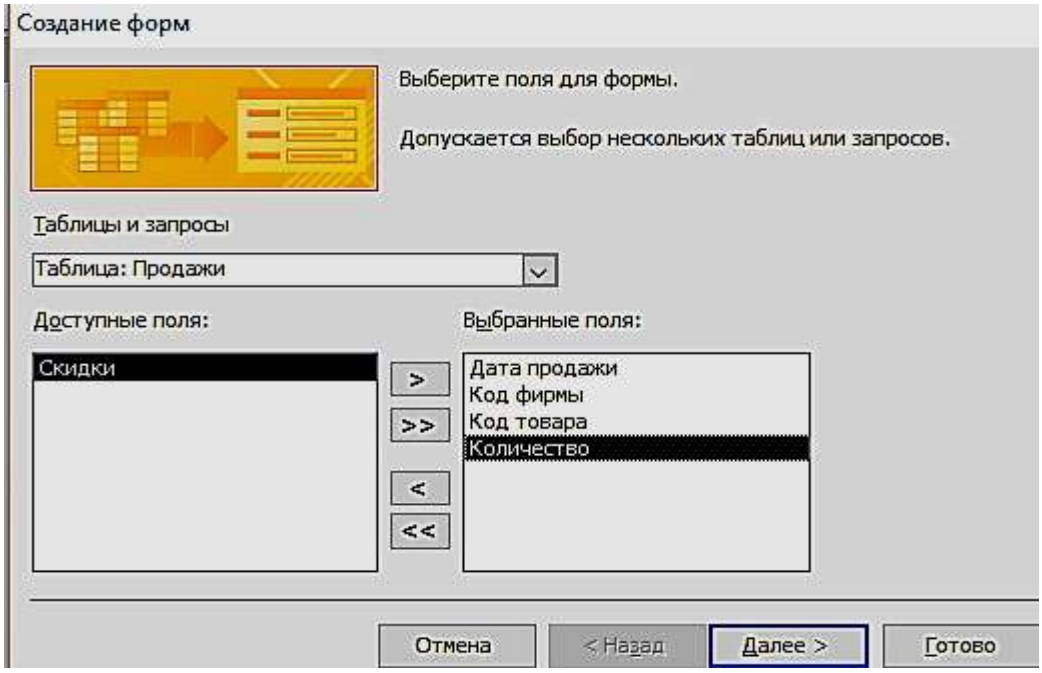


Рис. 4.9. Выбранные поля таблицы «**Продажи**» для создаваемой формы

Переходим к выбору полей из таблицы «**Товары**». Перетаскиваем все поля, кроме поля Код товара. После выбора полей для обеих таблиц и нажатия кнопки Далее в окне создание форм в списке **Выберите тип представления данных** надо выделить имя таблицы Продажи и щелкнуть по кнопке «**Далее**» (рис.
4.10).

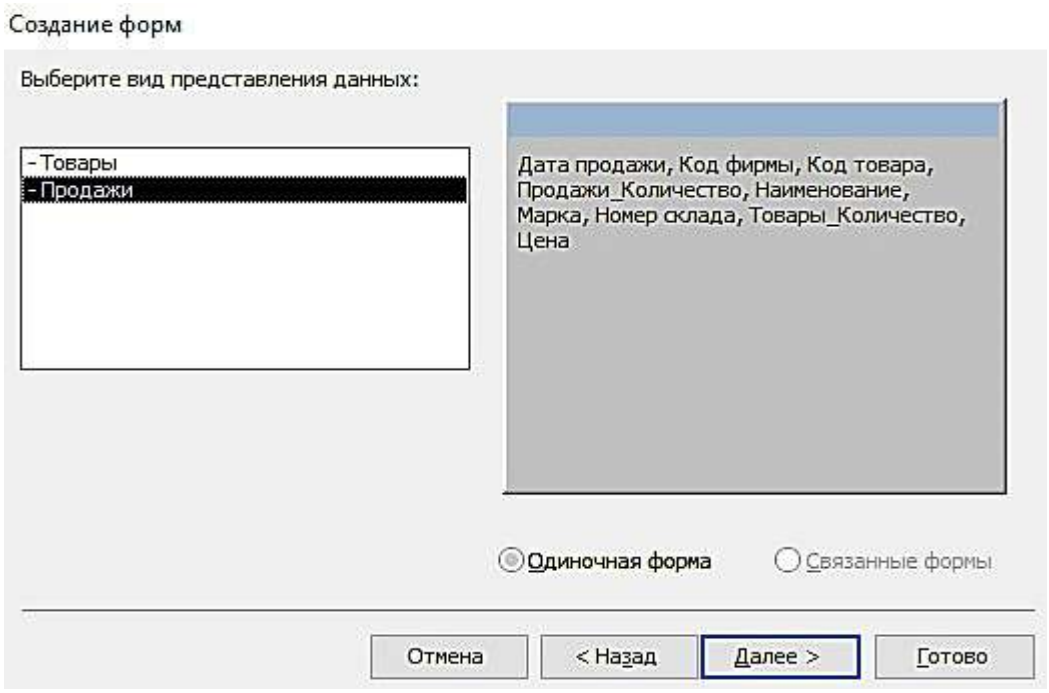


Рис. 4.10. Выбор вида представления данных

В следующем диалоговом окне предоставляется возможность выбрать внешний вид формы и нажать кнопку «**Готово**» (рис. 4.11).

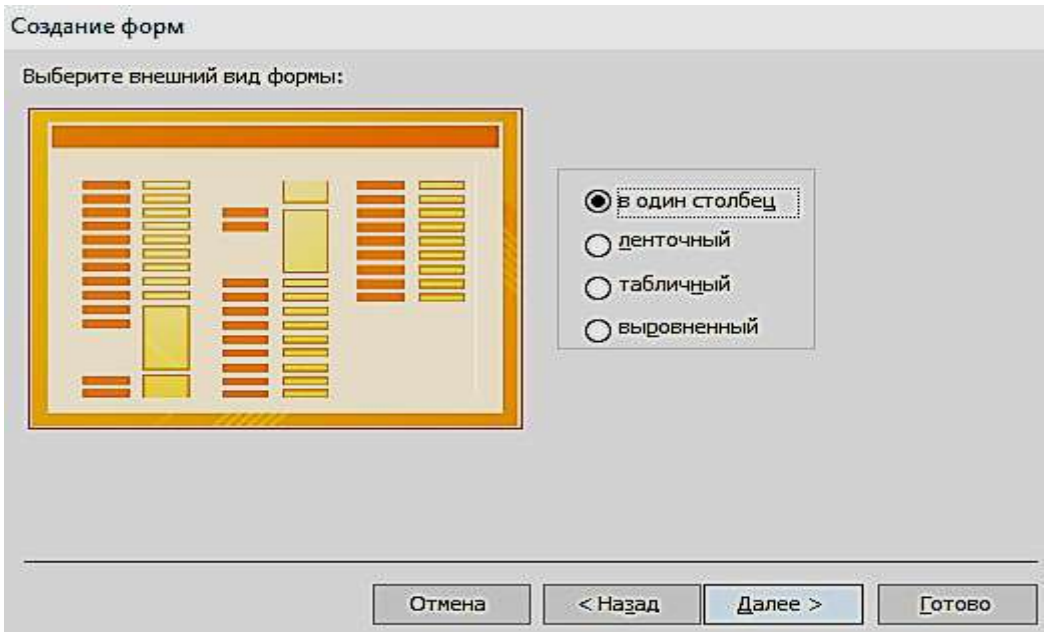


Рис. 4.11. Выбор вида формы в один столбец

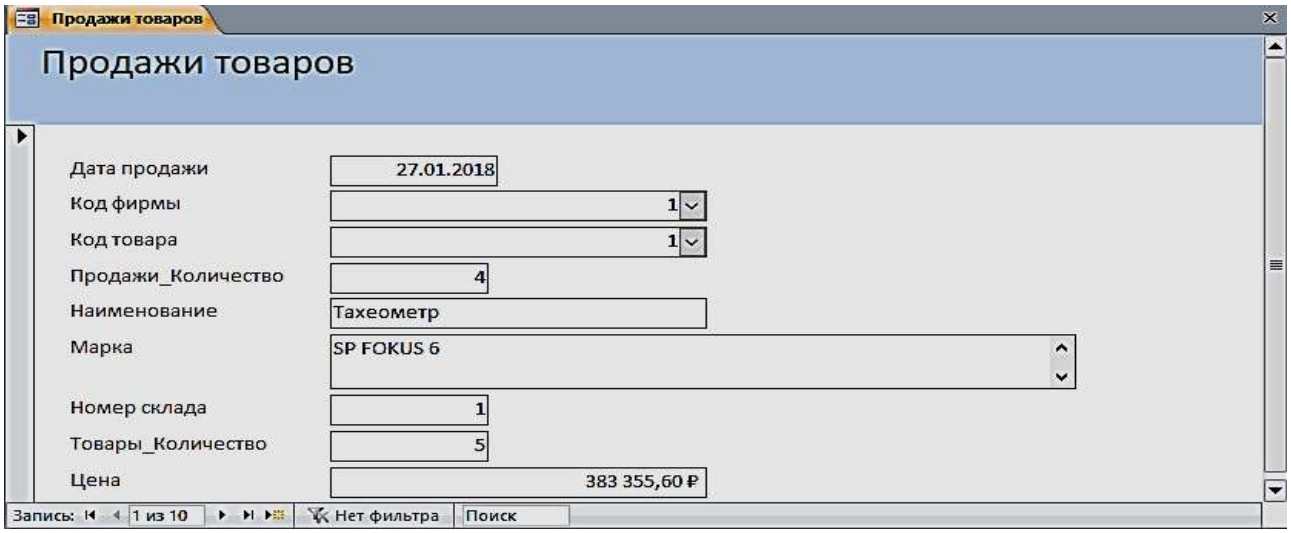


Рис. 4.12. Форма, открытая для просмотра, корректировки и ввода данных

Одиночная многотабличная форма

Одиночную форму, включающую поля из нескольких связанных таблиц, позволяет быстро построить инструмент **Пустая форма.** Выполните команду **Пустая форма** на вкладке ленты **Создать** в группе **Формы**. Откроется пустая форма в режиме макета и отобразится область **Список полей**. В списке перечислены все таблицы базы данных, и предоставляется возможность открыть список полей каждой из них (рис. 4.13). Чтобы добавить поле в форму, щелкните на нем двойным щелчком или перетащите его в форму. Для отображения каждого поля Access создает в форме соответствующий элемент управления и привязывает его к полю. Кроме того, для элемента управления создается присоединенная надпись.

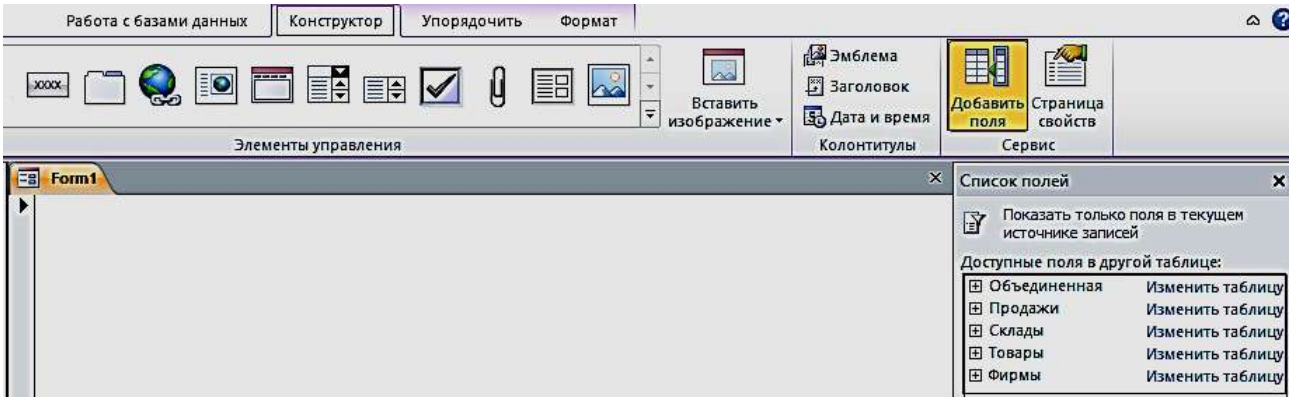


Рис. 4.13. Область **Список полей** при создании одиночной формы

Задание 7. Создать одиночную многотабличную форму для просмотра всех данных базы. Выполните команду **Пустая форма.** В области **Список полей** откройте список полей таблицы «**Продажи**», щелкнув знак «Плюс»

рядом с её именем. Добавьте в форму необходимые поля (Дата продажи, Код фирмы, Код товара, Количество, Скидки). Далее последовательно добавляйте поля из таблицы «**Товары**» (Наименование, Марка, Цена), затем из таблицы «**Склады**» (Номер склада, Телефон, Адрес, Заведующий) и из таблицы «**Фирмы поля**» – (Название, Адрес, Телефон, Контактное лицо, Должность). Сохранить форму под именем «Общие данные».

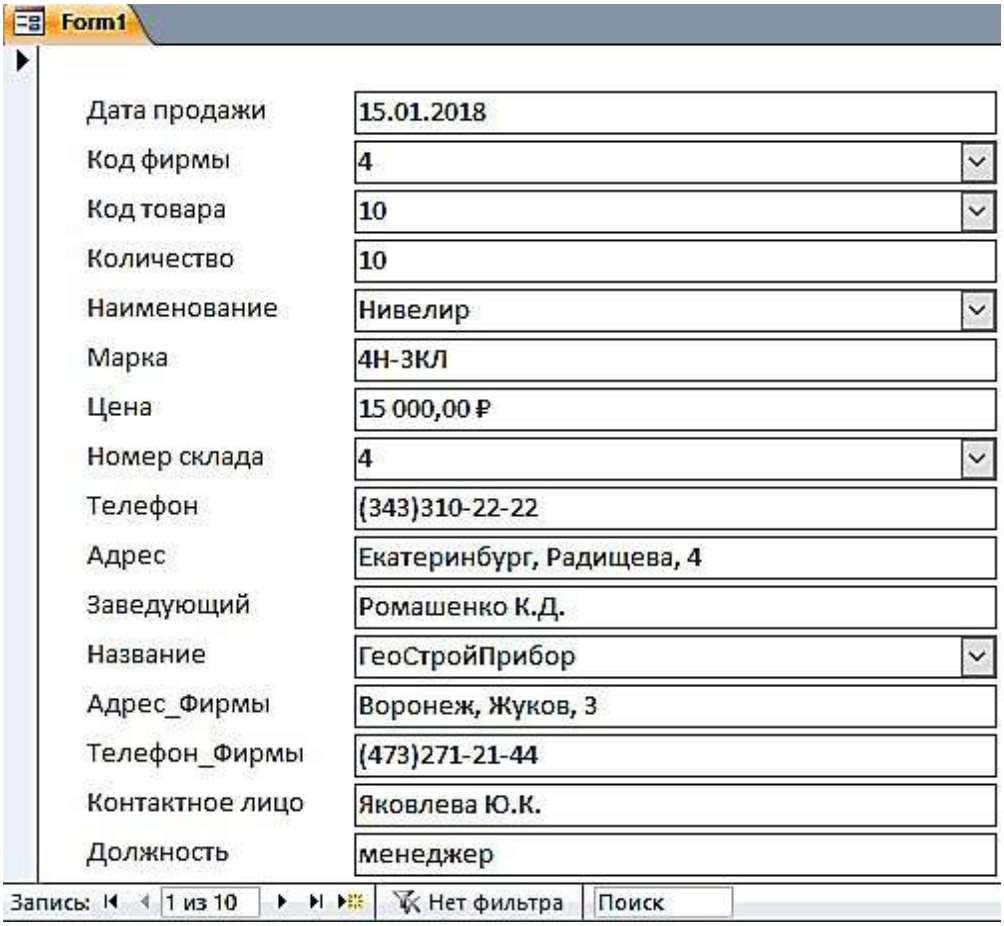


Рис. 4.14. Форма «**Общие данные**», созданная с помощью инструмента **Пустая форма**

Задание 8. Создать одиночную форму с помещенной в неё гистограммой

Для этого откройте таблицу «**Товары**». В группе **Импорт и связи** на вкладке **Внешние данные** выберите на ленте **Экспорт в таблицу Excel** (рис. 4.15).

Код товара	Наименование	Марка	Номер склада	Количество	Цена
1	Тахеометр	SP FOKUS 6	1	5	383 355,60р.
2	Тахеометр	SP FOKUS 6W	1	7	428 984,40р.
3	Тахеометр	Soutn NTS-365 R	2	6	270 000,00р.
4	Тахеометр	Soutn NTS-362 R	2	5	288 000,00р.
5	Теодолит	3Т2КП	3	9	101 031,60р.
6	Теодолит	4Т15П	3	5	70 516,80р.
7	Теодолит	4Т30П	3	8	60 750,00р.
8	Теодолит	VEGA TEO 5	3	10	36 000,00р.
9	Нивелир	4Н -2КЛ	4	15	20 016,00р.
10	Нивелир	4Н-3КЛ	4	18	15 000,00р.

Рис. 4.15. Окно экспорта таблицы «**Товары**» на лист Excel

Выберите место назначения для экспорта таблицы «**Товары**», для этого нажмите на кнопку **Обзор**, выберите соответствующую папку (рис. 4.16, 4.17).

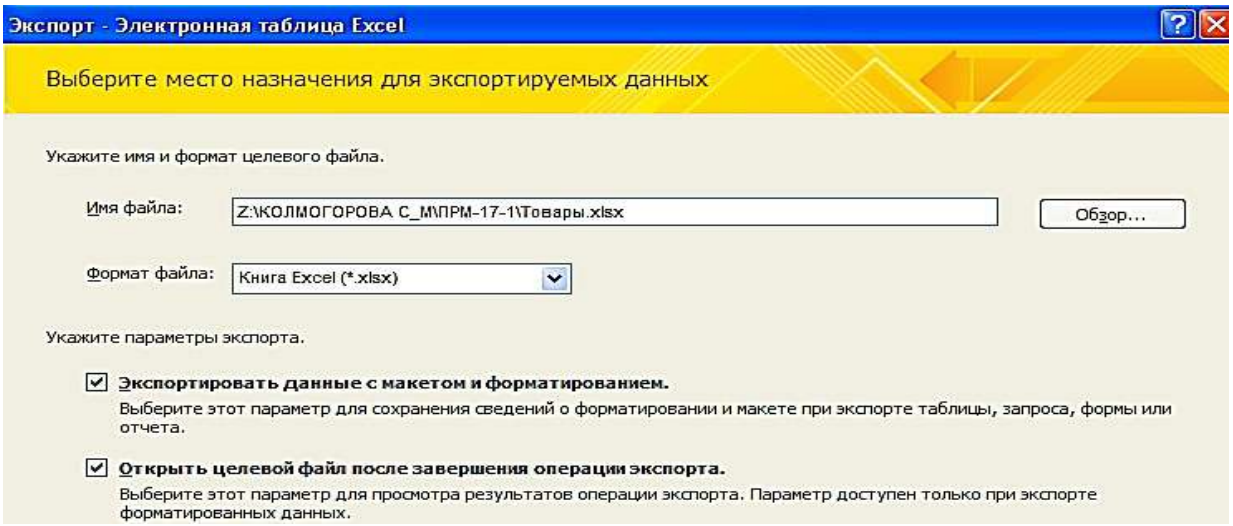


Рис. 4.16. Окно выбора места назначения для экспорта таблицы «**Товары**»

	A	B	C	D	E	F
1	Код товара	Наименование	Марка	Номер склада	Количество	Цена
2	1	Тахеометр	SP FOKUS 6	1	5	383 355,60р.
3	2	Тахеометр	SP FOKUS 6W	1	7	428 984,40р.
4	3	Тахеометр	Soutn NTS-365 R	2	6	270 000,00р.
5	4	Тахеометр	Soutn NTS-362 R	2	5	288 000,00р.
6	5	Теодолит	3Т2КП	3	9	101 031,60р.
7	6	Теодолит	4Т15П	3	5	70 516,80р.
8	7	Теодолит	4Т30П	3	8	60 750,00р.
9	8	Теодолит	VEGA TEO 5	3	10	36 000,00р.
10	9	Нивелир	4Н -2КЛ	4	15	20 016,00р.
11	10	Нивелир	4Н-3КЛ	4	18	15 000,00р.

Рис. 4.17. Таблица «**Товары**» в Excel, экспортируемая из Access

Построение гистограммы по колонкам «**Наименование**» и «**Цена**» (рис. 4.18).

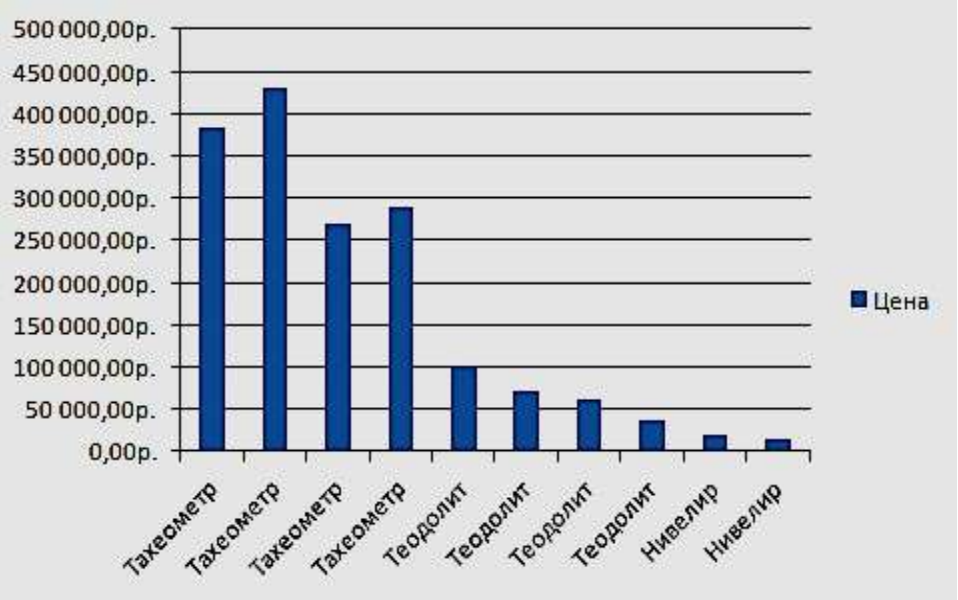


Рис. 4.18. Гистограмма, соответствующая таблице «**Товары**»

Скопируйте гистограмму в Excel. В Access выполните команду **Пустая форма** на вкладке ленты **Создать** в группе **Формы**. В режиме «**Конструктор**» произвести вставку гистограммы. Сохранить форму под названием **Гистограмма** (рис. 4.19).

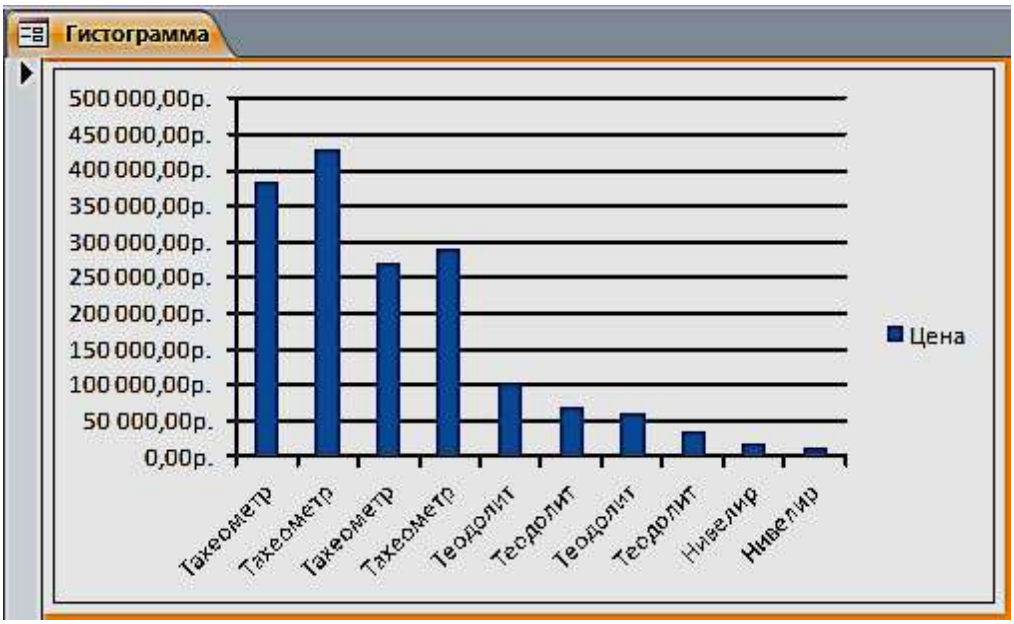


Рис. 4.19. Форма «Гистограмма»

Задание для самостоятельной работы

1. Изменить в форме «**Товары**» цвет денежных значений в поле «**Цена**» на зеленый, заливку на светло-зеленый, начертание шрифта – жирный курсив, когда они оказываются меньше или равны 80000 руб.
2. Создать форму «**Фирмы**» с подчиненной «**Продажи**».

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5
Работа с отчетами

Средства Access по разработке отчетов предназначены для конструирования макета отчета, в соответствии с которым осуществляется вывод данных из определенного источника записей в виде выходного печатного документа.

Отчет может создаваться с помощью Мастера или в режиме Конструктора отчетов.

Задание 1. Выберем в области навигации таблицу «**Фирмы**», данные из которой будут источником записей отчета. На вкладке ленты **Создание** в группе **Отчеты** выполнить команду **Отчет**.

Access создаст отчет и отобразит его в режиме макета (рис. 5.1). В отчете будут представлены все записи таблицы «**Фирмы**». Размещение полей таблицы – источника записей отчета – в разделах отчета представлено на рис. 5.2.

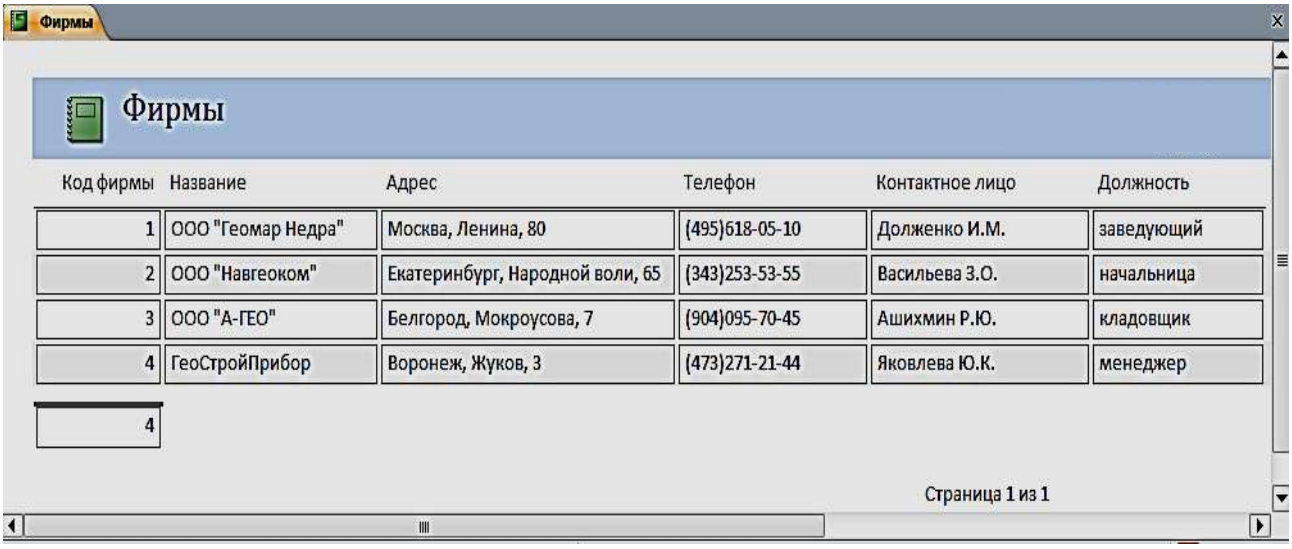


Рис. 5.1. Отчет в режиме «**Макета**»

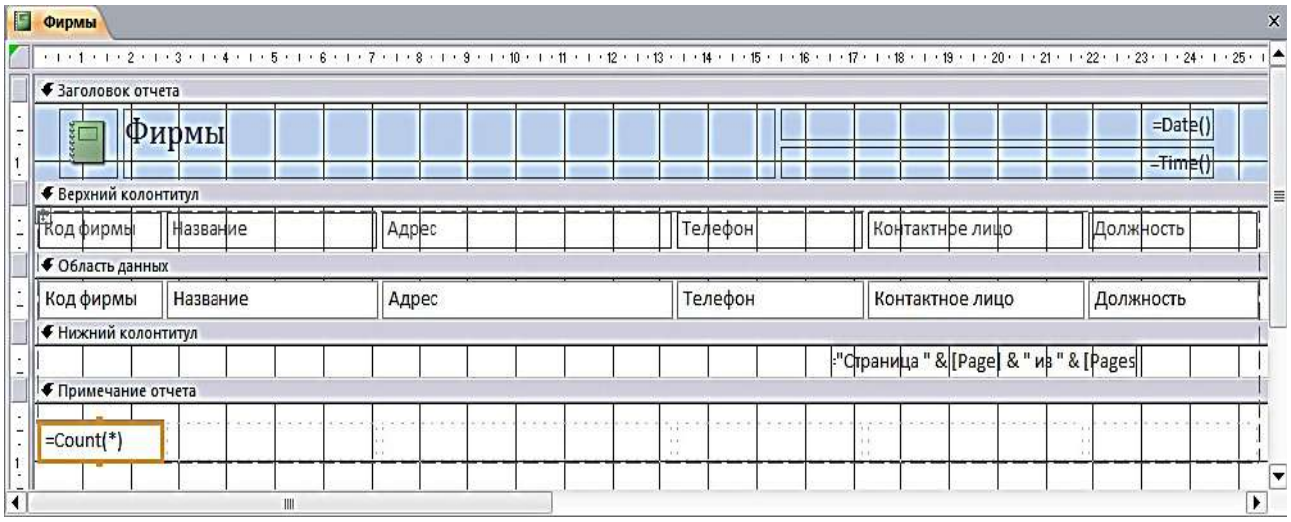


Рис. 5.2. Разделы однотабличного отчета в режиме Конструктора

В режиме макета легко привести созданный отчет в соответствие с заданными требованиями. Измените название отчета на «Контакты». Для этого выполните двойной щелчок на нем и введите новое название. Выделите макет отчета и измените заливку, размер шрифта, выбрав его на вкладке **Главная** в группе **Форматирование текста** или на вкладке **Формат** в группе **Шрифт.** Для изменения параметров страницы выполняйте команды соответствующей вкладки ленты. Пунктирной линией в отчете отмечена граница полей страницы. Отображение этой линии регулируется кнопкой **Показать поля** на вкладке ленты **Параметры страницы.** Для выбора размеров полей страницы может быть использована коллекция, отображаемая при нажатии кнопки **Поля.** На этой же вкладке можно выбрать размер бумаги, ориентацию страницы и ряд др. параметров (рис. 5.3).

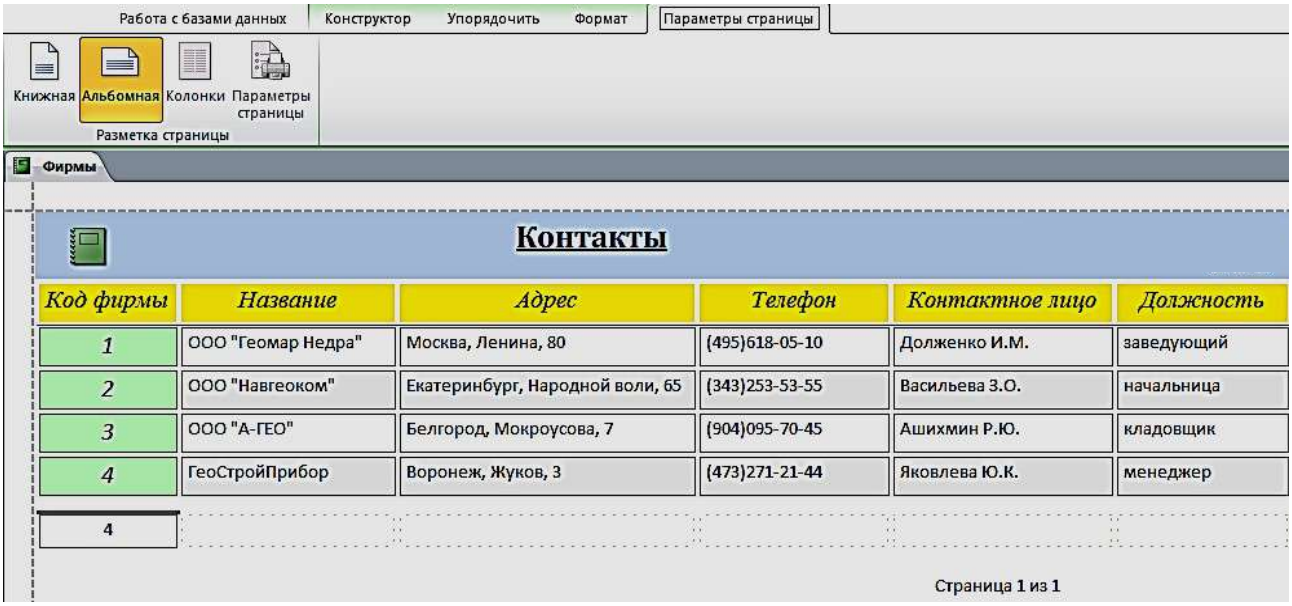


Рис 5.3. Отформатированный отчет в режиме Макета

Задание 2. Выберем в области навигации форму **Продажи товаров**, данные из которой будут источником записей отчета. На вкладке ленты **Создание** в группе **Отчеты** выполнить команду **Отчет**. Для группировки данных по дате продажи выполним команду **Группировка, сортировка и итоги.** Выберем для предлагаемого уровня группировки поле «**Дата продажи**». Откроем список, щелкнув на параметре **по кварталам**, и выберем **по месяцам.** Для закрытия списка щелкните на любом месте за его пределами (рис. 5.4, 5.5).

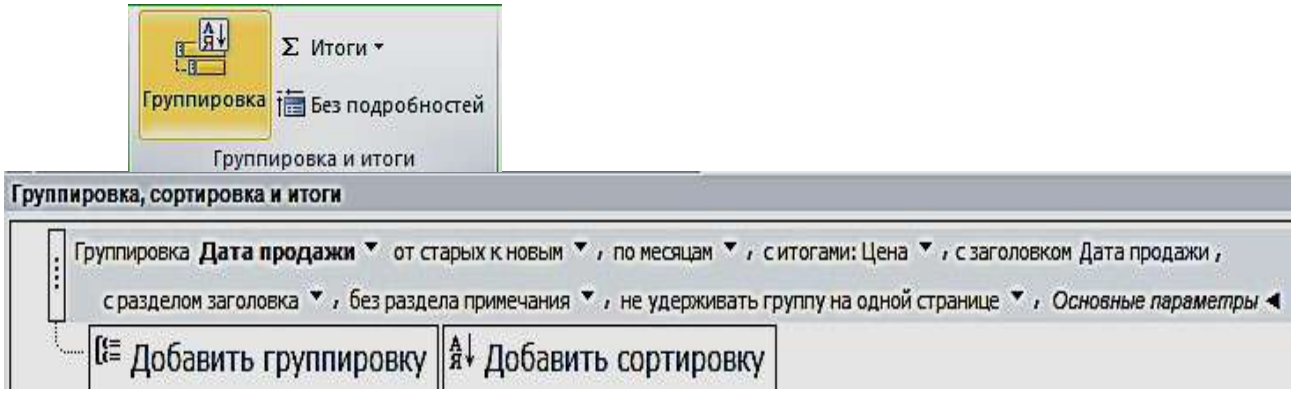
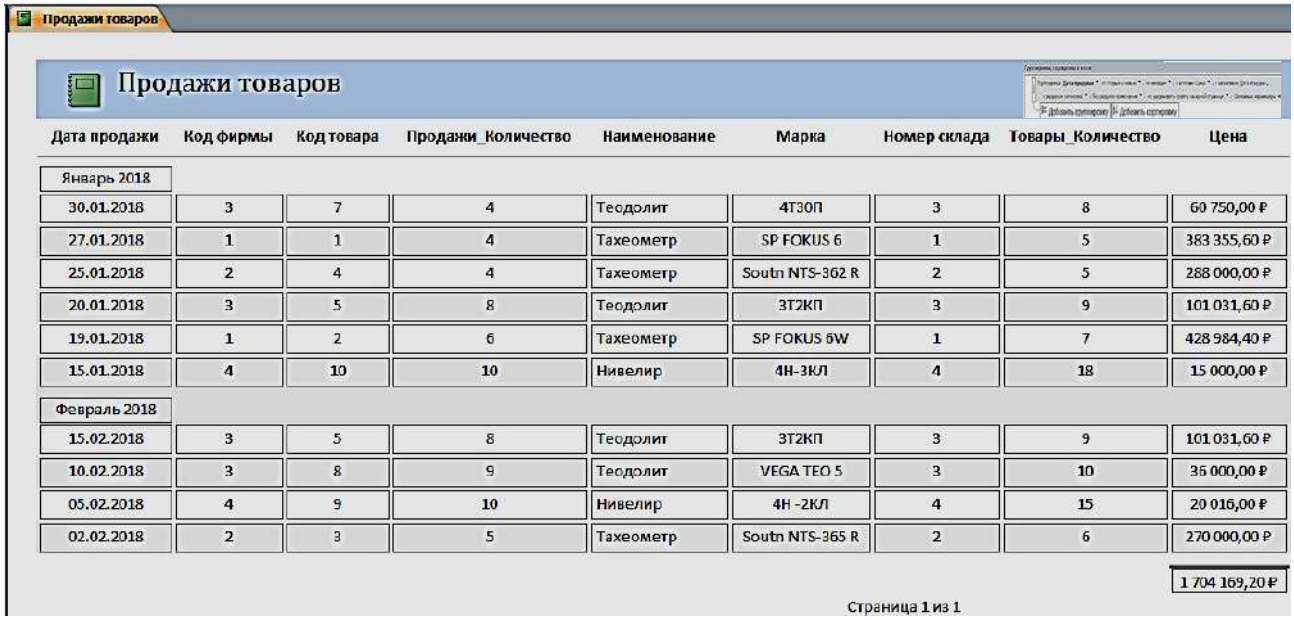


Рис. 5.4. Выбор для поля с датой группировки по месяцам



Продажи товаров

Дата продажи	Код фирмы	Код товара	Продажи_Количество	Наименование	Марка	Номер склада	Товары_Количество	Цена
Январь 2018								
30.01.2018	3	7	4	Теодолит	4Т30П	3	8	60 750,00 ₽
27.01.2018	1	1	4	Тахеометр	SP FOKUS 6	1	5	383 355,60 ₽
25.01.2018	2	4	4	Тахеометр	Soutn NTS-362 R	2	5	288 000,00 ₽
20.01.2018	3	5	8	Теодолит	3Т2КП	3	9	101 031,60 ₽
19.01.2018	1	2	6	Тахеометр	SP FOKUS 5W	1	7	428 984,40 ₽
15.01.2018	4	10	10	Нивелир	4Н-3КЛ	4	18	15 000,00 ₽
Февраль 2018								
15.02.2018	3	5	8	Теодолит	3Т2КП	3	9	101 031,60 ₽
10.02.2018	3	8	9	Теодолит	VEGA TEO 5	3	10	36 000,00 ₽
05.02.2018	4	9	10	Нивелир	4Н -2КЛ	4	15	20 016,00 ₽
02.02.2018	2	3	5	Тахеометр	Soutn NTS-365 R	2	6	270 000,00 ₽
								1 704 169,20 ₽

Страница 1 из 1

Рис 5.5. Форма с датой группировки по месяцам

Задание для самостоятельной работы

Создать отчет по таблице «**Объединенная**», изображенного на рис. 5.6.

ОТЧЕТ ПРОДАЖИ

Дата продажи - по месяцам	Название	Фирмы_Телефон	Дата продажи	Наименование	Количество	Цена	Номер склада	Склады_Телефон
Январь 2018								
	ГеоСтройПрибор	4732712144	*15.01.2018*	Нивелир	18	15 000,00 ₽	4	3433102222
	ООО "Геомар Недра"	4956180510	*19.01.2018*	Тахеометр	7	428 984,40 ₽	1	3433818888
	ООО "А-ГЕО"	9040957045	*20.01.2018*	Теодолит	9	101 031,60 ₽	3	3432751822
	ООО "Навгеоком"	3432535355	*25.01.2018*	Тахеометр	5	288 000,00 ₽	2	3433795162
	ООО "Геомар Недра"	4956180510	*27.01.2018*	Тахеометр	5	383 355,60 ₽	1	3433818888
	ООО "А-ГЕО"	9040957045	*30.01.2018*	Теодолит	8	60 750,00 ₽	3	3432751822
Итоги для 'Дата продажи' = 30.01.2018 (6 записей)								
Сумма					52	1 277 121,60 ₽		
Февраль 2018								
	ООО "Навгеоком"	3432535355	*02.02.2018*	Тахеометр	6	270 000,00 ₽	2	3433795162
	ГеоСтройПрибор	4732712144	*05.02.2018*	Нивелир	15	20 016,00 ₽	4	3433102222
	ООО "А-ГЕО"	9040957045	*10.02.2018*	Теодолит	10	36 000,00 ₽	3	3432751822
	ООО "А-ГЕО"	9040957045	*15.02.2018*	Теодолит	9	101 031,60 ₽	3	3432751822
Итоги для 'Дата продажи' = 15.02.2018 (4 записей)								
Сумма					40	427 047,60 ₽		
ИТОГО					92	1 704 169,20 ₽		

Рис. 5.6. Результат отчета

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

Создание главной кнопочной формы

с использованием макросов

Использования макросов для автоматизации управления реакцией приложения на действия пользователя в формах или отчетах позволяет создавать полноценные интерактивные приложения без написания кода *VBA*.

Макрос (от слова «макрокоманда») – программа, состоящая из последовательности макрокоманд. *Макрокоманда* – это инструкция, ориентированная на выполнение определенного действия над объектами Access и их элементами.

Например, макрокомандой можно открыть форму, отчет, напечатать отчет, запустить на выполнение запрос, применить фильтр, присвоить значение и т. д.

Задание 1. Создать главную форму управления приложением, в которой будут представлены:

- элементы для кнопочных форм запросов и гистограмма;
- макросы для таблиц и отчетов;
- макрос, с помощью которого будет закрыта база данных.

1. Выполним команду **Пустая форма** на вкладке ленты **Создать** в группе **Формы**, режим «**Конструктор**» (рис. 6.1).

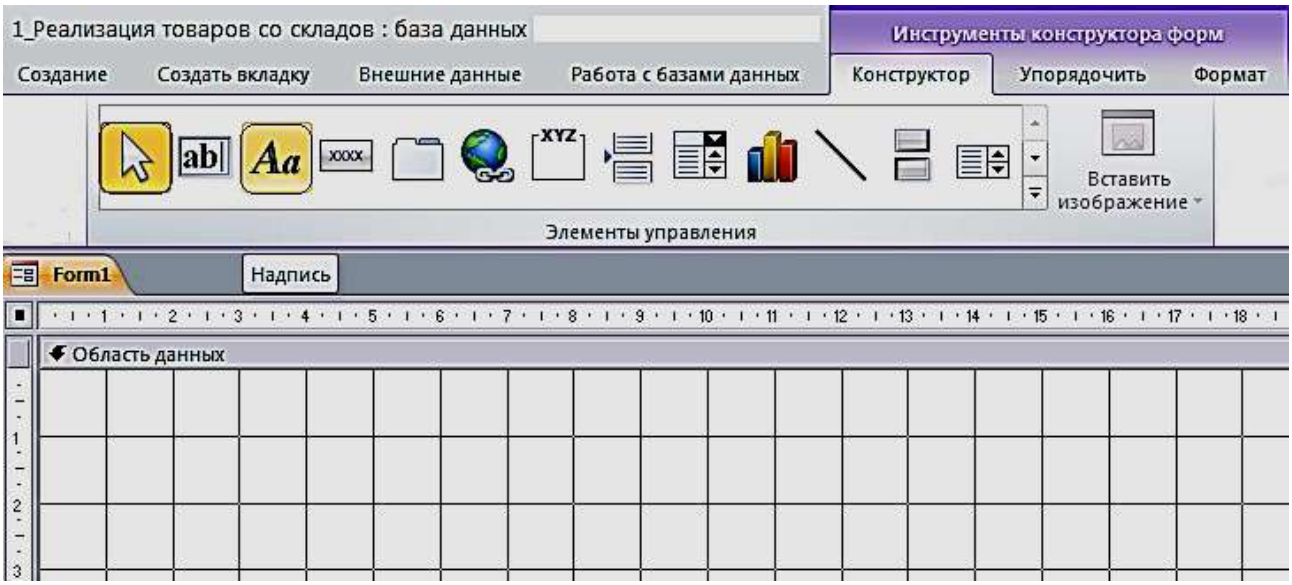


Рис. 6.1. Пустая форма в режиме «**Конструктор**» с элементами управления

2. Расположим в области **Формы** элемент **Надпись**, поместим в него название **Реализация товаров со складов** (рис. 6.2). Форматирование шрифта в надписях и кнопках осуществляется для выделенного объекта, при помощи **Инструмента конструктора форм**, в объекте **Формат**. Сохраним форму под именем «**Главная форма**».

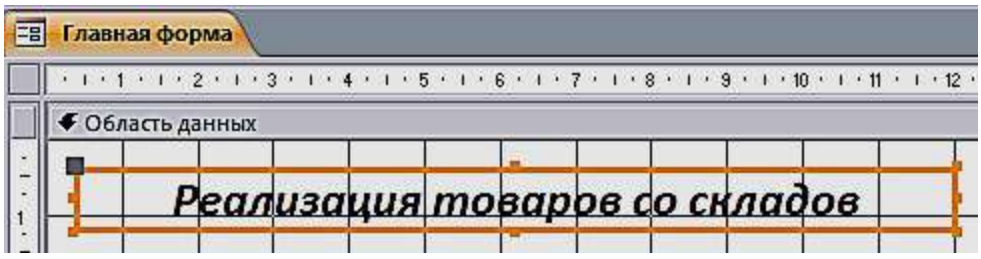


Рис. 6.2. Использование элемента управления **Надпись**

Создание макроса осуществляется в диалоговом режиме и сводится к записи в окне конструктора макроса последовательности макрокоманд, для которых задаются аргументы. Каждому макросу присваивается имя. При выполнении макроса макрокоманды выполняются последовательно в порядке их расположения. При этом используются объекты или данные, указанные в аргументах макрокоманд.

Создание макроса начинается с выполнением команды **Макрос** на вкладке ленты **Создание** в группе **Макросы и код**. В результате выполнения команды открывается окно макроса и каталог макрокоманд (рис. 6.3).

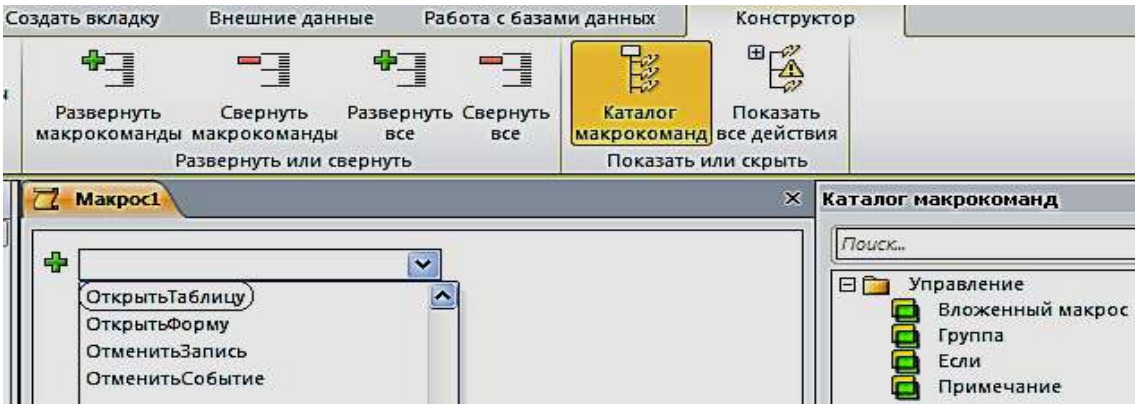


Рис. 6.3. Окно конструирования макроса с Каталогом макрокоманд

3. Создадим первый макрос **Таблицы**, при выполнении которого откроются четыре таблицы: «Продажи», «Склады», «Товары» и «Фирмы». Сохраним его под именем **Таблицы** (рис. 6.4).

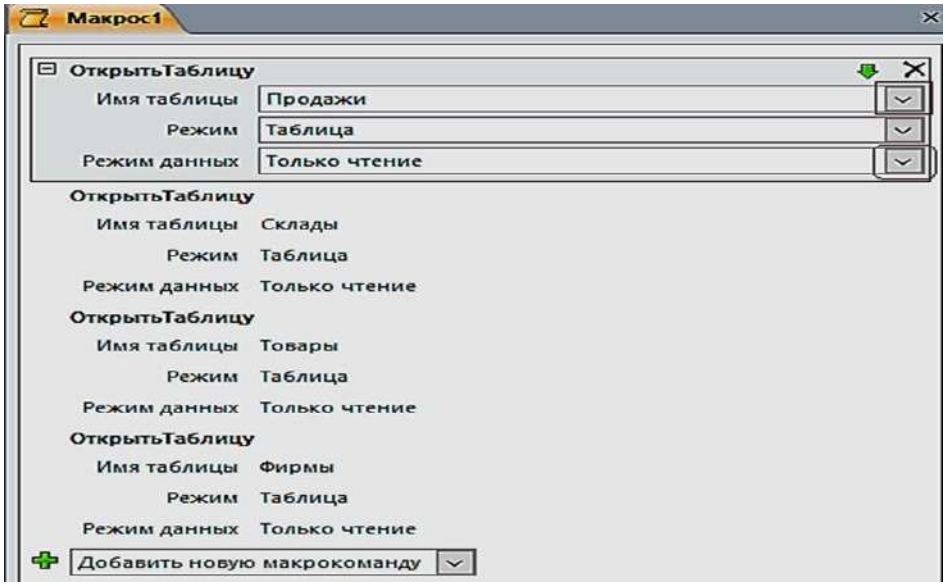


Рис. 6.4. Блок конструирования Макроса «**Таблицы**»

4. Создадим второй макрос, при выполнении которого откроется отчет «Продажи товаров» (рис. 6.5). Сохраним его под именем **Отчет**.

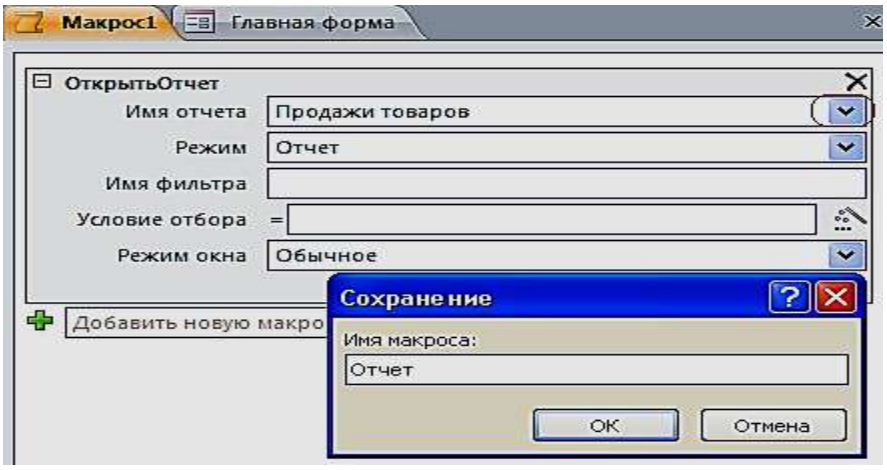


Рис. 6.5. Создание макроса **ОткрытьОтчет**

5. Создадим третий макрос, при выполнении которого откроется отчет «Продажи товаров» (рис. 6.6). Сохраним под именем **Выход**.

Рис. 6.6. Создание макроса **ЗакрытьБазуДанных**

Создание управляющих кнопок на экране

1. Создадим кнопки: **Таблицы**, **Отчет** и **Выход из БД.** Расположим в области **Главной формы** три кнопки с ранее созданными макросами. Для размещения кнопок предусмотрим, чтобы все действия осуществлялись при нажатой кнопке **«Использовать мастера»**. Переместим элемент управления **Кнопка** на форму, появится окно для создания кнопок. Выберем категорию: **Разное**, затем – действия: **Выполнить макрос,** нажмем кнопку **Далее** (рис. 6.7).

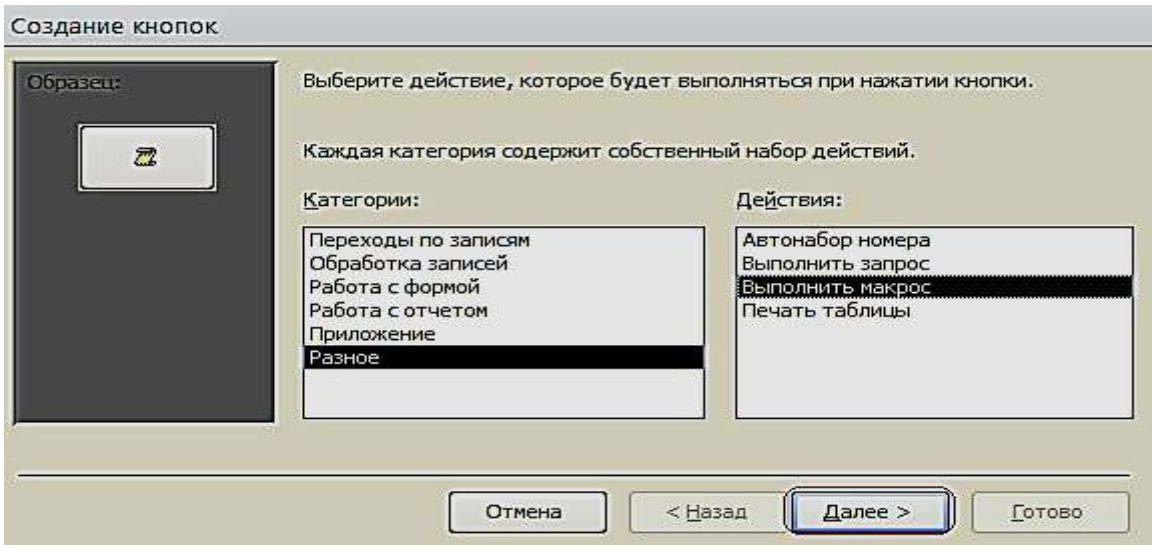


Рис. 6.7. Окно создания кнопок при работе с **Макросами**

2. Выберем соответствующий макрос (рис. 6.8). Разместим текст на кнопке.

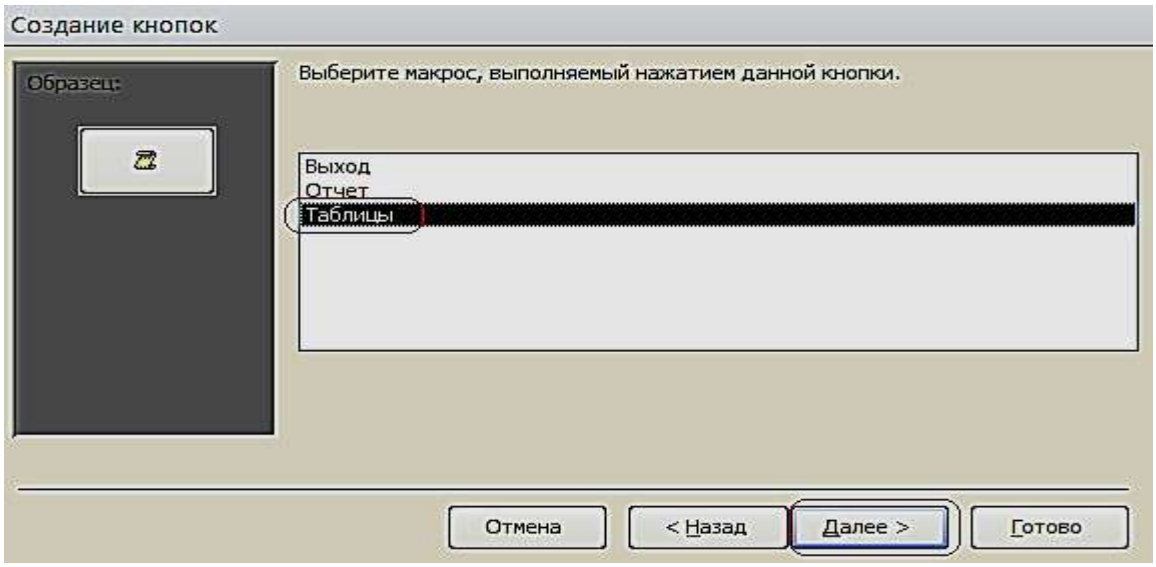


Рис. 6.8. Окно выбора макроса

3. В тексте напишем название **Таблицы** и выполним действия, указанные по кнопке **Далее** (рис. 6.9).

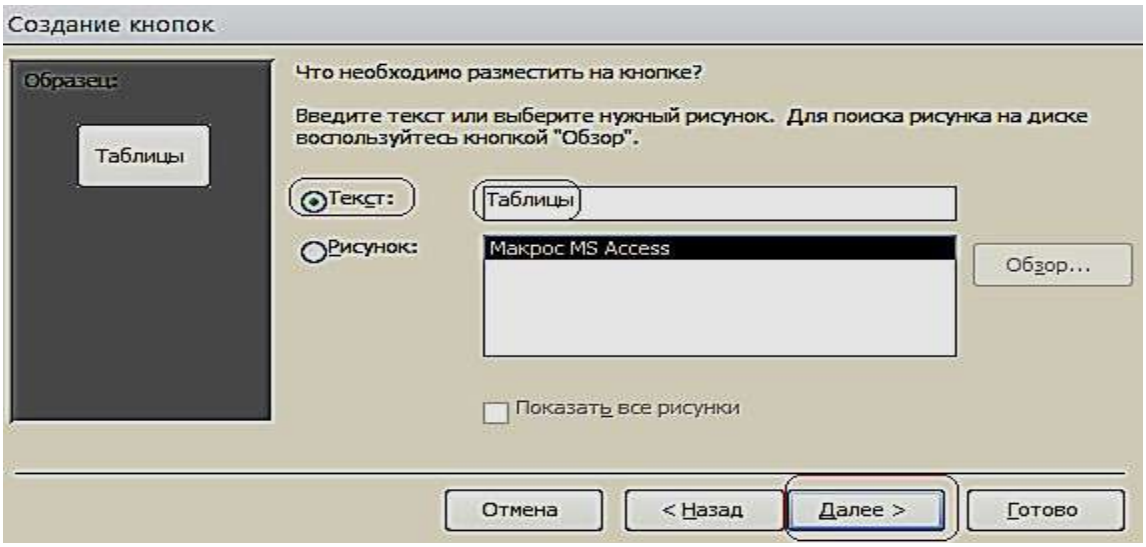


Рис. 6.9. Размещение текста на кнопке

4. Таким образом, создадим все кнопки, которые будут открываться с помощью макросов (рис. 6.10).

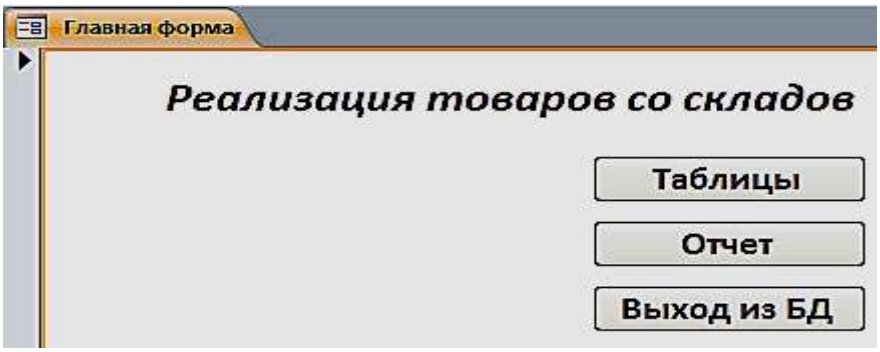


Рис. 6.10. Главная форма в режиме Макета

5. Расположим в области **Главной формы** три кнопки: **Составная форма**, **Общие данные** и **Гистограмма**. Переместим элемент управления **Кнопка** на форму, появится окно для создания кнопок. Выберем категорию: **Работа с формой**, действия: **Открыть форму,** нажмем кнопку **Далее** (рис. 6.11).

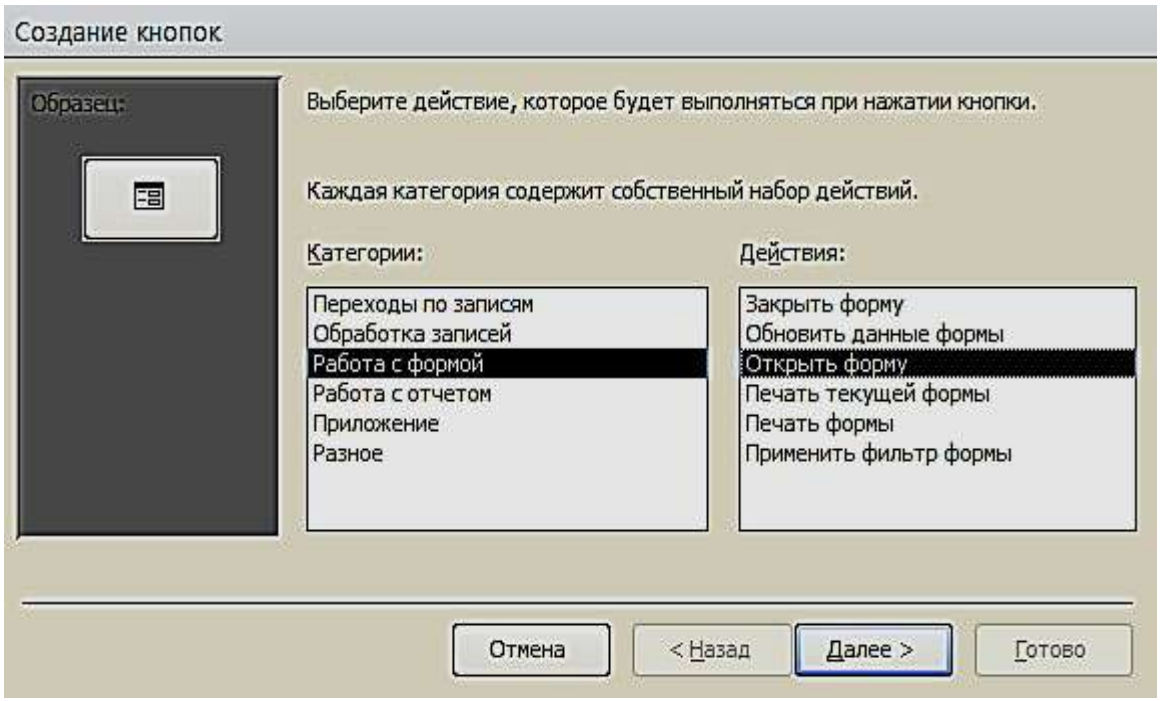


Рис. 6.11. Окно создания кнопок при работе с формами

6. Выберем соответствующую форму (рис. 6.12).

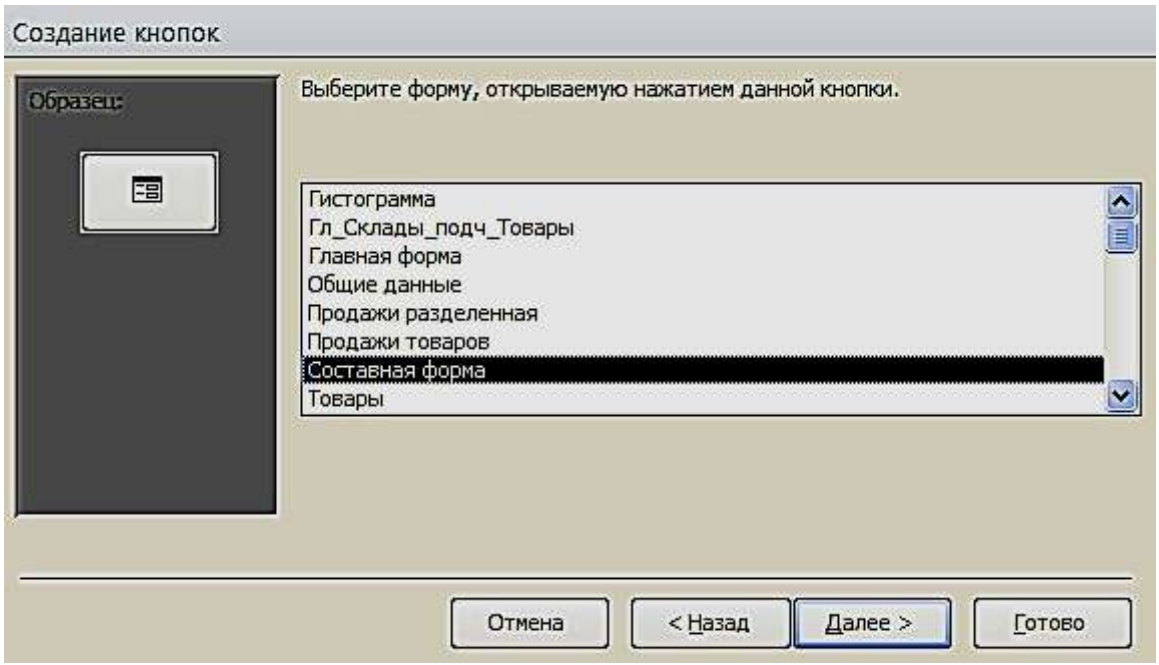


Рис. 6.12. Окно выбора формы

Поместим текст на кнопке (рис. 6.13). В тексте напишем название **Гистограмма** и выполним действия, указанные по кнопке **Далее**. Таким образом, создадим все кнопки, которые будут открываться с помощью Форм.

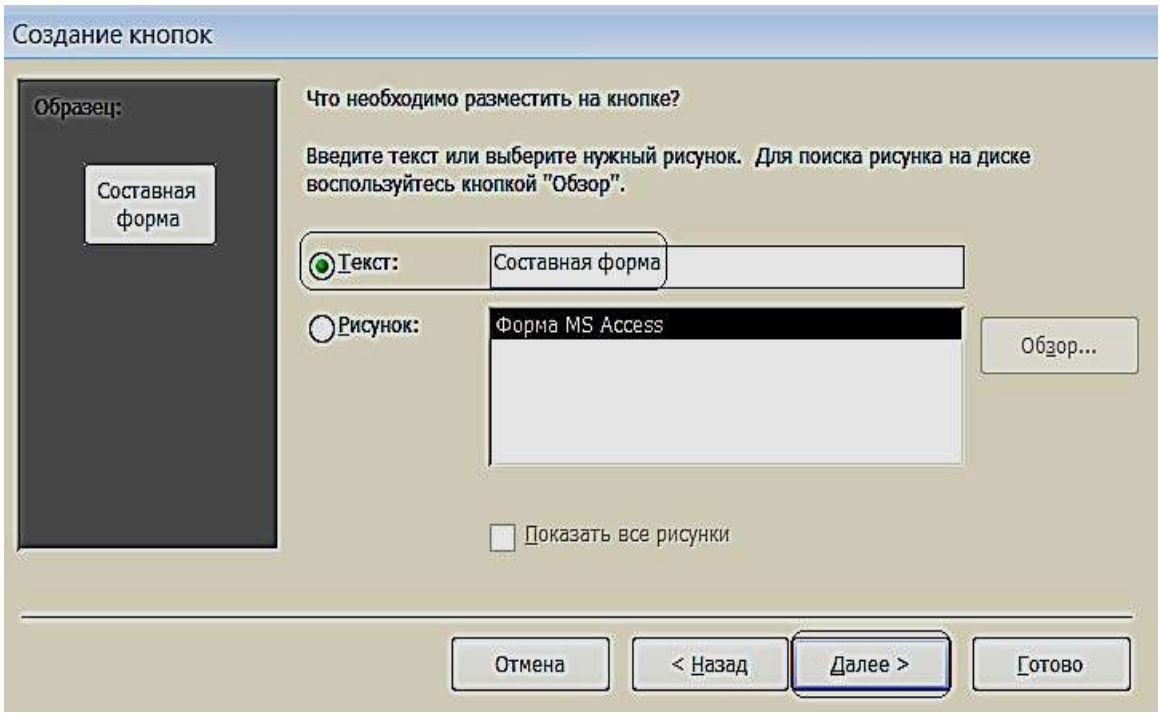


Рис. 6.13. Размещение текста на кнопке

7. Для создания картинки воспользуемся элементом управления «**Рисунок**».

8. По завершению разработки приложения, сохраним и закроем форму. Затем откроем и проверим работоспособность всех её элементов (рис. 6.14).

Рис. 6.14. Управляющая форма в режиме «**Формы**»

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Указания к выполнению работы

- Создать логическую модель базы данных: для заданной предметной области, представленной в виде перечня реквизитов, сформировать таблицы, определить в них ключевые поля, описать имена, типы и свойства полей и создать связи между таблицами.
- Создать формы для ввода данных в таблицы (простая и сложная формы). Заполнить таблицы. Каждая таблица должна содержать не менее 7 строк.
- Создать запросы по пунктам вариантов задания.
- Создать кнопочную форму для вызова созданных объектов.

Варианты заданий

Вариант № 1

Исходные данные:

- ***Рабочие***: табельный номер, фамилия, имя, отчество, дата рождения.
- ***Цеха:*** наименование цеха, категория производства (основное, управление, вспомогательное).
- ***Движение по службе***: должность, оклад, тип работы (штатный, совместитель, почасовик).
- o *Вычислить* общую сумму выплат за месяц по выбранному цеху, а также среднемесячный заработок этого цеха.

o *Создать* ведомость для начисления заработной платы рабочих этого цеха.

Вариант № 2

Исходные данные:

- ***Сотрудники:*** фамилия, имя, отчество, дата рождения, дата поступления на работу
- ***Оплата труда:*** должность, оклад
- ***Отделы:*** номер отдела, фамилия сотрудника *Определить:*

o возраст сотрудников (количество полных лет) при поступлении на работу и на текущее время;

- количество сотрудников заданного отдела младше 30 лет;

- o минимальный размер оклада.

- ***Создать таблицу,*** которая содержит сведения о 5-и самых высокооплачиваемых сотрудниках фирмы**.**

Вариант № 3

Исходные данные:

Работники: фамилия, имя, отчество, цех.

- ***Изделия:*** наименование изделия, категория изделия (A, B, C), стоимость изготовления.

- ***Итоги:*** шифр сборщика, количество изготовленных изделий по категориям.

Рассчитать: o общее количество изделий каждой категории;

o общее количество изделий, собранных всеми рабочими заданного цеха;

- *Создать ведомость* для начисления заработной платы рабочих заданного цеха. Определить средний размер заработной платы работников этого цеха.

Вариант № 4

Исходные данные:

- ***Абоненты:*** фамилия, имя, отчество, телефон, дата установки.

- ***Расценки:*** тип заказа (по городу, область, Украина, Европа, …), цена 1 мин. разговора.

- ***Заказ:*** телефон вызова, вызываемый пункт, время в минутах.

o *Рассчитать* общее количество телефонов, установленных начиная с заданного года по сегодняшний день. Выдавать по вводимой фамилии абонента номер его телефона. o *Создать таблицу*, которая содержит фамилии задолжников и их телефоны.

Вариант № 5

Исходные данные:

- ***Поставка:*** поставщик, дата поставки, объем поставки.

- ***Игрушки:*** артикул, наименование, цена, нижняя и верхняя возрастные границы.

- ***Чеки: номер чека, дата продажи, сумма.***

o *Определить* стоимость наиболее дорогой игрушки и ее наименование. По введенному значению *A, B* и *X*, выводить названия игрушек, которые по стоимости не превышают *X* и подходят ребенку от *A* до *B* лет.

o *Создать таблицу*, которая содержит следующую информацию:

наименование игрушек, которые подходят детям от *1* до *3* лет и их цены.

Вариант № 6

Исходные данные:

- ***Студенты:*** фамилия, имя отчество студента; код группы, дата рождения.
- ***Предметы:*** наименование предмета, категория предмета (фундаментальный, профессионально-ориентированный, на выбор), тип аттестации (зачет, экзамен).

Журнал: оценки по 5 экзаменам, признак участия в общественной работе. o *Определить* общее число активистов в списке.

o *Создать таблицу*, которая содержит сведения о начислении стипендии студентам заданной группы. Рассчитать размер стипендии по следующему алгоритму: студенту, который получил все оценки «*5*» и активно принимает участие в общественной работе, назначается повышенная стипендия – доплата 50 %; студенту, который получил «*4*» и «*5*», назначается обычная стипендия – ее необходимо задать; студенту, который получил одну оценку «*3*», но активно занимается общественной работой, также назначается обычная стипендия; другим студентам стипендия не назначается.

Вариант № 7

Исходные данные:

- ***Авторы:*** фамилия, имя отчество, название книги.
- ***Книги:*** год издания, количество экземпляров.
- ***Местоположение:*** шифр книги, номер стеллажа, номер шкафа, номер полки. o *Определить* общее количество книг в коллекции, а также число книг заданного года издания. По заданному автору и названию книги выдать информацию о местонахождении книги. o *Создать таблицу*, которая содержит информацию о книгах заданного автора, которые находятся в коллекции.

Вариант № 8

Исходные данные:

- ***Группа:*** факультет, шифр группы, фамилия куратора, должность.
- *Студент*. Фамилия студента, шифр группы, номер зачетной книжки, дата рождения, дата поступления.
- ***Результаты сессии:*** оценки по *5*-и экзаменам и результаты сдачи 5 зачетов («З» – зачет, «Н» – незачет). o *Вычислить* средний балл, полученный

каждым студентом заданной группы, и средний балл этой группы по каждому предмету. Определить общее количество задолженностей (по экзаменам и зачетам в сумме) каждого студента заданной группы и общее число студентов-должников той же группы.

- *Создать таблицу*, которая содержит сведения о неуспевающих студентах: группу, фамилия и количество задолженностей.

Вариант № 9

Исходные данные:

- ***Рейсы:*** номер рейса, пункт назначения, время вылета, время прибытия, стоимость билета.

Самолеты: шифр самолета, марка, количество посадочных мест, срок службы.

- ***Билеты:*** дата вылета, количество свободных мест в самолете.

Определить: o номера рейсов и время отправления самолетов в заданный город; o по заданному городу и времени отправления наличие свободных мест на рейс; o общее количество рейсов через сутки в заданный город. *Создать таблицу***,** которая содержит номера рейсов и время отправления самолетов в заданный город.

Вариант № 10

Исходные данные:

- ***Поставка:*** артикул обуви (артикул начинается с буквы *Ж* – для женской обуви, *М* – для мужской, *Д* – для детской обуви, например: *Д0321*), наименование, объем поставки.
- ***Обувь:*** цвет, стоимость.
- *Наличие*: размер, количество**.**

Определить:

- стоимость обуви заданного артикула, и какие размеры есть в наличии; o общее количество пар детской обуви, имеющейся в магазине, и ее суммарную стоимость.
- *Создать таблицу*, которая содержит информацию обо всех моделях женской обуви.

Вариант № 11

Исходные данные:

- ***Игроки:*** фамилия, имя, отчество, год рождения, название футбольного клуба.

- ***Футбольный клуб:*** название клуба, фамилия директора, фамилия главного тренера.
- ***Результаты:*** шифр игрока, число заброшенных им шайб, число сделанных им голевых передач, заработанное штрафное время. o *Вычислить* общее число шайб, забитых хоккеистами каждой команды, и суммарное штрафное время. o *Создать таблицу*, которая содержит фамилии шести лучших игроков, и сумму очков каждого игрока (голы + передачи).

Вариант № 12

Исходные данные:

- ***Студенты:*** фамилия, имя, дата рождения дата поступления.

Выбор дисциплины: код студента, наименование пяти дисциплин (выбираемая дисциплина отмечается символом «*1*», иначе – *пробел*).

- ***Успеваемость:*** средний балл, наличие задолженности.

o *Вычислить* количество слушателей каждой дисциплины. Определить число слушателей заданной дисциплины, у которых средний балл превышает заданный. o *Создать таблицу*, которая содержит фамилию, группу и средний балл всех слушателей заданной дисциплины. Если число их превысит заданное, то отобрать студентов, которые имеют более высокий средний балл успеваемости.

Вариант № 13

Исходные данные:

- ***Рейсы:*** номер поезда, станция назначения, время отправления, время прибытия, стоимость билета в вагоны каждого вида отдельно.
- ***Поезда:*** количество посадочных мест в купейных вагонах, плацкартных, количество мест в вагоны повышенной комфортности.
- ***Билеты:*** дата отправления, номер поезда, наличие билетов в вагоны каждого вида отдельно.

Определить:

o количество свободных мест в купейные вагоны поезда с заданным номером; o количество поездов, которые отправляются к заданной станции назначения.

- *Создать таблицу,* содержащую информацию о поездах, которые отправляются к заданной станции в заданном интервале времени (временной интервал задать двумя значениями, например, *13:00* и *18:30*).

Вариант № 14

Исходные данные:

- ***Сотрудники:*** табельный номер фамилия, имя, отчество, дата рождения, дата поступления на работу.
- ***Отделы:*** номер отдела, количество сотрудников, фамилия начальника.
- ***Движение по службе***: должность, оклад, тип работы (штатный, совместитель, почасовик). o *Рассчитать* стаж работы всех сотрудников; средний стаж работы сотрудников заданного отдела; количество сотрудников с окладом ниже заданного. o *Создать таблицу*, которая содержит список сотрудников пенсионного возраста (на сегодняшний день) с указанием стажа работы. o *Определить разницу* в стаже работы женщин и мужнин пенсионного возраста.

Вариант № 15

Исходные данные:

- ***Пациенты:*** фамилия, имя, отчество, пол, дата рождения, местожительство (город).
- ***Палата:*** количество мест в палате.
- ***Учет:*** дата поступления, диагноз поступления, уточненный диагноз, дата выписки, если выписался).

Определить: o количество иногородних граждан, прибывших в клинику; o количество пациентов с заданным диагнозом; o количество пациентов пенсионного возраста.

- *Создать таблицу*, которая содержит список пациентов старше заданного возраста с заданным диагнозом.

Вариант № 16

Исходные данные:

- ***Пассажир:*** фамилия, шифр багажа.
- ***Багаж:*** количество вещей, вес.
- ***Учет:*** дата сдачи, время сдачи, номер секции, номер стойки.

Определить: o общий средний вес одной вещи;

o багаж, у которого средний вес одной вещи отличается не больше чем на 0,3 кг от общего среднего веса одной вещи; o количество пассажиров, которые имеют больше 2 вещей. □ *Создать таблицу,* содержащую информацию о багаже, вес которого превышает заданный.

Вариант № 17

Исходные данные:

- ***Компания:*** наименование компании, дата создания компании, фамилия директора, номинал акции.
- ***Курс:*** дата, продажа, покупка.
- ***Учет:*** количество проданных акций, количество купленных акций.

Определить: o среднее количество проданных и купленных акций; o максимальное различие между курсом продажи и покупки акций; o суммарное количество акций, проданных всеми фирмами, и общую сумму, на которую они проданы.

- *Создать таблицу*, которая содержит наименование фирмы и стоимость проданных акций.

Вариант № 18

Исходные данные:

- ***Заказчик:*** фамилия, адрес, телефон.
- ***Ремонт:*** номер заказа, наименование оборудования, вид ремонта, стоимость.
- ***Учет:*** фамилия мастера, дата начала ремонта, дата окончания ремонта.

Определить: o суммарную стоимость всех заказов; o количество заказов на ремонт заданного вида; o минимальная стоимость ремонта.

- *Создать таблицу*, которая содержит сведения о продолжительности ремонта заказов, оформленных весной: номер заказа, фамилия заказчика, наименование оборудования, продолжительность заказа.

Вариант № 19

Исходные данные:

- ***Абоненты:*** фамилия, имя, отчество, телефон, дата установки.
- ***Расценки:*** код города, стоимость *1* минуты разговора.
- ***Заказ:*** дата разговора, телефон вызова, вызываемый пункт, продолжительность в минутах. *Определить:* o максимальную стоимость разговора; o суммарную стоимость всех разговоров; o общее количество разговоров в город с заданным кодом. □ *Создать таблицу*, которая содержит сведения о стоимости разговоров, которые состоялись в интервале между двумя заданными датами.

Вариант № 20

Исходные данные:

- ***Товары:*** шифр товара, наименование товара, категория (*A, B, C*), страна-производитель.
- ***Поставка:*** дата поставки, поставщик (наименование фирмы), объем, оптовая цена.
- ***Учет:*** дата продажи, розничная цена, количество проданного товара.

o По заданному шифру товара выдавать информацию о нем.

Определить: o суммарную прибыль от продажи всех товаров;

o наименование товаров, продаваемых по наивысшей и наиболее низкой цене.

- *Создать таблицу*, которая содержит наименование товара и суммарную выручку.

Вариант № 21

Исходные данные:

- ***Продукция***: номер цеха изготовителя, наименование изделия
- ***Стоимость:*** код изделия, себестоимость
- ***Учет:*** дата изготовления, количество изготовленных изделий, цена.

Определить: o суммарное различие между себестоимостью и ценой всех изготовленных изделий; o общее количество изделий, изготовленных до заданной даты; o цену изделия по заданному наименованию.

- *Создать таблицу*, которая содержит сведения о товарах, изготовленных в заданном цехе.

Вариант № 22

Исходные данные:

- ***Рабочие:*** фамилия, имя, отчество, дата рождения, дата поступления на работу, номер цеха.
- ***Расценки:*** разряд, стоимость одного часа.
- ***Учет:*** дата, количество отработанных часов.

Определить: o среднее количество часов, отработанных за день; o максимальную стоимость одного часа; o по заданной дате количество отработанных часов.

- *Создать таблицу*, которая содержит следующие сведения о работниках заданного цеха: o фамилия работника; o суммарная стоимость отработанного им времени.

Вариант № 23

Исходные данные:

- ***Клиенты:*** фамилия, адрес, телефон**.**
- ***Заказ:*** номер заказа, наименование изделия, фамилия мастера.
- ***Учет:*** дата приема, дата выполнения заказа, стоимость заказа.

Определить: o количество заказов, выполненных мастером с заданной фамилией; o стоимость самого дорого заказа; o среднюю стоимость заказов.

- *Создать таблицу*, которая содержит фамилию клиента, номер заказа и продолжительность его выполнения.

Вариант № 24

Исходные данные:

- ***Импортеры:*** фирма-импортер, страна, наименование товара.
- ***Поставка:*** шифр товара, объем партии в штуках, стоимость *1* штуки в условных единицах.
- ***Учет:*** дата поставки, дата получения, подтверждение приема партии. *Определить:* o суммарный объем товаров, импортированных заданной страной;

o суммарную стоимость партии товара по заданному шифру; o минимальную стоимость товара.

- *Создать таблицу,* которая содержит сведения о стоимости товаров, импортированных заданной страной. Таблица должна содержать наименование товара и суммарную стоимость партии.

Вариант № 25

Исходные данные:

- ***Рабочие:*** фамилия, имя, отчество, дата рождения, дата поступления на работу, номер цеха.
- ***Оплата:*** разряд, оплата за изготовление одной качественной детали.
- ***Учет:*** дата, количество изготовленных деталей, количество бракованных деталей. Определить: o общее количество бракованных деталей, изготовленных всеми

мастерами заданного цеха; o сумму штрафа за каждую бракованную деталь, которая составляет 20 % от оплаты за качественную работу; o фамилию мастера, который изготовил максимальное количество качественных деталей.

- *Создать таблицу*, которая содержит сведения об оплате труда рабочих. Таблица должна содержать фамилию рабочего, номер цеха и сумму к выплате с учетом штрафа и налога (налог составляет 15 % от стоимости оплаты).

Вариант № 26

Исходные данные:

- ***Отделение:*** номер отделения, фамилию заведующего, номер корпуса, этаж.
- ***Лечение:*** шифр болезни, продолжительность.
- ***Оплата:*** диагностика, стоимость *1* дня лечения, затраты на лекарство.
- ***Суммарная стоимость:*** отработанного им времени.

Определить: o по названию болезни затраты на лекарство; o среднюю стоимость *1* дня лечения;

o рассчитать суммарную стоимость лечения каждой болезни, включая затраты на лекарство.

- *Создать таблицу*, которая содержит сведения о стоимости лечения в заданном отделении.

Вариант № 27

Исходные данные:

- ***Книги:*** наименование книги, фамилия автора, издательство, год издания, тираж.
- ***Магазины:*** шифр книги, номер магазина, цена.
- ***Учет продаж:*** код продажи, продано, остаток.

Определить: o количество проданных книг в заданном магазине; o суммарную стоимость всех непроданных книг; o среднюю цену одной книги.

- *Создать таблицу,* которая содержит суммарную стоимость книг, проданных каждым магазином.

Вариант № 28

Исходные данные:

- ***Детали:*** наименование детали, цех-изготовитель
- ***Изготовление:*** шифр материала, шифр детали, затрата материала на *1* деталь.
- ***Учет:*** дата изготовления, количество изготовленных деталей, количество брака.

Определить: o для всех деталей суммарные затраты материала на брак; o количество качественных деталей; o деталь, на которую тратится более всего материала. □ *Создать таблицу*, которая содержит шифр детали и процент брака.

Вариант № 29

Исходные данные:

- ***Лекарство:*** название лекарства, категория (антибиотик, жаропонижающее, витамины, противовоспалительное, антидепрессант), дата изготовления, дата истечения срока.
- ***Стоимость:*** шифр лекарства, код аптеки, цена за *1* упаковку.
- ***Продажа:*** количество проданных упаковок, остаток.

Определить: o суммарное количество упаковок лекарства, проданных всеми аптеками и принадлежащее заданной категории. o стоимость всех непроданных упаковок; o среднюю стоимость лекарства.

- *Создать таблицу*, которая содержит информацию о просроченных лекарствах: номер аптеки, название, категория и дату истечения срока.

Вариант № 30

Исходные данные:

- ***Продавцы:*** табельный номер, фамилия, имя, отчество, дата рождения.
- ***Товары:*** шифр товара, тип товара, сложность продажи (средняя, высокая);
- ***Журнал регистрации:*** количество проданных товаров по дням недели (понедельник, вторник, ..., суббота); *Определить:* o общее количество товаров, проданных каждым продавцом; o фамилия продавца, который продал наибольшее число товаров, и определить день, когда он достиг наивысшей производительности труда.
- *Создать таблицу,* которая содержит следующую информацию: фамилия продавца и общее количество товаров, проданное им за неделю.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. *Бекаревич Ю. Б., Пушкина Н. В*. СПб.: БХВ - Петербург, 2016. 464 с. (Самоучитель Microsoft Access 2013).

2. *Гурвиц Г.* Microsoft Access 2013. Разработка приложений на реальном примере:
М., 2012. 258 с.

3. *Одиночкина С. В.* Разработка баз данных в Microsoft Access 2010, НИУ ИТМО, 2012. 81 с.

Дополнительная литература:

1. *Домострой А.* MS Access 2013. Создание базы данных. Урок 1. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=uCenTUX1QcQ

2. *Домострой А.* MS Access 2013. Таблицы. Урок 2. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=VDuyue8ra2Q

3. *Домострой А.* MS Access 2013. Запросы. Урок 3. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=nSIHUvfBy34

4. *Домострой А.* MS Access 2013. Формы. Урок 4. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=54ZZhSYrz8s

5. *Домострой А.* MS Access 2013. Многотабличные формы. Урок 5. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=ou-1q4Q6NjY

6. *Домострой А.* MS Access 2013. Создание отчетов. Урок 6. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=PrH-S8r0nlE

7. *Домострой А.* MS Access 2013. Главная Кнопочная форма Урок 7. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=Ou0HJtzypOU

8. *Макарова Н. В.* Информатика: учебник для вузов. Стандарт третьего поколения. СПб: Питер, 2011. 576 с.: ил.

МІНІСТЕРСТВО НАУКІІ ІІ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНІЯ
РОССІЙСКОЙ ФЕДЕРАЦІІІ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу
_____ С.А. Упоров

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Автор: Дружинин А.В., доцент, канд. техн. наук

Екатеринбург
2020

Оглавление

ЧАСТЬ I. ПОНЯТИЕ ППП.....3
Тема 1.1 Введение в предмет. Понятие ППП.....4
Тема 1.2 Структура и основные компоненты ППП.....10
Тема 1.3 Эволюция ППП. Примеры современных ППП.....13
ЧАСТЬ II. ППП MS OFFICE.....22
Тема 2.1 Структура и состав MS Office. Основные приложения 23
Тема 2.2 Введение в офисное программирование.....29
Тема 2.3 Макросы. Использование макрорекордера.....34
Тема 2.4 Среда разработки
VBA.....38

ЧАСТЬ I. ПОНЯТИЕ ППП
ТЕМА 1.1 ВВЕДЕНИЕ В ПРЕДМЕТ. ПОНЯТИЕ ППП

Цели и задачи дисциплины

- Изучение основных принципов, используемых в разработке интегрированных программных продуктов.
- Изучение структуры, состава и назначения компонентов интегрированного ПО, а также средств организации взаимодействия между компонентами и инструментальных средств расширения функциональности.
- Формирование навыков работы со средствами автоматизации решения прикладных задач.
- Формирование навыков использования встроенных средств разработки.
- Требования к уровню освоения дисциплины
- В результате изучения дисциплины студенты должны:
- знать принципы построения прикладных информационных систем
- уметь использовать современные программные средства для обработки разнородной информации;
- уметь автоматизировать процесс решения прикладных задач с помощью встроенных языков программирования;
- иметь представление о современном состоянии и тенденциях развития рынка прикладного ПО.

Основные понятия и определения

Информационная система (ИС) - организационно упорядоченная совокупность документов (массивов документов) и информационных технологий, в том числе с использованием средств вычислительной техники и связи, реализующих информационные процессы. Информационные системы предназначены для хранения, обработки, поиска, распространения, передачи и представления информации.

Автоматизированная (информационная) система (АС) - совокупность программных и аппаратных средств, предназначенных для хранения и/или управления данными и ин-

формацией и производства вычислений и управляемая человеком-оператором (в этом главное отличие автоматизированной системы от автоматической).

Многоуровневое представление ИС - модель представления информационной системы в виде совокупности взаимосвязанных уровней, разделенных по функциональному назначению (рис. 1).

Рис. 1. Многоуровневое представление информационных систем.

Аппаратное обеспечение ИС - комплекс электронных, электрических и механических устройств, входящих в состав информационной системы или сети.

Программное обеспечение (ПО) — совокупность программ и данных, предназначенных для решения определенного круга задач и хранящиеся на машинных носителях.

Программа — последовательность формализованных инструкций, представляющих алгоритм решения некоторой задачи и предназначенная для исполнения устройством управления вычислительной машины. Инструкции программы записываются при помощи машинного кода или специальных языков программирования. В зависимости от контекста термин «программа» может относится к исходным текстам, при помощи которых записывается алгоритм, или к исполняемому машинному коду.

Программист - специалист, занимающийся разработкой и проверкой программ. Различают системных и прикладных программистов.

Пользователь - человек, принимающий участие в управлении объектами и система ми некоторой предметной области и являющийся составным элементом автоматизированной системы.

Прикладное программное обеспечение - программное обеспечение, ориентированное на конечного пользователя и предназначенное для решения пользовательских задач.
Прикладное ПО состоит из:

- отдельных прикладных программ и пакетов прикладных программ, предназначенных для решения различных задач пользователей;
- автоматизированных систем, созданных на основе этих пакетов.

Пакет прикладных программ - комплект программ, предназначенных для решения задач из определенной проблемной области. Обычно применение пакета прикладных программ предполагает наличие специальной документации: лицензионного свидетельства, паспорта, инструкции пользователя и т.п.

Классификация программного обеспечения

Любая классификация подразумевает выбор некоторого группировочного признака (или нескольких), на основании которого и производится отнесение объектов к тому или иному классу. Так, при классификации программного обеспечения по способу распространения можно выделить следующие категории список не полный):

- Commercial Software - коммерческое (с ограниченными лицензией возможностями на использование), разрабатываемое для получения прибыли.
- Freeware - свободное ПО, распространяемое без ограничений на использование, модификацию и распространение.
- Shareware - условно-бесплатное ПО, с частичными ограничениями при работе в ознакомительном режиме (например, определенное количество запусков программы).
- Abandonware - «заброшенное» ПО, поддержка которого непосредственным разработчиком прекращена, но продолжается третьими лицами (например, партнерами или энтузиастами).
- Adware - ПО, в код которого включены рекламные материалы. Такое ПО распространяется бесплатно, но для отключения рекламных блоков необходима оплата.
- Careware - «благотворительное» ПО, оплату за которое разработчик (или распро странитель) просит переводить на благотворительные нужды.

При классификации программного обеспечения по назначению в качестве критерия используют уровень представления ИС, на который ориентирована та или иная программа.
Соответственно выделяют следующие классы ПО:

1. Системное ПО - решает задачи общего управления и поддержания работоспособности системы в целом. К этому классу относят операционные системы, менеджеры загрузки, драйверы устройств, программные кодеки, утилиты и программные средства защиты информации.
2. Инструментальное ПО включает средства разработки (трансляторы, отладчики, интегрированные среды, различные SDK и т.п.) и системы управления базами данных (СУБД).
3. Прикладное ПО - предназначено для решения прикладных задач конечными пользователями.

Прикладное ПО - самый обширный класс программ, в рамках которого возможна дальнейшая классификация, например, по предметным областям. В этом случае группировочным признаком является класс задач, решаемых программой. Приведем несколько примеров:

- Офисные приложения - предназначены для автоматизации офисной деятельности (текстовые редакторы и процессоры, электронные таблицы, редакторы презентаций и т.п.)
- Корпоративные информационные системы - бухгалтерские программы, системы корпоративного управления, системы управления проектами (Project Management), инструменты автоматизации документооборота (EDM-системы) и управления архивами документов (DWM-системы)
- Системы проектирования и производства - системы автоматизированного проектирования (САПР, CAD/CAM-системы), системы управления технологическими (SCADA) и производственными (MES) процессами
- Научное ПО - системы математического и статистического расчета, анализа и моделирования
- Геоинформационные системы (ГИС)
- Системы поддержки принятия решений (СППР)
- Клиенты доступа к сетевым сервисам (электронная почта, веб-браузеры, передача сообщений, чат-каналы, клиенты файлообменных сетей и т.п.)
- Мультимедийное ПО - компьютерные игры, средства просмотра и редактирования аудио- и видеоинформации, графические редакторы и вьюеры, анимационные редакторы и т.п.

С точки зрения конечного пользователя такая классификация оправданна и наглядна, для разработчика же более значимым фактором является структура прикладной программы, в общем случае состоящей из нескольких компонентов. Назначение этих компонентов, связи между ними и способность к взаимодействию определяют интеграцию прикладного ПО. Чем теснее связаны программные компоненты, тем выше степень интеграции.

В зависимости от степени интеграции многочисленные прикладные программные средства можно классифицировать следующим образом[1]:

1. отдельные прикладные программы;
2. библиотеки прикладных программ;
3. пакеты прикладных программ;
4. интегрированные программные системы.

Отдельная прикладная программа пишется, как правило, на некотором высокоуровневом языке программирования (Pascal, Basic и т.п.) и предназначается для решения конкретной прикладной задачи. Такая программа может быть реализована в виде набора модулей, каждый из которых выполняет некоторую самостоятельную функцию (например, модуль пользовательского интерфейса, модуль обработки ошибок, модуль печати и т.п.).
При этом доступ к функциям модулей из внешних программ невозможен.

Библиотека представляет собой набор отдельных программ, каждая из которых решает некоторую прикладную задачу или выполняет определенные вспомогательные функции (управление памятью, обмен с внешними устройствами и т.п.). Библиотеки программ зарекомендовали себя эффективным средством решения вычислительных задач. Они интенсивно используются при решении научных и инженерных задач с помощью ЭВМ.
Условно их можно разделить на библиотеки общего назначения и специализированные библиотеки.

Пакет прикладных программ (ППП) - это комплекс взаимосвязанных программ, ориентированный на решение определенного класса задач. Формально такое определение не исключает из числа пакетов и библиотеки программ, однако у ППП, как отдельной категории, есть ряд особенностей, среди которых: ориентация на решение классов задач, унифицированный интерфейс, наличие языковых средств.

[1] Следует отметить отсутствие безусловных границ между перечисленными формами прикладного программного обеспечения

Интегрированная программная система - это комплекс программ, элементами которого являются различные пакеты и библиотеки программ. Примером служат системы автоматизированного проектирования, имеющие в своем составе несколько ППП различного назначения. Часто в подобной системе решаются задачи, относящиеся к различным классам или даже к различным предметным областям.

Понятие пакета прикладных программ

Итак, пакет прикладных программ (ППП) – это комплекс взаимосвязанных программ для решения определенного класса задач из конкретной предметной области. На текущем этапе развития информационных технологий именно ППП являются наиболее востребованным видом прикладного ПО. Это связано с упомянутыми ранее особенностями ППП. Рассмотрим их подробней:

- Ориентация на решение класса задач. Одной из главных особенностей является ориентация ППП не на отдельную задачу, а на некоторый класс задач, в том числе и специфичных, из определенной предметной области. Так, например, офисные пакеты ориентированы на офисную деятельность, одна из задач которой - подготовка документов (в общем случае включающих не только текстовую информацию, но и таблицы, диаграммы, изображения). Следовательно, офисный пакет должен реализовывать функции обработки текста, представлять средства обработки табличной информации, средства построения диаграмм разного вида и первичные средства редактирования растровой и векторной графики.
- Наличие языковых средств. Другой особенностью ППП является наличие в его составе специализированных языковых средств, позволяющих расширить число задач, решаемых пакетом или адаптировать пакет под конкретные нужды. Пакет может представлять поддержку нескольких входных языков, поддерживающих различные парадигмы. Поддерживаемые языки могут быть использованы для формализации исходной задачи, описания алгоритма решения и начальных данных, организации доступа к внешним источникам данных, разработки программных модулей, описания модели предметной области, управления процессом решения в диалоговом режиме и других целей. Примерами входных языков ППП являются VBA в пакете MS Office, AutoLISP/VisualLISP в Autodesk AutoCAD, StarBasic в OpenOffice.org

- Единообразие работы с компонентами пакета. Еще одна особенность ППП состоит в наличии специальных системных средств, обеспечивавших унифицированную работу с компонентами. К их числу относятся специализированные банки данных, средства информационного обеспечения, средства взаимодействия пакета с операционной системой, типовой пользовательский интерфейс и т.п.
-

ТЕМА 1.2 СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ППП

Несмотря на разнообразие конкретных пакетных разработок, их обобщенную внутреннюю структуру можно представить в виде трех взаимосвязанных элементов1 (рис. 2):

1. входной язык (макроязык, язык управления) - представляет средство общения пользователя с пакетом;
2. предметное обеспечение (функциональное наполнение) - реализует особенности конкретной предметной области;
3. системное обеспечение (системное наполнение) - представляет низкоуровневые средства, например, доступ к функциям операционной системы.

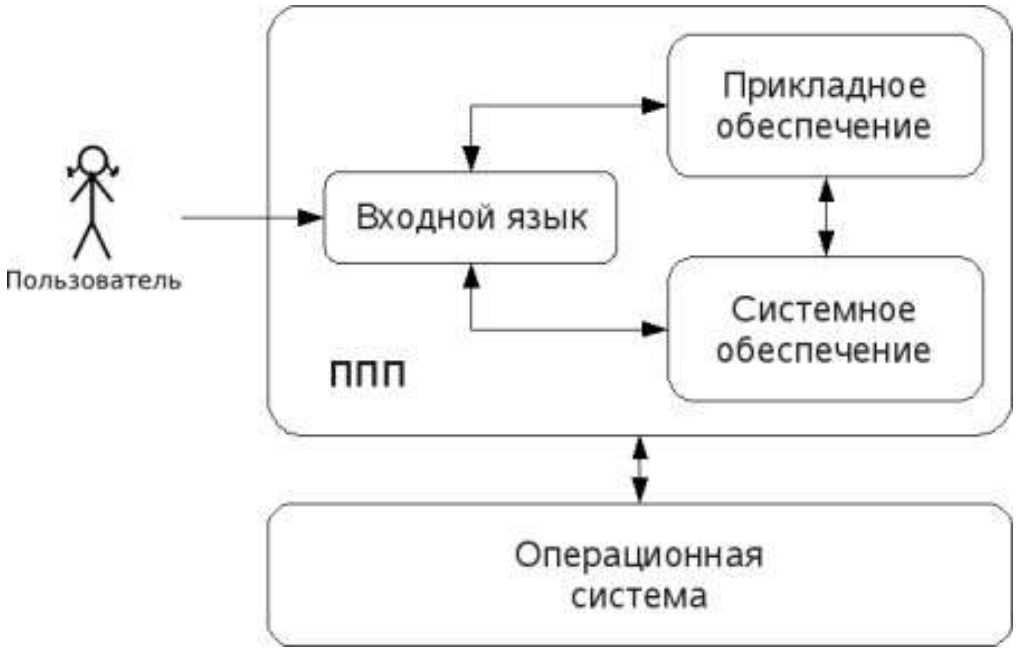


Рис. 2. Структура ППП.

Входной язык - основной инструмент при работе пользователя с пакетом прикладных программ. В качестве входного языка могут использоваться как универсальные (Pascal, Basic и

т.п.), так и специализированные, проблемно-ориентированные языки программирования (Cobol - для бизнес-приложений, Lisp - списочные структуры данных, Fortran и MathLAB - математические задачи и т.п.).

Развитый пакет может обладать несколькими входными языками, предназначенными для выполнения различных функций в рамках решаемого класса задач. Так, например, в пакете OpenOffice.org поддерживаются языки StarBasic, Python, JavaScript и Java. StarBasic является основным входным языком, предназначенным для автоматизации работы с пакетом, для этого языка имеется интегрированная среда разработки и встроенный отладчик. Скрипты на языках Python и JavaScript загружаются и исполняются из внешних файлов. На Java (через SDK и функции API OpenOffice) можно создавать модули расширения и полнофункциональные приложения-компоненты.

Входные языки отражают объем и качество предоставляемых пакетом возможностей, а также удобство их использования. Таким образом, именно входной язык является основным показателем возможностей ППП. Однако стоит отметить, что в современных пакетах обращение пользователя к языковым средствам обычно происходит косвенно, через графический интерфейс.

Предметное обеспечение отражает особенности решаемого класса задач из конкретной предметной области и включает:

- программные модули, реализующие алгоритмы (или их отдельные фрагменты) прикладных задач;
- средства сборки программ из отдельных модулей.

Наиболее распространено в настоящее время оформление программных модулей в виде библиотек, подключаемых статически или динамически. В зависимости от использованного разработчиками подхода к проектированию и реализации ППП такие библиотеки содержат встроенные классы и описания их интерфейсов (при использовании объектно-ориентированного программирования). При использовании парадигмы структурного программирования в библиотечных модулях содержатся процедуры и функции, предназначенные для решения некоторых самостоятельных задач. В обоих случаях библиотеки связаны с другими модулями пакета лишь входной и выходной информацией.

Системное обеспечение представляет собой совокупность низкоуровневых средств (программы, файлы, таблицы и т.д.), обеспечивающих определенную дисциплину работы

пользователя при решении прикладных задач и формирующих окружение пакета. К системному обеспечению ППП относят следующие компоненты:

- монитор - программа, управляющая взаимодействием всех компонентов ППП;
- транслятор(ы) с входных языков - для ППП характерно использование интерпретируемых языков;
- средства доступа к данным - драйверы баз данных и/или компоненты, представляющие доступ через унифицированные интерфейсы (ODBC, JDBC, ADO, BDE и т.п.);
- информационно-справочный модуль - предоставляет функции поддержки, среди которых информационные сообщения, встроенная справочная системы и т.п.

различные служебные программы, выполняющие низкоуровневые операции (автосохранение, синхронизация совместно используемых файлов и т.д.)

Приведенная логическая структура ППП достаточна условна и в конкретном ППП может отсутствовать четкое разделение программ на предметное и системное обеспечение. Например, программа планирования вычислений, относящаяся к прикладному обеспечению, может одновременно выполнять и ряд служебных функций (информационное обеспечение, связь с операционной системой и т.п.).

Кроме того, одни и те же программы в одном пакете могут относиться к предметному обеспечению, а в другом - к системному. Так, программы построения диаграмм в рамках специализированного пакета машинной графики естественно отнести к предметному обеспечению. Однако те же программы следует считать вспомогательными и относящимися к системному обеспечению, например, в пакете решения вычислительных задач.

ТЕМА 1.3 ЭВОЛЮЦИЯ ППП. ПРИМЕРЫ СОВРЕМЕННЫХ ППП

Этапы развития ППП

Первые ППП представляли собой простые тематические подборки программ для решения отдельных задач в той или иной прикладной области, обращение к ним выполнялось с помощью средств оболочки ОС или из других программ. Современный пакет является сложной программной системой, включающей специализированные системные и языковые средства. В относительно короткой истории развития вычислительных ППП можно выделить *4 основных поколения* (класса) пакетов. Каждый из этих: классов характеризуется определенными

особенностями входящих состав ППП компонентов - входных языков, предметного и системного обеспечения.

Первое поколение

В качестве входных языков ППП первого поколения использовались универсальные языки программирования (Фортран, Алгол-60 и т.п.) или языки управления заданиями соответствующих операционных систем. Проблемная ориентация входных языков достигалась за счет соответствующей мнемоники в идентификаторах. Составление заданий на таком языке практически не отличалось от написания программ на алгоритмическом языке.

Предметное обеспечение первых ППП, как правило, было организовано в форме библиотек программ, т.е. в виде наборов (пакетов) независимых программ на некотором базовом языке программирования (отсюда впервые возник и сам термин «пакет»). Такие ППП иногда называют *пакетами библиотечного типа*, или *пакетами простой структуры*.

В качестве системного обеспечения пакетов первого поколения обычно использовались штатные компоненты программного обеспечения ЭВМ: компиляторы с алгоритмических языков, редакторы текстов, средства организации библиотек программ, архивные системы и т.д. Эти пакеты не требовали сколько-нибудь развитой системной поддержки, и для их функционирования вполне хватало указанных системных средств общего назначения. В большинстве случаев разработчиками таких пакетов были прикладные программисты, которые пытались приспособить универсальные языки программирования к своим нуждам.

Второе поколение

Разработка ППП второго поколения осуществлялась уже с участием системных программистов. Это привело к появлению специализированных входных языков на базе универсальных языков программирования. Проблемная ориентация таких языков достигалась не только за счет использования определенной мнемоники, но также применением соответствующих языковых конструкций, которые упрощали формулировку задачи и делали ее более наглядной. Транслятор с такого языка представлял собой препроцессор (чаще всего макропроцессор) к транслятору соответствующего алгоритмического языка.

В качестве модулей в пакетах этого класса стали использоваться не только программные единицы (т.е. законченные программы на том или ином языке программирования), но и такие объекты, как последовательность операторов языка программирования, совокупность данных, схема счета и др.

Существенные изменения претерпели также принципы организации системного обеспечения ППП. В достаточно развитых пакетах второго поколения уже можно выделить элементы системного обеспечения, характерные для современных пакетов: монитор, трансляторы с входных языков, специализированные банки данных, средства описания модели предметной области и планирования вычислений и др.

Третье поколение

Третий этап развития ППП характеризуется появлением самостоятельных входных языков, ориентированных на пользователей-непрограммистов. Особое внимание в таких ППП уделяется системным компонентам, обеспечивающим простоту и удобство. Это достигается главным образом за счет специализации входных языков и включения в состав пакета средств автоматизированного планирования вычислений.

Четвертое поколение

Четвертый этап характеризуется созданием ППП, эксплуатируемых в интерактивном режиме работы. Основным преимуществом диалогового взаимодействия с ЭВМ является возможность активной обратной связи с пользователем в процессе постановки задачи, ее решения и анализа полученных результатов. Появление и интенсивное развитие различных форм диалогового общения обусловлено прежде всего прогрессом в области технических средств (графическая подсистема ЭВМ и средства мультимедиа, сетевые средства). Развитие аппаратного обеспечения повлекло за собой создание разнообразных программных средств поддержки диалогового режима работы (диалоговые операционные системы, диалоговые пакеты программ различного назначения и т. д.).

Прикладная система состоит из *диалогового монитора* - набора универсальных программ, обеспечивающих ведение диалога и обмен данными, и базы знаний об области. Информация о структуре, целях и форма диалога задает сценарий, в соответствии с который монитор управляет ходом диалога. Носителями процедурных знаний о предметной области являются прикладные модули, реализующие функции собственной системы. Таким образом, создание прикладной системы сводится к настройке диалогового монитора на конкретный диалог, путем заполнения базы знаний. При этом программировать в традиционном смысле этого слова приходится лишь прикладные модули, знания о диалоге вводятся в систему с помощью набора соответствующих средств - редактора сценариев. Логично требовать, чтобы редактор сценариев также представлял собой диалоговую программу, отвечавшую

рассмотренным выше требованиям. Благодаря готовому универсальному монитору программист может сосредоточиться на решении чисто прикладных задач, выделение же знаний о диалоге в сценарий обеспечивает в значительной степени необходимая гибкость программного продукта.

Большое внимание в настоящее время уделяется проблеме создания *«интеллектуальных ППП»*. Такой пакет позволяет конечному пользователю лишь сформулировать свою задачу в содержательных терминах, не указывая алгоритма ее решения. Синтез решения и сборка целевой программы производятся автоматически. При этом детали вычислений скрыты от пользователя, и компьютер становится интеллектуальным партнером человека, способным понимать его задачи. Предметное обеспечение подобного ППП представляет собой некоторую базу знаний, содержащую как процедурные, так и описательные знания. Такой способ решения иногда называют концептуальным программированием, характерными особенностями которого является программирование в терминах предметной области использование ЭВМ уже на этапе постановки задач, автоматический синтез программ решения задачи, накопление знаний о решаемых задачах в базе знаний.

Краткий обзор некоторых ППП

Для иллюстрации ранее рассмотренных материалов приведем несколько примеров современных пакетов прикладных программ из различных предметных областей. Учитывая, что постоянно появляются новые версии программных продуктов, здесь будут рассматриваться не возможности конкретных версий, а лишь основные структурные компоненты, входящие в состав того или иного пакета.

Autodesk AutoCAD

Основное назначение ППП AutoCAD - создание чертежей и проектной документации. Современные версии этого пакета представляют существенно большие возможности, среди которых построение трехмерных твердотельных моделей, инженерно-технические расчеты и многое другое.

Первые версии системы AutoCAD, разрабатываемой американской фирмой Autodesk, появились еще в начале 80-х годов двадцатого века, и сразу же привлекли к себе внимание своим оригинальным оформлением и удобством для пользователя. Постоянное развитие системы, учет замечаний, интеграция с новыми продуктами других ведущих фирм сделали

AutoCAD мировым лидером на рынке программного обеспечения для автоматизированного проектирования.

Языковые средства

В основе языковых средств ППП AutoCAD - технология Visual LISP, базирующаяся на языке AutoLISP (подмножество языка LISP) и используемая для создания приложений и управления в AutoCAD. Visual LISP представляет полное окружение, включающее:

- Интегрированную среду разработки, облегчающую написание, отладку и сопровождение приложений на AutoLISP
- Доступ к объектам ActiveX и обработчикам событий
- Защиту исходного кода
- Доступ к файловым функциям операционной системы
- Расширенные функции языка LISP для обработки списочных структур данных.

Для разработчиков совместимых приложений в AutoCAD включена поддержка ObjectARX. Это программное окружение представляет объектно-ориентированный интерфейс для приложений на языках C++, C# и VB.NET и обеспечивает прямой доступ к структурам БД, графической подсистеме и встроенным командам пакета.

Кроме того, в AutoCAD имеется поддержка языка Visual Basic for Applications (VBA), что позволяет использовать этот пакет совместно с другими приложениями, в частности, из семейства Microsoft Office.

Предметное обеспечение

К предметному обеспечению пакета в первую очередь относятся функции построения примитивов - различных элементов чертежа. Простые примитивы - это такие объекты как точка, отрезок, круг (окружность) и т.д. К сложным примитивам относятся: полилиния, мультилиния, мультитекст (многострочный текст), размер, выноска, допуск, штриховка, вхождение блока или внешней ссылки, атрибут, растровое изображение. Кроме того, есть пространственные примитивы, видовые экраны и пр. Операции построения *большей части* примитивов могут быть выполнены через пользовательский интерфейс, *все* - через команды языка.

Высокоуровневые средства представлены расширениями и приложениями AutoCAD для конкретных предметных областей. Например в машиностроении используется Autodesk

Mechanical Desktop - предназначенный для сложного трехмерного моделирования, в том числе валов и пружин. Для проектирования деталей из листовых материалов предназначена система Copra Sheet Metal Bender Desktop (разработчик - Data-M Software GmbH). Моделирование динамики работы механизмов может выполняться в системе Dynamic Designer (Mechanical Dynamics). В числе известных архитектурных и строительных приложений можно отметить системы АРКО (АПИО-Центр), СПДС GraphiCS (Consistent Software), ArchiCAD. Для проектирования промышленных объектов может использоваться система PLANT-4D (CEA Technology). Это лишь некоторые из областей использования AutoCAD.

Системное обеспечение

Среди системного обеспечения следует отметить основной формат файлов AutoCAD .dwg, который стал стандартом «де факто» для прочих САПР.

К системному же обеспечению относятся типовые и специализированные библиотеки деталей и шаблонов, использование которых позволяет существенно ускорить процесс проектирования. Здесь же упомянем требования отраслевых и государственных стандартов, которым должны соответствовать чертежи и спецификации.

Конфигурация и настройки различных режимов AutoCAD устанавливаются через т.н. системные переменные. Изменяя их значения можно задавать пути к файлам, точность вычислений, формат вывода и многое другое.

Adobe Flash

Adobe (ранее Macromedia) Flash - это технология и инструментарий разработки интерактивного содержания с большими функциональными возможностями для цифровых, веб- и мобильных платформ. Она позволяет создавать компактные, масштабируемые анимированные приложения (ролики), которые можно использовать как отдельно, так и встраивая в различное окружение (в частности, в веб-страницы). Эти возможности обеспечиваются следующими компонентами технологии: языком Action Script, векторным форматом .swf и видеоформатом .flv, всевозможными flash-плейерами для просмотра и редакторами для создания.

Рассмотрим интегрированную среду Adobe Flash как основное средство создания flash-приложений. При этом отметим, что языковые и системные средства относятся не только к этому пакету, а к технологии в целом.

Язык ActionScript

ActionScript — объектно-ориентированный язык программирования, который добавляет интерактивность, обработку данных и многое другое в содержимое Flash-приложений. Синтаксис ActionScript основан на спецификации ECMAScript (сюда же относятся языки JavaScript и JScript). Библиотека классов ActionScript, написанная на C++, представляет доступ к графическим примитивам, фильтрам, принтерам, геометрическим функциям и пр.

ActionScript как язык появился с выходом 5 версии Adobe (тогда еще Macromedia) Flash, которая стала первой программируемой на ActionScript средой. Первый релиз языка назывался ActionScript 1.0. Flash 6 (MX). В 2004 году Macromedia представила новую версию ActionScript 2.0 вместе с выходом Flash 7 (MX 2004), в которой было введено строгое определение типов, основанное на классах программирование: наследование, интерфейсы и т. д. Также Macromedia была выпущена модификация языка Flash Lite для программирования под мобильные телефоны. ActionScript 2.0 является не более чем надстройкой над ActionScript 1.0, то есть на этапе компиляции ActionScript 2.0 осуществляет некую проверку и превращает классы, методы ActionScript 2.0 в прежние прототипы и функции ActionScript 1.0.

В 2005 году вышел ActionScript 3.0 в среде программирования Adobe Flex, а позже в Adobe Flash 9.

ActionScript 3.0 (текущая версия на момент подготовки этого материала) представляет, по сравнению с ActionScript 2.0 качественное изменение, он использует новую виртуальную машину AVM 2.0 и дает взамен прежнего формального синтаксиса классов настоящее классовое (class-based) Объектно-ориентированное программирование. ActionScript 3.0 существенно производительней предыдущих версий и по скорости приблизился к таким языкам программирования, как Java и C++.

С помощью ActionScript можно создавать интерактивные мультимедиа-приложения, игры, веб-сайты и многое другое.

Системное обеспечение

ActionScript исполняется виртуальной машиной (ActionScript Virtual Machine), которая является составной частью Flash Player. ActionScript компилируется в байткод, который включается в SWF-файл.

SWF-файлы исполняются Flash Player-ом. Flash Player существует в виде плагина к веб-браузеру, а также как самостоятельное исполняемое приложение. Во втором случае возможно создание исполняемых exe-файлов, когда swf-файл включается во Flash Player.

Для создания и просмотра видеофайлов в формате flv используются программные кодеки, поддерживающие этот формат.

Прикладное обеспечение

К прикладному обеспечению в рамках технологии Flash относятся средства создания роликов в форматах .swf, .flv и .exe. Основным инструментом является среда среда Adode Flash, включающая различные средства для создания и редактирования мультимедийного содержания, в т.ч. видео- и аудиофайлов, интегрированную среду разработки на ActionScript и множество дополнительных функций упрощения процесса создания роликов.

Пакет MatLab

MatLab (сокращение от англ. «Matrix Laboratory») — пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений, и язык программирования, используемый в этом пакете. По данным фирмы-разработчика, более 1000000 инженерных и научных работников используют этот пакет, который работает на большинстве современных операционных систем, включая GNU/Linux, Mac OS, Solaris и Microsoft Windows.

Язык MatLab

MATLAB как язык программирования был разработан Кливом Моулером (англ. Cleve Moler) в конце 1970-х годов. Целью разработки служила задача использования программных математических библиотек Linpack и EISPACK без необходимости изучения языка Фортран. Акцент был сделан на матричные алгоритмы.

Программы, написанные на MATLAB, бывают двух типов — функции и скрипты. Функции имеют входные и выходные аргументы, а также собственное рабочее пространство для хранения промежуточных результатов вычислений и переменных. Скрипты же используют общее рабочее пространство. Как скрипты, так и функции не компилируются в машинный код, а сохраняются в виде текстовых файлов. Существует также возможность сохранять так называемые pre-parsed программы — функции и скрипты, приведенные в вид, удобный для машинного исполнения и, как следствие, более быстрые по сравнению с обычными.

Системное обеспечение

Язык MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования. Имеются интерфейсы для получения доступа к внешним данным, клиентам и серверам, общающимся через технологии Component Object Model (COM) или Dynamic Data Exchange (DDE), а также периферийным устройствам, которые взаимодействуют напрямую с MATLAB. Многие из этих возможностей известны под названием MATLAB API.

Встроенная среда разработки позволяет создавать графические интерфейсы пользователя с различными элементами управления, такими как кнопки, поля ввода и другими. С помощью компонента MATLAB Compiler эти графические интерфейсы могут быть преобразованы в самостоятельные приложения.

Для MATLAB имеется возможность создавать специальные наборы инструментов (англ. toolbox), расширяющие его функциональность. Наборы инструментов представляют собой коллекции функций, написанных на языке MATLAB для решения определенного класса задач.

Прикладное обеспечение

MATLAB предоставляет удобные средства для разработки алгоритмов, включая высокоуровневые с использованием концепций объектно-ориентированного программирования. В нем имеются все необходимые средства интегрированной среды разработки, включая отладчик и профайлер.

MATLAB предоставляет пользователю большое количество (несколько сотен) функций для анализа данных, покрывающие практически все области математики, в частности:

- Матрицы и линейная алгебра — алгебра матриц, линейные уравнения, собственные значения и вектора, сингулярности, факторизация матриц и другие.
- Многочлены и интерполяция — корни многочленов, операции над многочленами и их дифференцирование, интерполяция и экстраполяция кривых и другие.
- Математическая статистика и анализ данных — статистические функции, статистическая регрессия, цифровая фильтрация, быстрое преобразование Фурье и другие.

- Обработка данных — набор специальных функций, включая построение графиков, оптимизацию, поиск нулей, численное интегрирование (в квадратурах) и другие.
- Дифференциальные уравнения — решение дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений, дифференциальных уравнений с запаздыванием, уравнений с ограничениями, уравнений в частных производных и другие.
- Разреженные матрицы — специальный класс данных пакета MATLAB, использующийся в специализированных приложениях.

В составе пакета имеется большое количество функций для построения графиков, в том числе трехмерных, визуального анализа данных и создания анимированных роликов, функции для создания алгоритмов для микроконтроллеров и других приложений.

ЧАСТЬ II. ППП MS OFFICE

ТЕМА 2.1 СТРУКТУРА И СОСТАВ MS OFFICE. ОСНОВНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Структура MS Office и назначение компонентов

ППП Microsoft Office - это совокупность программных средств автоматизации офисной деятельности. В состав пакета входит множество приложений, каждое из которых предназначено для выполнения определенных функций и может быть использовано автономно и независимо от остальных. Весь набор офисных приложений можно разделить на *основные* и *дополнительные*.

Основные компоненты Microsoft Office

Список и назначение основных компонентов, входящих в состав Microsoft Office приведен в таб. 1.

Таблица 1. Основные компоненты Microsoft Office

Название приложения	Функциональное назначение приложения
Microsoft Word	Текстовый процессор
Microsoft Excel	Табличный процессор
Microsoft PowerPoint	Система подготовки презентаций
Outlook	Система управления персональной информацией

Microsoft Access	Система управления базами данных
Microsoft Binder	Система управления подшивками
Microsoft FrontPage	Система управления Web-узлами
Microsoft PhotoDraw	Графический редактор
Microsoft Publisher	Настольная издательская система
Microsoft Project	Система управления проектами
Microsoft Team Manager	Система управления персоналом

Дополнительные компоненты MS Office

Кроме основных компонентов, в семейство Microsoft Office входит большое количество вспомогательных приложений, которые устанавливаются (или не устанавливаются) вместе с основными. Ими можно воспользоваться из основных приложений или вызвать независимо. В таб. 2 перечислены некоторые из вспомогательных приложений.

Таблица 2. Некоторые вспомогательные приложения Microsoft Office

Название приложения	**Функциональное назначение приложения**
Microsoft Query	Интерпретатор запросов к внешним базам данных
Microsoft Organization Chart	Программа рисования блок-схем
Microsoft WordArt	Программа создания фигурных текстов
Microsoft Equation	Редактор математических формул
Microsoft Map	Программа отображения данных на географических картах
Microsoft Graph	Программа построения диаграмм
Microsoft Photo Editor	Графический редактор
Microsoft Draw	Средство рисования
Microsoft Find Fast	Служба индексации документов
Microsoft Extended Finder	Средство поиска документов в папках файловой системы и электронной почты
Microsoft Script Editor	Редактор сценариев
Microsoft ClipArt	Коллекция картинок и клипов

Панель Microsoft Office	Средство быстрого доступа к приложениям Office

Кроме основных и вспомогательных приложений, могут быть установлены и использованы различные расширения (надстройки). Их можно условно разделить на три группы:

1. *Самостоятельные приложения*, разработанные фирмой Microsoft, которые являются компонентами семейства Microsoft Office, но формально не входят в состав пакета. Примерами являются приложения Microsoft Project и Microsoft Team Manager.
2. *Надстройки* над компонентами Microsoft Office, разработанные фирмой Microsoft и представляющие собой дополнительные функции. Как правило, надстройки оформляются не в виде готовых к выполнению программ, а в виде документов специального типа: шаблонов, рабочих книг, библиотек динамической компоновки (DLL) и т.п.
3. *Приложения третьих фирм*, разработанные для пользователей Microsoft Office. В этот класс попадают как продукты сторонних фирм, так и собственные разработки пользователей. Сюда можно отнести средства распознавания текстов (OCR), автоматического перевода текста, средства управления большими массивами документов (перечисленные задачи не реализованы или слабо развиты в самом пакете MS
   Office).

Приведенный перечень основных компонентов носит условный характер, поскольку состав пакета зависит от следующих факторов:

1. *Устанавливаемый комплект (или редакция) пакета*. Пакет выпускается в нескольких редакциях, и состав приложений в разных редакциях различен.
2. *Источник установки. Установка* может быть выполнена с компакт-диска или с сетевого сервера. Наборы файлов, которые устанавливаются на компьютер, существенно различаются.
3. *Операционная система*. Microsoft Office может работать под управлением различных ОС: MS Windows и Mac OS. Эти операционные системы могут иметь разные версии и модификации, что также влияет на состав устанавливаемых компонентов.

4. *Наличие на компьютере в момент установки предшествующих версий*. Некоторые компоненты старых версий автоматически включаются в состав обновляемой версии Microsoft Office (если они уже установлены на компьютере).
5. *Параметры, заданные при установке*. В случае так называемой выборочной (т.е. по выбору пользователя) установки, можно указать несколько десятков независимых параметров, влияющих на состав пакета.

Несмотря на большое число различных приложений в составе пакета, все они в совокупности образуют единое целое. Для каждого из приложений MS Office характерно наличие следующих отличительных признаков:

1. совместимость по данным;
2. унифицированный интерфейс;
3. единые средства программирования.

Документы Microsoft Office

Единица данных самого верхнего уровня структуризации в Microsoft Office называется **документом**.

Документы классифицируются по типам в зависимости от того, какого сорта информация в них хранится. Как правило, документы разных типов обрабатываются разными приложениями Microsoft Office. Основные типы документов, с которыми работают программы Microsoft Office, перечислены в таб. 3.

Таблица 3. Основные типы документов Microsoft Office

Название	Расширение	Приложение	Краткое описание
Документ	.doc	Word	Основной тип документов Word. Содержит форматированный текст, т.е. текст с дополнительной информацией о шрифтах, отступах, интервалах и т.п., а также рисунки, таблицы и другие элементы
Рабочая книга	.xls	Excel	Основной тип документов Excel. Содержит данные различных типов: формулы, диаграммы и макросы
База данных	.mdb	Access	Основной тип документов Access. Содержит как собственно базу данных, то есть совокупность таблиц, так и соответствующие запросы, макросы, модули, формы и отчеты

Презентация	.ppt	PowerPoint	Основной тип документов PowerPoint. Содержит презентацию, состоящую из набора слайдов, заметок выступающего, раздаточных материалов и другой информации
Публикация	.pub	Publisher	Основной тип документов Publisher. Как и Word, содержит форматированный текст, рисунки, таблицы и т.п.
План проекта	.mpp	Project	Основной тип документов Project. Содержит календарный план проекта, описание задач, ресурсов и их взаимосвязи

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующий вывод: входящие в состав пакета MS Office приложения способны тесно взаимодействовать при решении прикладных задач; они создают единую информационную среду и позволяют обмениваться объектами. Документы Microsoft Office являются частными примерами объектов. Поэтому Microsoft Office является *документо-ориентированным пакетом* (средой).

Программная среда

Основным средством разработки приложений в MS Office является комплексное решение на основе языка Visual Basic, а именно - Visual Basic for Application (VBA). Эта технология включает макрорекордер, интерпретатор Visual Basic, интегрированную среду разработки с встроенным отладчиком, библиотеки времени выполнения (runtime library) и библиотеки типов, представляющие объекты пакета. Эти средства позволяют расширять функциональность пакета и адаптировать его к решению специализированных задач.

Интерфейс MS Office

Приложения Microsoft Office имеют унифицированный интерфейс, суть которого заключается в следующем: сходные функции имеют одинаковое обозначение (название команды или значок на кнопке), а несходные функции имеют различные обозначения.

В большей степени унификация коснулась интерфейсов таких приложений, как Microsoft Word, Microsoft Excel и Microsoft PowerPoint.

Одним из достоинств пакета Microsoft Office является последовательное использование графического интерфейса пользователя (Graphical User Interface, GUI), представляемого операционной системой и различных элементов управления. Как

правило, отдельные элементы группируются в более крупные конструкции, такие как окна, панели инструментов, меню. Рассмотрим характеристику каждой из этих групп.

Оконный интерфейс

Оконный интерфейс - такой способ организации пользовательского интерфейса программы, когда каждая интегральная часть располагается в *окне* — собственном субэкранном пространстве, находящемся в произвольном месте «над» основным экраном. Несколько окон одновременно располагающихся на экране могут перекрываться, находясь
«выше» или «ниже» друг относительно друг

В MS Office использует окна четырех типов:

- окно приложения;
- окно документа; • диалоговое окно;
- форма.

Панели инструментов

Панели инструментов - это элементы пользовательского интерфейса, на которых могут располагаются такие элементы управления, как кнопки быстрого вызова и раскрывающиеся списки. Панели инструментов разных приложений могут содержать кнопки, сходные по функциям и внешнему виду, что упрощает освоение интерфейса Microsoft Office.

Панели инструментов могут быть:

- пристыкованными вдоль границы окна приложения;
- плавающими, т.е. находится в любой части окна приложения;
- представленными в отдельных окнах; в этом случае форму и размеры панели инструментов можно менять произвольно.

Меню

Меню представляет доступ к иерархическим спискам доступных команд. Результатом выбора команды из меню может быть:

- непосредственное выполнение некоторого действия;
- раскрытие еще одного меню;

- раскрытие диалогового окна или формы.

Меню интерфейса Microsoft Office, кроме строки меню любого приложения, можно разделить (по способу перехода к ним) на раскрывающиеся и контекстные (или всплывающие).

Элементы управления

Элементы управления - это объекты оконного интерфейса, реализующие типовые операции с интерфейсом: щелчок мышью, выбор из списка, выбор вариантов, прокрутка и т.п. К элементам управления относятся следующие: кнопки, текстовые поля (или поля ввода), флажки, переключатели, списки и раскрывающиеся списки, полосы прокрутки, палитры, счетчики и прочие, специфичные для некоторых приложений или условий.

ТЕМА 2.2 ВВЕДЕНИЕ В ОФИСНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Офисное программирование — это процесс разработки приложений, предназначенных для автоматизации офисной деятельности с использованием специализированных пакетов (MS Office, OpenOffice.org или подобных).

Офисное программирование имеет ряд особенностей, отличающих его от программирования в общем смысле:

- цели разработки;
- область применения;
- макроязык;
- среда разработки;
- поддержка объектно-ориентированного программирования.

Рассмотрим эти особенности на примере MS Office.

Цели разработки

В офисной среде *программный проект неразрывно связан с документом*, хранится как часть документа и не может существовать независимо от него. *Документ, а не программа, является целью разработки.*

Стандартные возможности среды по работе с документами велики. Однако возможность изменить типовой документ, снабдив его дополнительными функциями – это одна из важнейших задач офисного программирования. Для ее решения офисная среда представляет совокупность библиотек классов, которые составляют каркас (Framework)

текстовых документов, электронных таблиц, презентаций, баз данных и приложений на основе этих документов. Всякий раз, когда создается новый документ, его каркас составляют объекты библиотек, заданные по умолчанию. Этот каркас можно существенно изменить, добавив в документ новые свойства. Расширение каркаса не требует от программиста значительных усилий – достаточно включить в него необходимые библиотеки классов.

Область применения

Область применения офисного программирования широка – от настройки отдельных документов до решения задач автоматизации офисной деятельности масштаба предприятия, в т.ч. ориентированных на совместную работу в глобальной сети.

Visual Basic for Application

Visual Basic для приложений (Visual Basic for Application, VBA) – это инструмент разработки приложений, который позволяет создавать программные продукты, решающие практически все задачи, встречающиеся в среде Windows. Эти продукты можно использовать, например, для оформления документов (подготовки текстов) или анализа данных таблиц (электронных таблиц). VBA – уникальное приложение, поскольку оно встраивается в другое приложение и расширяет его функциональные возможности.

Visual Basic for Application (VBA) - стандартный макроязык пакета Microsoft Office, предназначенный для расширения функциональных возможностей приложения в котором используется.

С помощью VBA можно:

- создать собственное диалоговое окно и придать ему требуемый внешний вид;
- создать макросы, расширяющие функциональные возможности приложения, в которое встроен VBA;
- изменить меню приложения Microsoft Office;
- управлять другим приложением Microsoft Office или принадлежащими ему данными;
- объединить данные из нескольких приложений Microsoft Office в одном документе;
- автоматически создавать или изменять страницы Web, совместно используя приложения Microsoft Office и VBA.

Для разработчика доступны следующие инструменты и средства, которые используются при создании проекта VBA:

- отладка приложений без предварительной компиляции;
- средства Win32 API;
- SQL и объекты доступа к данным для управления данными и извлечения их из внешних источников данных, таких как Microsoft SQL Server;
- построение и проверка элементов интерфейса непосредственно в среде разработки VBA (Integrated Development Environment, IDE);
- связывание программ и процедур с событиями, которые возникают в приложениях VBA.

Среда разработки

Среда приложений Office ориентирована в первую очередь на пользователей, а не на программистов и в ней можно создавать документы без всякого программирования. Поэтому программист обычно начинает работать с документами не на пустом месте, а с их заготовками, созданными пользователями, т.е. и сам программист может выступать в роли пользователя. Средства совместной работы над документами Office обеспечивают одновременную работу программистов и пользователей.

Среда MS Office предлагает два способа создания программ, отличающихся подходом к процессу: использование макрорекордера и ручное кодирование (на языке VBA). Эти подходы ориентированы на разные категории: непосредственно пользователей и программистов соответственно.

Макрорекордер (MacroRecorder) – это программный инструмент, записывающий действия пользователя при работе с документами и приложениями, с сохранением записи в виде макроса -исходного кода на языке VBA. При вызове сохраненного макроса воспроизводится вся сохраненная последовательность действий.

Макрорекордер представляет возможность создания программного проекта или, по крайней мере, его отдельных компонентов автоматически, без программирования. Для записи и воспроизведения макроса не требуется специальных знаний, поэтому пользователь может самостоятельно создавать программы (макросы), в общем случае даже не представляя себе, как они работают.

Для программиста макрорекордер полезен тем, что позволяет создавать фрагменты программы автоматически, тем самым увеличивая скорость разработки и уменьшая время отладки.

Интегрированная среда разработки на VBA (Visual Basic Environment, VBA) - встроенное в MS Office средство для написания, тестирования и отладки приложений на VBA. Среда VBA представляет все возможности для создания законченных офисных приложений, включая средства визуального проектирования пользовательского интерфейса. VBA ориентирована на использование программистами для разработки офисных приложений (это отнюдь не означает, что пользователи не могут применять VBA).

Поддержка ООП

Разработка приложений для MS Office тесно связана с парадигмой объектно-ориентированного программирования. Все документы (более того, сами компоненты пакета) в MS Office - суть объекты, наделенные собственными наборами свойств (характеристик объекта), методов (подпрограмм управления свойствами) и событий (подпрограмм, обрабатывающих изменения состояния объекта в результате некоторых действий). Соответственно, для обеспечения более полной интеграции с пакетом, входной язык (VBA) также поддерживает ООП.

Все объекты приложения MS Office образуют иерархическую структуру, которая определяет связь между ними и способ доступа. Такая структура называется объектной моделью (object model). За рамки объектной модели выходят, но также могут использоваться в офисных приложениях, внешние объекты, поддерживающие технологии DDE, OLE/ActiveX и ряд других.

В объектно-ориентированную концепцию удачно вписывается технология *визуального программирования*. Все отображаемые элементы графического интерфейса, такие как формы, элементы управления, меню и панели инструментов являются объектами, наделенными набором свойств и методов и способными реагировать на события (например, щелчки мыши, нажатия клавиш и т.п.). При визуальном подходе не требуется программного задания (хотя это и возможно) их основных свойств (например, ширина или высота, цвет фона и т.п.). Эти свойства можно задать при помощи мыши (например, ширину и высоту формы путем операции "перетаскивания" маркеров) или

установить их в окне свойств (название формы, цвет фона формы и т. д.). Таким образом, визуальное программирование делает проектирование интерфейса программы более наглядным и быстрым. При этом сохраняется возможность управлять всеми объектами и программно.

Преимущества офисного программирования

Преимущества, которые получает конечный пользователь, использующий программируемые офисные документы:

- Пользователь получает документы, обладающие новыми функциями и способные решать задачи, характерные для проблемной области пользователя.
- Пользователь находится в единой офисной среде независимо от того, с каким документом он работает в данный момент и какой программист разрабатывал этот документ.
- Большинство доступных при работе с документами функций являются общими для всех документов, поскольку их предоставляет сама офисная среда. Единый стиль интерфейса разных документов облегчает работу с ними.
- Пользователь сам, не будучи программистом, способен создавать простые виды программируемых офисных документов, постепенно совершенствуясь в этой деятельности.

Преимущества, которые получает программист, работающий в Office:

- В распоряжении программиста находится мощная интегрированная среда. Для него эта среда представлена в виде совокупности хорошо организованных объектов, доступных в языке программирования и по принципу работы ничем не отличающихся от встроенных объектов языка или объектов, создаваемых самим программистом.
- Большинство повседневных задач становятся для него простыми, – чтобы их решить, зачастую достаточно стандартных средств.
- Там, где стандартных средств не хватает, где у документа должны появиться новые функциональные возможности, где необходимо создать документ по заказу, вступает в силу язык программирования – VBA, существенная особенность которого – возможность работы с объектами любого из приложений Office.

- Офисное программирование позволяет применять на практике идеи компонентного программирования. Компонентный подход предполагает взаимодействие компонентов, создаваемых в разных программных средах, на разных языках, на разных платформах и находящихся на разных машинах. Работа с компонентами (DLL, ActiveX, AddIns, ComAddIns) является неотъемлемой частью офисного программирования.

ТЕМА 2.3 МАКРОСЫ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАКРОРЕКОРДЕРА

Макросы

Независимо от используемых операционной системы и программных приложений MS Office пользователь часто выполняет одни и те же последовательности команд для многих рутинных задач. Вместо повторения последовательности команд каждый раз, когда необходимо выполнить какую-либо задачу, можно создать макрос (macro), который вместо пользователя будет выполнять эту последовательность. Термин macro произошел от греческого слова, означающего расширенный или растянутый.

Макрос – это программа (в контексте офисного программирования - созданная автоматически), состоящая из списка команд, которые должны быть выполнены приложением.

Основными преимуществами использования макросов являются:

- повышение точности и скорости работы, поскольку компьютеры лучше приспособлены для выполнения повторяющихся задач, чем человек;
- при выполнении макросов обычно нет необходимости в присутствии человека-оператора; в случае, если макрос очень длинный и выполняет операции, требующие значительного времени (например, поиск в базе данных и сортировка), пользователь может переключиться на другое приложение.

Макрос служит для объединения нескольких различных действий в одну процедуру, которую можно легко вызвать. Этот список команд состоит в основном из макрокоманд, которые тесно связаны с приложением, в котором создается макрос – т.е. с командами Word, Excel или других приложений Microsoft Office.

Можно выделить *три основные разновидности макросов*:

1. *Командные макросы* – это наиболее распространенные макросы, обычно состоящие из операторов, эквивалентным тем или иным командам меню или параметрам диалоговых окон. Основным предназначением такого макроса является выполнение действий, аналогичных командам меню – т.е. изменение окружения и основных объектов приложения.
2. *Пользовательские функции* – работают аналогично встроенным функциям приложения. Отличие этих функций от командных макросов состоит в том, что они используют значения передаваемых им аргументов, производят некоторые вычисления и возвращают результат в точку вызова, но не изменяют среды приложения.
3. *Макрофункции* – представляют сочетание командных макросов и пользовательских функций. Они могут использовать аргументы и возвращать результат, подобно пользовательским функциям, а также могут изменять среду приложения, как и командные макросы. Чаще всего эти макросы вызываются из других макросов, и активно используются для модульного программирования.

Поддержка макросов позволяет порой обойтись вообще безо всякого программирования: достаточно включить автоматическую запись выполняемых пользователем действий и в результате получить готовый макрос, а затем назначить ему кнопку на панели инструментов или новую команду меню, которые будут использоваться для вызова. Простые макросы удается создавать, не написав вручную ни одной строки программного кода.

Для разработки же серьезных приложений приходится программировать.

Таким образом, различают 2 способа разработки макроса:

- автоматическое создание, с использованием макрорекордера;
- написание макроса "с нуля", используя язык программирования VBA.

Отметим, что возможен и комбинированный подход: фрагменты будущей программы записываются автоматически, а затем они корректируются и дополняются "рукописным" кодом.

Для записи макросов из приложений Microsoft Office используется **макрорекордер**. Это встроенный инструмент, который фиксирует все действия пользователя, включая ошибки и неправильные запуски. При выполнении макроса интерпретируется каждая

записанная макрорекордером команда точно в такой последовательности, в которой пользователь выполнял их во время записи.

Для **записи макроса** в приложении Microsoft Office можно использовать меню "Сервис/Макрос/Начать запись" или выбрать кнопку "Записать макрос" на панели инструментов Visual Basic. До начала записи нужно указать имя макроса и определить, где он будет храниться и как будет доступен. Затем выполнить действия, которые требуется сохранить в макросе. Для завершения записи нужно на панели инструментов "Остановка записи" щелкнуть кнопку "Остановить запись".

Для **выполнения макроса** необходимо:

1. Установить курсор в место вставки выполнения макроса.
2. Выбрать пункт меню "Сервис/Макрос/Макросы".
3. В появившемся диалоговом окне "Макрос" выбрать имя нужного макроса и выбрать "Выполнить".

Чтобы **просмотреть код** записанного макроса, надо выбрать меню "Сервис/Макрос/Макросы". В появившемся диалоговом окне выбрать имя нужного макроса и щелкнуть кнопку "Изменить". Исходный код указанного макроса будет загружен в окно редактора Visual Basic.

Структура записанного макроса

Макросы, создаваемые макрорекордером MS Office, сохраняются в специальной части файла данных, называемой *модулем*. Модуль VBA содержит исходный код программы на языке VBA. Фактически макрос является подпрограммой (а точнее, процедурой) VBA. Записанный макрос имеет строго определенную структуру. Ниже представлен исходный код простого макроса, созданного в Microsoft Word.

Листинг 1. Пример макроса

```
Sub Hello()
' Макрос изменяет размер, начертание шрифта, выравнивание абзаца и
' выводит надпись в активный документ MS Word
'
    Selection.Font.Size = 24
    Selection.Font.Bold = wdToggle
    Selection.ParagraphFormat.Alignment = wdAlignParagraphCenter
```

```
    Selection.TypeText Text:="Hello, World!"
End Sub
```

В общем виде структуру кода макроса можно представить следующим образом[2]:

```
Sub имяМакроса ()
' текст комментария
    Оператор1
    Оператор2 ...
    ОператорN
End Sub
```

Каждый макрос VBA начинается с ключевого слова Sub, за которым следует имя макроса. Строку, содержащую ключевое слово Sub и имя макроса, называют *строкой объявления (declaration)* макроса. За именем макроса всегда следуют пустые круглые скобки (т.к. макрос является процедурой VBA без параметров).

За строкой объявления макроса следуют строки комментариев. *Комментарий (comment)* – это строка в макросе VBA, которая не содержит инструкций, являющихся частью этого макроса. Каждая строка комментария начинается с символа апострофа ('). Комментарии содержат имя макроса и текст, который был введен пользователем в текстовое поле "Описание" ("Description") диалогового окна "Запись макроса" ("Record Macro") в момент записи этого макроса.

Сразу за объявлением макроса следует *тело макроса (body)*. Каждая строка в теле макроса состоит из одного или более операторов VBA. *Оператор VBA (statement)* – это последовательность ключевых слов и других символов, которые вместе составляют одну полную инструкцию для VBA. Макрос VBA состоит из одного или нескольких операторов.

Конец макроса выделяется ключевой строкой End Sub, завершающей тело макроса.

ТЕМА 2.4 СРЕДА РАЗРАБОТКИ VBA

Visual Basic for Application (VBA) – это система программирования, которая используется как единое средство программирования во всех приложениях Microsoft

[2] Локализованные версии пакета MS Office позволяют использовать в макросах символы национальных алфавитов (например, в идентификаторах). Однако не следует пользоваться этой сомнительной возможностью во избежании сложностей с отладкой и портированием приложений на VBA.

Office. Всякая система программирования включает в себя, по меньшей мере, три составные части:

1. Язык (или языки) программирования.
2. Среду разработки, т.е. набор инструментов для написания программ, редактирования, отладки и т.п.
3. Библиотеку (или библиотеки) стандартных программ, т.е. набор готовых программ (процедур, функций, объектов и т.д.), которые можно использовать как готовые элементы при построении новых программ.

Для создания офисных приложений в MS Office имеется *интегрированная среда разработки* (Integrated Development Environment, *IDE*) с унифицированным интерфейсом. VBA IDE – это набор инструментов разработки программного обеспечения, таких как редактор Visual Basic (Visual Basic Editor, VBA), средства отладки, средства управления проектом и т.д.

Вызов VBA IDE из любого приложения выполняется через комбинацию клавиш Alt+F11 или меню "Сервис/Макрос/Редактор Visual Basic".

Структура VBA

VBA – это стандартное интерфейсное окно, содержащее меню, панели инструментов, другие окна и элементы, которые применяются при создании проектов VBA. Общий вид окна редактора Visual Basic представлен на рис. 3.

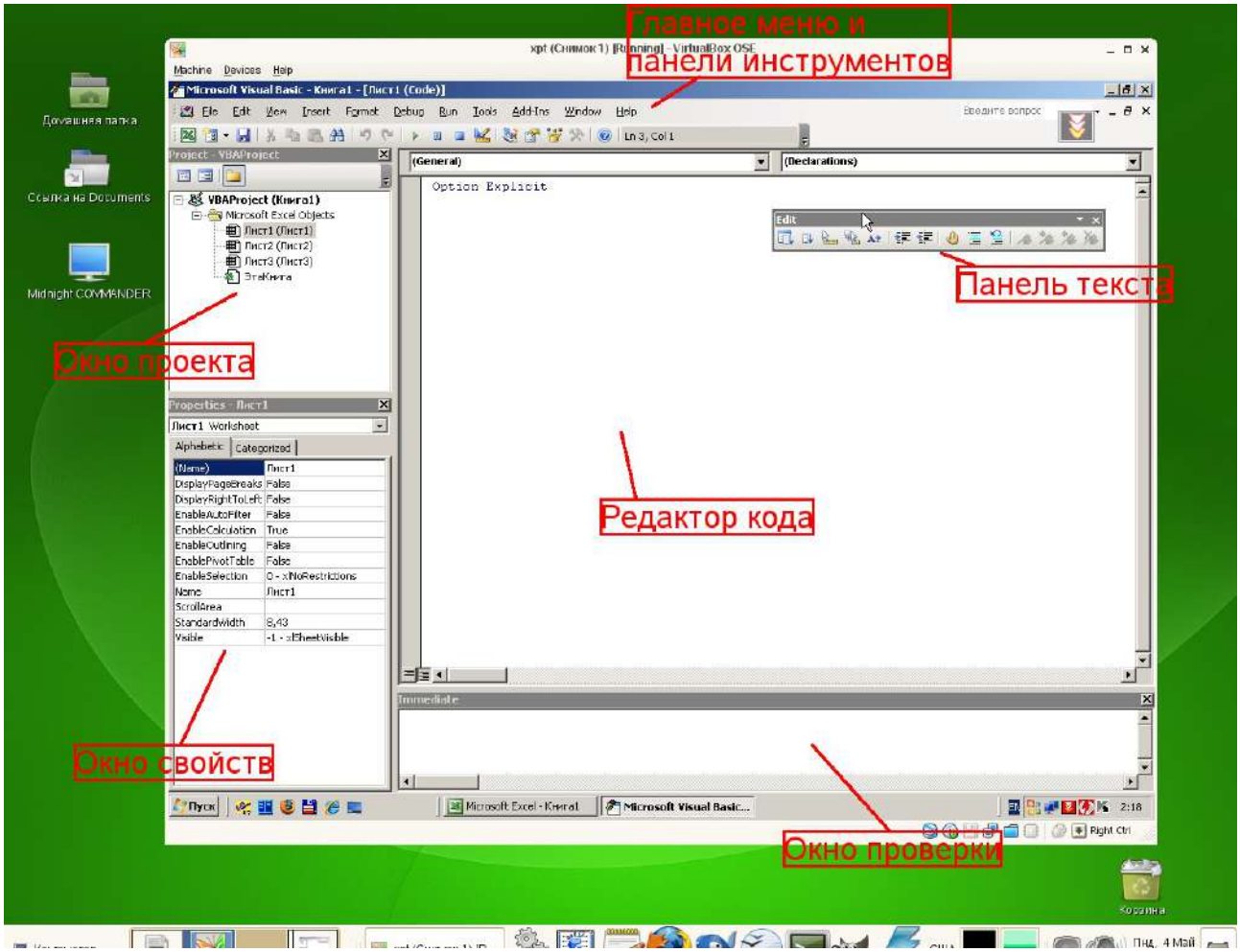


Рисунок 3. Окно редактора Visual Basic

Основными (открывающимися по умолчанию) являются три окна: окно проекта, окно свойств и окно редактирования кода. Краткое описание этих и некоторых других компонентов VBA приведено в таб. 4. Все они доступны через команды, представленные в меню "Вид".

Таблица 4. Назначение компонентов VBA

Наименование окна	**Описание**
Project (Проект)	Предназначено для отображения всех открытых проектов, а также их составляющих: модулей, форм и ссылок на другие проекты
Toolbox (Панель элементов)	Содержит элементы управления для конструирования форм
UserForm	Используется для создания форм путем размещения на них элементов

Наименование окна	Описание
	управления
Code (Программа)	Предназначено для просмотра, написания и редактирования программы на языке VBA. Поскольку среда разработки является многооконной, то для каждого модуля проекта можно открыть отдельное окно
Properties (Свойства)	Отображает свойства выделенных объектов. В этом окне можно задавать новые значения свойств формы и элементов управления
Object Browser (Просмотр объектов)	Отображает классы, свойства, методы, события и константы различных библиотек объектов. Используется для быстрого получения информации об объектах
Immediate (Проверка)	Предназначено для быстрого выполнения вводимых в него инструкций. В данном окне также выводятся результаты выполнения вводимых инструкций
Locals (Локальные переменные)	Автоматически показывает все переменные данной процедуры
Watches (Контрольные значения)	Применяется при отладке программ для просмотра значений выражений

Характеристики компонентов VBA

Окно проекта (Project)

Проект – это совокупность всех программных модулей, связанных с документом Microsoft Office. Окно *Project (Проект)* предназначено для быстрого получения информации о различных составляющих проекта.

Проект может содержать модули следующих видов:

- *Объекты основного приложения*. Проекты VBA выполняются совместно с другими приложениями. Приложение, в котором разрабатывается и выполняется проект VBA, называется основным.
- *Модули форм*. В VBA имеется возможность создавать пользовательские формы, предназначенные для ввода или вывода данных, а также процедуры обработки событий, возникающие в этих формах.

- *Модули кода*. Модульность - один из основных принципов парадигмы структурного программирования. Каждый модуль, как правило, содержит подпрограммы, сход-

  ные по назначению. Небольшие модули проще отлаживать и использовать повторно. В частности, в VBA имеются средства импорта/экспорта готового кода.
- *Модули классов*. VBA позволяет создавать и использовать собственные объекты. Описание объектов включается в модули класса. Каждый модуль класса содержит полную информацию об одном типе объекта.

С помощью окна проекта можно добавить или удалить какой-либо объект из проекта. Модули кода добавляются в проект командой "Вставить/Модуль". Формы создаются командой "Вставить/UserForm", а модули класса командой "Вставить/Модуль класса".

Окно проекта можно использовать также для быстрой навигации по формам проекта и программному коду. Для этого необходимо выбрать в контекстном меню соответственно команды "Объект" или "Программа".

Окно свойств (Properties)

Список свойств выделенного объекта выводится в окне Properties (Свойства). Для того чтобы выделить объект, необходимо с помощью окна проекта выбрать форму и перейти в режим конструктора, используя команду "View Object". Свойства объекта можно упорядочить в алфавитном порядке (Alphabetic (По алфавиту)) или по категориям (Categorized (По категориям)), выбрав соответствующую вкладку. Предусмотрена также возможность получения быстрой справки по какому-либо свойству объекта. Для этого достаточно установить курсор на нужное свойство и нажать клавишу F1.

Окно просмотра объектов(Object Browser)

Окно Object Browser (Просмотр объектов) предназначено для просмотра объектов, доступных при создании программы. Точнее, в этом окне отображаются не сами объекты, а структура соответствующего класса объектов. Окно просмотра объектов может использоваться для поиска метода или свойства объекта.

Окно Code (Окно редактирования кода)

Окно Code (Программа) представляет собой текстовый редактор, предназначенный для написания и редактирования кода процедур приложения. Это окно появляется на экране, например, при создании нового модуля. Код внутри модуля организован в виде отдельных разделов для каждого объекта, программируемого в модуле. Переключение между разделами выполняется путем выбора значений из списка "Object" ("Объект"), который находится в левом верхнем углу окна. Каждый раздел может содержать несколько процедур, которые можно выбрать из списка "Procedure" ("Процедура") в правом верхнем углу.

Интеллектуальные возможности редактора кода:

1. При написании кода пользователю предлагается список компонентов, логически завершающих вводимую пользователем инструкцию.
2. На экране автоматически отображаются сведения о процедурах, функциях, свойствах и методах после набора их имени.
3. Автоматически проверяется синтаксис набранной строки кода сразу после нажатия клавиши Enter. В результате проверки выполняется выделение определенных фрагментов текста:
   - красным цветом – синтаксические ошибки; • синим цветом – зарезервированные ключевые слова;
   - зеленым цветом – комментарии.
4. Если курсор расположить на ключевом слове VBA, имени процедуры, функции, свойства или метода и нажать клавишу F1, то на экране появится окно со справочной информацией об этой функции.

Окно редактирования форм (UserForm)

Для создания диалоговых окон, разрабатываемых приложений VBA, используются формы. Редактор форм является одним из основных средств визуального программирования. При добавлении формы в проект (команда "Insert" – "UserForm" ("Вставить" – "UserForm")) на экран выводится незаполненная форма с панелью инструментов Toolbox (Панель элементов).

Используя панель инструментов Toolbox (Панель элементов) из незаполненной формы конструируется требуемое для приложения диалоговое окно. Размеры формы и

размещаемых на ней элементов управления можно изменять. Также окно редактирования форм поддерживает операции буфера обмена. Кроме того, команды меню "Format" ("Формат") автоматизируют и облегчают процесс выравнивания элементов управления как по их взаимному местоположению, так и по размерам.

Окна отладочной информации

Окно Immediate (Проверка) позволяет ввести инструкцию и выполнить ее. При этом инструкция должна быть записана в одну строку, директивы которой будут выполнены после нажатия клавиши Enter. Данное окно можно использовать для быстрой проверки действий, выполняемой той или иной инструкцией. Это позволяет не запускать всю процедуру, что удобно при отладке программ.

Окно Locals (Локальные переменные) автоматически отображает все объявленные переменные текущей процедуры и их значения.

Окно Watches (Контрольные значения) применяется при отладке программ для просмотра значений выражений.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методическому комплексу _____ С.А. Упоров
14.10.2020

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Направление подготовки
21.05.03 Технология геологической разведки

квалификация выпускника: **специалист**

Автор: Дружинин А.В., доцент, канд. техн. наук

Екатеринбург
2020

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические рекомендации необходимы для студентов при организации самостоятельной работы по дисциплине «Прикладное программное обеспечение» в рамках подготовки и защиты контрольной работы.

В методических рекомендациях содержатся особенности организации подготовки контрольной работы в виде реферата, требования к его оформлению, а также порядок защиты и критерии оценки.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОДГОТОВКИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ (РЕФЕРАТА)

Общая характеристика реферата

Написание реферата практикуется в учебном процессе в целях приобретения студентом необходимой профессиональной подготовки, развития умения и навыков самостоятельного научного поиска: изучения литературы по выбранной теме, анализа различных источников и точек зрения, обобщения материала, выделения главного, формулирования выводов и т. п. С помощью реферата студент может глубже постигать наиболее сложные проблемы дисциплины, учится лаконично излагать свои мысли, правильно оформлять работу, докладывать результаты своего труда.

В «Толковом словаре русского языка» дается следующее определение: «**реферат** – краткое изложение содержания книги, статьи, исследования, а также доклад с таким изложением».

Различают два вида реферата:

- *репродуктивный* – воспроизводит содержание первичного текста в форме реферата-конспекта или реферата-резюме. В реферате-конспекте содержится фактическая информация в обобщённом виде, иллюстрированный материал, различные сведения о методах исследования, результатах исследования и возможностях их применения. В реферате-резюме содержатся только основные положения данной темы;
- *продуктивный* – содержит творческое или критическое осмысление реферируемого источника и оформляются в форме реферата-доклада или реферата-обзора. В реферате-докладе, наряду с анализом информации первоисточника, дается объективная оценка проблемы, и он имеет развёрнутый характер. Реферат-обзор составляется на основе нескольких источников и в нем сопоставляются различные точки зрения по исследуемой проблеме.

Студент для изложения материала должен выбрать продуктивный вид реферата.

Выбор темы реферата

Студенту предоставляется право выбора темы реферата из рекомендованного преподавателем дисциплины списка. Выбор темы должен быть осознанным и обоснованным с точки зрения познавательных интересов автора, а также полноты освещения темы в имеющейся научной литературе.

Если интересующая тема отсутствует в рекомендованном списке, то по согласованию с преподавателем студенту предоставляется право самостоятельно предложить тему реферата, раскрывающую содержание изучаемой дисциплины. Тема не должна быть слишком общей и глобальной, так как небольшой объем работы (до 20-25 страниц без учёта приложений) не позволит раскрыть ее.

Начинать знакомство с избранной темой лучше всего с чтения обобщающих работ по данной проблеме, постепенно переходя к узкоспециальной литературе. При этом следует сразу же составлять библиографические выходные данные используемых источников (автор, название, место и год издания, издательство, страницы).

На основе анализа прочитанного и просмотренного материала по данной теме следует составить тезисы по основным смысловым блокам, с пометками, собственными суждениями и оценками. Предварительно подобранный в литературных источниках материал может превышать необходимый объем реферата.

Формулирование цели и составление плана реферата

Выбрав тему реферата и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план реферата.

Цель – это осознаваемый образ предвосхищаемого результата. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее в ходе исследования. Формулирование цели реферата рекомендуется осуществлять при помощи глаголов: исследовать, изучить, проанализировать, систематизировать, осветить, изложить (представления, сведения), создать, рассмотреть, обобщить и т. д.

Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно необходимо думать над составлением плана, при этом четко соотносить цель и план работы. Правильно построенный план помогает систематизировать материал и обеспечить последовательность его изложения.

Наиболее традиционной является следующая **структура реферата**:

Титульный лист.

Оглавление (план, содержание).

Введение.

1. (полное наименование главы).
   1.1. (полное название параграфа, пункта);
   1.2. (полное название параграфа, пункта).
2. (полное наименование главы).
   2.1. (полное название параграфа, пункта);
   2.2. (полное название параграфа, пункта).

Заключение (выводы).

} Основная часть

Библиография (список использованной литературы).

Приложения (по усмотрению автора).

Титульный лист оформляется в соответствии с Приложением.

Оглавление (план, содержание) включает названия всех глав и параграфов (пунктов плана) реферата и номера страниц, указывающие их начало в тексте реферата.

Введение. В этой части реферата обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи работы, указываются используемые материалы и дается их краткая характеристика с точки зрения полноты освещения избранной темы. Объем введения не должен превышать 1-1,5 страницы.

Основная часть реферата может быть представлена двумя или тремя главами, которые могут включать 2-3 параграфа (пункта).

Здесь достаточно полно и логично излагаются главные положения в используемых источниках, раскрываются все пункты плана с сохранением связи между ними и последовательности перехода от одного к другому.

Автор должен следить за тем, чтобы изложение материала точно соответствовало цели и названию главы (параграфа). Материал в реферате рекомендуется излагать своими словами, не допуская дословного переписывания из литературных источников. В тексте обязательны ссылки на первоисточники, т. е. на тех авторов, у которых взят данный материал в виде мысли, идеи, вывода, числовых данных, таблиц, графиков, иллюстраций и пр.

Работа должна быть написана грамотным литературным языком. Сокращение слов в тексте не допускается, кроме общеизвестных сокращений и аббревиатуры. Каждый раздел рекомендуется заканчивать кратким выводом.

Заключение (выводы). В этой части обобщается изложенный в основной части материал, формулируются общие выводы, указывается, что нового лично для себя вынес автор реферата из работы над ним. Выводы делаются с учетом опубликованных в литературе различных точек зрения по проблеме, рассматриваемой в реферате, сопоставления их и личного мнения автора реферата. Заключение по объему не должно превышать 1,5-2 страниц.

Библиография (список использованной литературы) – здесь указывается реально использованная для написания реферата литература, периодические издания и электронные источники информации. Список составляется согласно правилам библиографического описания.

Приложения могут включать графики, таблицы, расчеты.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕФЕРАТА

Общие требования к оформлению реферата

Рефераты, как правило, требуют изучения и анализа значительного объема статистического материала, формул, графиков и т. п. В силу этого особое значение приобретает правильное оформление результатов проделанной работы.

Текст реферата должен быть подготовлен в печатном виде. Исправления и помарки не допускаются. Текст работы оформляется на листах формата А4, на одной стороне листа, с полями: левое – 25 мм, верхнее – 20 мм, правое – 15 мм и нижнее – 25 мм. При компьютерном наборе шрифт должен быть таким: тип шрифта Times New Roman, кегль 14, междустрочный интервал 1,5.

Рекомендуемый объем реферата – не менее 20 страниц. Титульный лист реферата оформляется студентом по образцу, данному в приложении 1.

Текст реферата должен быть разбит на разделы: главы, параграфы и т. д. Очередной раздел нужно начинать с нового листа.

Все страницы реферата должны быть пронумерованы. Номер страницы ставится снизу страницы, по центру. Первой страницей является титульный лист, но на ней номер страницы не ставится.

Таблицы

Таблицы по содержанию делятся на аналитические и неаналитические. Аналитические таблицы являются результатом обработки и анализа цифровых показателей. Как правило, после таких таблиц делается обобщение, которое вводится в текст словами: «таблица позволяет сделать вывод о том, что…», «таблица позволяет заключить, что…» и т. п.

В неаналитических таблицах обычно помещаются необработанные статистические данные, необходимые лишь для информации и констатации фактов.

Таблицы размещают после первого упоминания о них в тексте таким образом, чтобы их можно было читать без поворота работы или с поворотом по часовой стрелке.

Каждая таблица должна иметь нумерационный и тематический заголовок. Тематический заголовок располагается по центру таблицы, после нумерационного, размещённого в правой стороне листа и включающего надпись «Таблица» с указанием арабскими цифрами номера таблицы. Нумерация таблиц сквозная в пределах каждой главы. Номер таблицы состоит из двух цифр: первая указывает на номер главы, вторая – на номер таблицы в главе по порядку (например, «Таблица 2.2» – это значит, что представленная таблица вторая во второй главе).

Цифры в графах таблиц должны проставляться так, чтобы разряды чисел во всей графе были расположены один под другим. В одной графе количество десятичных знаков должно быть одинаковым. Если данные отсутствуют, то в графах ставят знак тире. Округление числовых значений величин до первого, второго и т. д. десятичного знака для

различных значений одного и того же наименования показателя должно быть одинаковым.

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу, при этом заголовок таблицы помещают только над ее первой частью, а над переносимой частью пишут «Продолжение таблицы» или «Окончание таблицы». Если в работе несколько таблиц, то после слов «Продолжение» или «Окончание» указывают номер таблицы, а само слово «таблица» пишут сокращенно, например, «Продолжение табл. 1.1», «Окончание табл. 1.1».

На все таблицы в тексте реферата должны быть даны ссылки с указанием их порядкового номера, например, «…в табл. 2.2».

Формулы

Формулы – это комбинации математических знаков, выражающие какие-либо предложения.

Формулы, приводимые в реферате, должны быть наглядными, а обозначения, применяемые в них, соответствовать стандартам.

Пояснения значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой, в той последовательности, в какой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента дается с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия после него.

Формулы и уравнения следует выделять из текста свободными строками. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знака (+), минус (–), умножения (х) и деления (:).

Формулы нумеруют арабскими цифрами в пределах всей реферата или главы. В пределах реферата используют нумерацию формул одинарную, в пределах главы – двойную. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках.

В тексте ссылки на формулы приводятся с указанием их порядковых номеров, например: «…в формуле (2.2)» (второй формуле второй главы).

Иллюстрации

Иллюстрации позволяют наглядно представить явление или предмет такими, какими мы их зрительно воспринимаем, но без лишних деталей и подробностей.

Основными видами иллюстраций являются схемы, диаграммы и графики.

Схема – это изображение, передающее обычно с помощью условных обозначений и без соблюдения масштаба основную идею какого-либо устройства, предмета, сооружения или процесса и показывающее взаимосвязь их главных элементов.

Диаграмма – один из способов изображения зависимости между величинами. Наибольшее распространение получили линейные, столбиковые и секторные диаграммы.

Для построения линейных диаграмм используется координатное поле. По горизонтальной оси в изображенном масштабе откладывается время или факториальные признаки, на вертикальной – показатели на определенный момент (период) времени или размеры результативного независимого признака. Вершины ординат соединяются отрезками – в результате получается ломаная линия.

На столбиковых диаграммах данные изображаются в виде прямоугольников (столбиков) одинаковой ширины, расположенных вертикально или горизонтально. Длина (высота) прямоугольников пропорциональна изображенным ими величинам.

Секторная диаграмма представляет собой круг, разделенный на секторы, величины которых пропорциональны величинам частей изображаемого явления.

График – это результат обработки числовых данных. Он представляет собой условные изображения величин и их соотношений через геометрические фигуры, точки и линии.

Количество иллюстраций в работе должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста.

Иллюстрации обозначаются словом «Рис.» и располагаются после первой ссылки на них в тексте так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота работы или с поворотом по часовой стрелке. Иллюстрации должны иметь номер и наименование, расположенные по центру, под ней. Иллюстрации нумеруются в пределах главы арабскими цифрами, например: «Рис. 1.1» (первый рисунок первой главы). Ссылки на иллюстрации в тексте реферата приводят с указанием их порядкового номера, например: «…на рис. 1.1».

При необходимости иллюстрации снабжаются поясняющими данными (подрисуночный текст).

Приложения

Приложение – это часть основного текста, которая имеет дополнительное (обычно справочное) значение, но, тем не менее, необходима для более полного освещения темы. По форме они могут представлять собой текст, таблицы, графики, карты. В приложении помещают вспомогательные материалы по рассматриваемой теме: инструкции, методики, положения, результаты промежуточных расчетов, типовые проекты, имеющие значительный объем, затрудняющий чтение и целостное восприятие текста. В этом случае в тексте приводятся основные выводы (результаты) и делается ссылка на приложение, содержащее соответствующую информацию. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы. В правом верхнем углу листа пишут слово «Приложение» и указывают номер приложения. Если в реферате больше одного приложения, их нумеруют последовательно арабскими цифрами, например: «Приложение 1», «Приложение 2» и т. д.

Каждое приложение должно иметь заголовок, который помещают ниже слова «Приложение» над текстом приложения, по центру.

При ссылке на приложение в тексте реферата пишут сокращенно строчными буквами «прил.» и указывают номер приложения, например: «…в прил. 1».

Приложения оформляются как продолжение текстовой части реферата со сквозной нумерацией листов. Число страниц в приложении не лимитируется и не включается в общий объем страниц реферата.

Библиографический список

Библиографический список должен содержать перечень и описание только тех источников, которые были использованы при написании реферата.

В библиографическом списке должны быть представлены монографические издания отечественных и зарубежных авторов, материалы профессиональной периодической печати (экономических журналов, газет и еженедельников), законодательные и др. нормативно-правовые акты. При составлении списка необходимо обратить внимание на достижение оптимального соотношения между монографическими изданиями, характеризующими глубину теоретической подготовки автора, и периодикой, демонстрирующей владение современными экономическими данными.

Наиболее распространенным способом расположения наименований литературных источников является алфавитный. Работы одного автора перечисляются в алфавитном порядке их названий. Исследования на иностранных языках помещаются в порядке латинского алфавита после исследований на русском языке.

Ниже приводятся примеры библиографических описаний использованных источников.

Статья одного, двух или трех авторов из журнала

Зотова Л. А., Еременко О. В. Инновации как объект государственного регулирования // Экономист. 2010. № 7. С. 17–19.

Статья из журнала, написанная более чем тремя авторами

Валютный курс и экономический рост / С. Ф. Алексашенко, А. А. Клепач, О. Ю. Осипова [и др.] // Вопросы экономики. 2010. № 8. С. 18–22.

Книга, написанная одним, двумя или тремя авторами

Олейник А. Н. Институциональная Горное дело: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2011. 416 с.

Книга, написанная более чем тремя авторами

Экономическая теория: учебник / В. Д. Камаев [и др.]. М.: ВЛАДОС, 2011. 143 с.

Сборники

Актуальные проблемы экономики и управления: сборник научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. 146 с.

Статья из сборника

Данилов А. Г. Система ценообразования промышленного предприятия // Актуальные проблемы экономики и управления: сб. научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. С. 107–113.

Статья из газеты

Крашаков А. С. Будет ли обвал рубля // Аргументы и факты. 2011. № 9. С. 3.

Библиографические ссылки

Библиографические ссылки требуется приводить при цитировании, заимствовании материалов из других источников, упоминании или анализе работ того или иного автора, а также при необходимости адресовать читателя к трудам, в которых рассматривался данный вопрос.

Ссылки должны быть затекстовыми, с указанием номера соответствующего источника (на который автор ссылается в работе) в соответствии с библиографическим списком и соответствующей страницы.

Пример оформления затекстовой ссылки

Ссылка в тексте: «Под трансакцией понимается обмен какими-либо благами, услугами или информацией между двумя агентами» [10, С. 176].

В списке использованных источников:

10. *Сухарев О. С*. Институциональная Горное дело: учебник и практикум для специалистиата и магистратуры /О.С. Сухарев. М.: Издательство Юрайт, 2016. 501 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ РЕФЕРАТА

Необходимо заранее подготовить тезисы выступления (план-конспект).

Порядок защиты реферата.

1.Краткое сообщение, характеризующее цель и задачи работы, ее актуальность, полученные результаты, вывод и предложения.

2.Ответы студента на вопросы преподавателя.

3.Отзыв руководителя-консультанта о ходе выполнения работы.

Советы студенту:

- Готовясь к защите реферата, вы должны вспомнить материал максимально подробно, и это должно найти отражение в схеме вашего ответа. Но тут же необходимо выделить главное, что наиболее важно для понимания материала в целом, иначе вы сможете проговорить все 15-20 минут и не раскрыть существа вопроса. Особенно строго следует отбирать примеры и иллюстрации.

- Вступление должно быть очень кратким – 1-2 фразы (если вы хотите подчеркнуть при этом важность и сложность данного вопроса, то не говорите, что он сложен и важен, а покажите его сложность и важность).
- Целесообразнее вначале показать свою схему раскрытия вопроса, а уж потом ее детализировать.
- Рассказывать будет легче, если вы представите себе, что объясняете материал очень способному и хорошо подготовленному человеку, который не знает именно этого раздела, и что при этом вам обязательно нужно доказать важность данного раздела и заинтересовать в его освоении.
- Строго следите за точностью своих выражений и правильностью употребления терминов.
- Не пытайтесь рассказать побольше за счет ускорения темпа, но и не мямлите.
- Не демонстрируйте излишнего волнения и не напрашивайтесь на сочувствие.
- Будьте особенно внимательны ко всем вопросам преподавателя, к малейшим его замечаниям. И уж ни в коем случае его не перебивайте!
- Не бойтесь дополнительных вопросов – чаще всего преподаватель использует их как один из способов помочь вам или сэкономить время. Если вас прервали, а при оценке ставят в вину пропуск важной части материала, не возмущайтесь, а покажите план своего ответа, где эта часть стоит несколько позже того, на чем вы были прерваны.
- Прежде чем отвечать на дополнительный вопрос, необходимо сначала правильно его понять. Для этого нужно хотя бы немного подумать, иногда переспросить, уточнить: правильно ли вы поняли поставленный вопрос. И при ответе следует соблюдать тот же принцип экономности мышления, а не высказывать без разбора все, что вы можете сказать.
- Будьте доброжелательны и тактичны, даже если к ответу вы не готовы (это вина не преподавателя, а ваша).

ТЕМЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ (РЕФЕРАТА)

1. 1. Хост-компьютеры.
2. Локальные сети и персональные компьютеры.
3. Каналы связи.
4. Хранение и предоставление доступа к информации.
5. Управление передачей сообщений.
6. Каналы связи, обеспечивающие взаимодействие между хост-компьютерами.
7. Обмен информацией между абонентами сети.
8. Использование баз данных сети.
9. Классификация прикладного программного обеспечения.
10. Пакеты прикладных программ.
11. Методо-ориентированные пакеты.
12. Системы реального времени.
13. Офисные приложения.
14. Инструменты электронных таблиц для решения экономических задач.
15. Классификация баз данных (БД).
16. Системы управления базами данных (СУБД). Классификация СУБД.
17. Локальные и глобальные сети. Intranet и Internet. Сетевые службы.
18. Поисковые системы: Яndex, Rambler, Google, ПОИСК@mail.ru.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ (РЕФЕРАТА)

Критерии оценивания:

достижение поставленной цели и задач исследования (новизна и актуальность поставленных в реферате проблем, правильность формулирования цели, определения задач исследования, правильность выбора методов решения задач и реализации цели; соответствие выводов решаемым задачам, поставленной цели, убедительность выводов);

уровень эрудированности автора по изученной теме (знание автором состояния изучаемой проблематики, цитирование источников, степень использования в работе результатов исследований);

личные заслуги автора реферата (новые знания, которые получены помимо основной образовательной программы, новизна материала и рассмотренной проблемы, научное значение исследуемого вопроса);

культура письменного изложения материала (логичность подачи материала, грамотность автора);

культура оформления материалов работы (соответствие реферата всем стандартным требованиям);

знания и умения на уровне требований стандарта данной дисциплины: знание фактического материала, усвоение общих понятий и идей;

степень обоснованности аргументов и обобщений (полнота, глубина, всестороннее раскрытие темы, корректность аргументации и системы доказательств, характер и достоверность примеров, иллюстративного материала, наличие знаний интегрированного характера, способность к обобщению);

качество и ценность полученных результатов (степень завершенности реферативного исследования, спорность или однозначность выводов);

использование профессиональной терминологии;

использование литературных источников.

Правила оценивания:

Каждый показатель оценивается в 1 балл

Критерии оценки:

9-10 баллов (90-100%) - оценка «отлично»;

7-8 баллов (70-89%) - оценка «хорошо»;

5-6 баллов (50-69%) - оценка «удовлетворительно»;

0-4 балла (0-49%) - оценка «неудовлетворительно».

Приложение

Образец оформления титульного листа контрольной работы (реферата)

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

Инженерно-экономический факультет

Кафедра информатики

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА (РЕФЕРАТ)

по дисциплине
«Прикладное программное обеспечение»

на тему:

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДАЧЕЙ СООБЩЕНИЙ

Руководитель:
Дружинин А.В.
Студент гр. Х-20
Артёмова Елена Юрьевна

Екатеринбург – 2020

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

Г. П. КОЗИНА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

по выполнению практических работ

по дисциплине «Геодезия»

для студентов очного и заочного обучения

направления подготовки (специальности)
21.05.03 Технология геологической разведки

(уровень специалитета)

Екатеринбург, 2020 г

Г. П. КОЗИНА

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

по выполнению практических работ

по дисциплине «**Геодезия**»

для студентов очного и заочного обучения

направления подготовки (специальности)
21.05.03 Технология геологической разведки
(уровень специалитета)

СОДЕРЖАНИЕ

1.	РАБОТА С ТОПОГРАФИЧЕСКИМИ КАРТАМИ	4
1.1.	Определение расстояний	6
1.2.	Определение географических коорданат	7
1.3.	Определение прямоугольных координат	7
1.4.	Определение положения точки относительно осевого меридиана зоны	8
1.5.	Определение дирекционного угла, истинного азимута и магнитного азимута линии	8
1.6.	Определение отметок точек и превышения между точками	9
1.7.	построение профиля местности по заданному направлению	10
1.8.	Определение крутизны ската	11
1.9.	Проектирование линии с заданной крутизной ската	12
1.10.	Измерение площадей по топографическим картам полярным планиметром	15
2.	РАБОТА С АЭРОФОТОСНИМКАМИ	17
2.1.	Привязка аэроснимка к топографической карте	17
2.2.	Определение масштаба аэрофотоснимка и высоты фотографирования	18
3.	СОСТАВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ПЛАНА	20
3.1.	Построение координатной сетки	20
3.2.	Нанесение точек съемочного обоснования по координатам	22
3.3.	Нанесение ситуации, точек рельефа и проведение горизонталей	23
3.4.	Вычерчивание топографического плана	25
4.	ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ	27
4.1.	Обработка результатов нивелирования	27
4.2.	Построение профиля	30
4.3.	Проектирование по прифилю	32
5.	РАБОТА С ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ	34
5.1.	Измерение горизонтальных и вертикальных углов	34
5.2.	Измерение расстояний нитяным дальномером	37
5.3.	Измерение превышений	38

I. РАБОТА С ТОПОГРАФИЧЕСКИМИ КАРТАМИ

Для современных топографических карт установлены следующие масштабы: 1:1 000 000, 1:500 000, 1:300 000, 1:200 000, 1:100 000, 1:50 000, 1:25 000, 1:10 000.

Топографические карты широко используются в народном хозяйстве для решения различных инженерных задач и служат основой для создания карт специального назначения.

Листы топографических карт различных масштабов объединены специальной системой разграфки и номенклатуры, основой которой является лист карты масштаба 1:1000 000. Каждый лист топографической карты ограничен с севера и юга параллелями, а с запада и востока – меридианами. Линии меридианов и параллелей образуют внутреннюю географическую рамку листа топографической карты, а их пересечение – углы рамки, которым соответствуют географические координаты, подписываемые на карте (широта φ и долгота λ). Например, координаты северо-западного угла рамки (рис. 1.1.).

$$\varphi = 54^0 20' \ , \ \lambda = 14^0 15'$$

Параллельно линиям географической раски с внешней ее стороны на карте показывается минутная рамка, линии которой разделены на черные и белые интервалы. Длины интервалов по северной и южной сторонам рамки соответствуют одной минуте долготы, а по западной и восточной – одной минуте широты.

Каждый интервал минутной рамки разбит точками на интервалы по 10✋. С помощью минутной рамки определяют географические координаты точек на карте: широта φ и долгота λ .

Для определения плоских прямоугольных координат точек на топографических картах наносится прямоугольная координатная сетка. Линии координатной сетки проходят параллельно осям координат зоны, в которой расположен данный лист. Обычно линии координатной сети проходят через 1 км. Оцифровка линий координатной сетки дается у их выходов за географической рамкой (рис. 1.1). Полные абсциссы и ординаты в (километрах) подписываются на выходах крайних линий данного листа. Остальные линии подписываются двумя последними цифрами.

Например:

абсциссы: 6019, 20, 21, 22, 6023,

ординаты: 3452, 53, 54, 3455.

Листы топографических карт сопровождаются зарамочным оформлением. Над северной рамкой указывается номенклатура листа, его название, система координат (рис. 1.1.). Под южной рамкой указывается численный и линейный масштабы карты, высота сечения рельефа, система высот, данные о склонении магнитной стрелки и сближении меридианов, график заложений, выходные данные, указывающие метод и год создания карты.

Между минутной и внешней рамками помещены номенклатуры смежных листов карт того же масштаба. На топографических картах специальными условными знаками изображаются контуры и рельеф местности, а также прочие сведения о ней.

Наличие на картах географической и прямоугольной сеток координат, данных о склонении магнитной стрелки и сближении меридианов, графика заложений и других данных позволяет решать по карте различные топографические и инженерные задачи.

студентами работы выполняются по топографической карте масштаба 1:10 000 на специальных бланках.

1.1. Определение раастояний

Циркулем – измерителем снимается величина отрезка на топографической карте между заданными точками. По линейке до 0,01 см измеряют длину этого отрезка ($\ell_{\text{см}}$). С помощью численного масштаба карты (I:M) определяется расстояние на местности (D) в метрах

$$\boldsymbol{D = \ell \cdot M},$$

где ℓ - длина отрезка с карты, измеренная по линейке в см;

M – знаменатель численного масштаба карты.

Пример: ℓ=4,25 см, *M* – 10 000, *D* = 4,25 **&** 10 000 = 42 500 см = 425 м.

Это же расстояние определяют с помощью линейного масштада, который помещается за южной рамкой листа карты под численным масштабом (рис. 1.1). Для этого циркулем – измерителем отрезок с карты откладывается на линейном масштабе так, чтобы правая игла измерителя была поставлена на оцифрованное деление линейного масштаба справа от «0», а левая игла попадала на первое (дробное) основание – слева от «0». По линейному масштабу справа налево считывается расстояние в метрах.

$\boldsymbol{D = 425}$ м.

1.2. Определение географических координат φ λ

Географические координаты определяются по минутной рамке. Для определения широты φ через точку (Рис. 1.1 точки N) проводят параллель до пересечения с минутной рамкой. По западной или восточной сторонам рамки, считают число минут и секунд ($\Delta\varphi$) между южной стороной рамки и параллелью данной точки.

Широта (φ) точки будет $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi$, φ_0 - широта южной стороны рамки, долгота - $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$, λ_0 - долгота западной стороны рамки.

Для определения долготы через точку проводят меридиан и по северной или южной стороне минутной рамки отсчитывают долготу (λ).

Пример: определить φ и λ точки *N* (Рис. 1.1).

$$\lambda_0 = 54^0 17' 30'' \quad \Delta\varphi = 1'53'' ,\ \varphi_N = 54^0 17' 30'' + 1'53'' = 54^0 19' 23''$$

$$\lambda_0 = 14^0 15' \quad \Delta\lambda = 0'32'' ,\ \lambda_N = 14^0 15' + 0'32'' = 14^0 15' 32''$$

1.3. Определение прямоугольных координат X и Y

Прямоугольные координаты точки на карте определяются по координатной сетке. Для этого из точки опускают перпендикуляры на южную и западную стороны квадрата координатной сетки. Измерителям с помощью линейного масштаба определяют расстояния по этим перпендикулярам в метрах, которые представляют приращения координат ΔX и ΔY по оси абсцисс и оси ординат. Полученные приращения прибавляют к оцифрованным координатам сетки X_i и Y_i.

Пример: определить прямоугольные координаты точки D (рис. 1.1).

$$X_D = X_i + \Delta X \ ,\ Y_D = Y_i + \Delta Y$$

X_i - абсцисса южной горизонтальной линии сетки квадрата, в котором находится D.

$$X_i = 6022 \text{ км} ,$$

Y_i - ордината западной вертикальной линии этого же квадрата.

$$Y_i = 3453 \text{ км} .$$

$$\Delta X = 684м = 0{,}684км \ ,\ \Delta Y = 460м = 0{,}460км$$

$$X_D = 6022км + 0{,}684км = 6022684м$$

$$Y_D = 3453км + 0{,}460км = 3453460м \ .$$

1.4. Определение положения точки относительно осевого меридиана зоны.

Долгота осевого меридиана зоны вычисляется по формуле:

$$L_0 = 6^0 \cdot n - 3^0 ,$$

где n – номер зоны.

Для $n = 3$ $L_0 = 6^0 \cdot 3 - 3^0 = 15^0$

Расстояние от осевого меридиана до точки определяется по формуле:

$$d_D = Y_D - 500км , \; Y_D = 453460м$$

где Y_D - ордината точки.

$$d_D = 453460м - 500км = -46540м$$

следовательно, точка D расположене к западу от осевого меридиана на расстоянии 46540 м.

1.5. Определение дирекционного угла α, истинного азимута A и магнитного азимута азимута A_m линии.

Для определения дирекционного угла заданной линии через начальную точку линии проводят прямую параллельную оси абсцисс, направлением на север (рис. 1.1., линия 1 – 2), от которой транспортиром измеряют угол по ходу часовой стрелки до направления на конечную точку линии.

Пример: $\alpha_{1-2} = 238^0$.

Истинный и магнитный азимуты вычисляют по формулам, пользуясь данными о сближении меридианов и склонении магнитной стрелки или по графику взаимного расположения меридианов.

$A = \alpha + \gamma$,

$A_m = \alpha - (\delta - \gamma)$.

где γ - сближение меридианов,

δ - склонение магнитной стрелки.

При вычислении A и A_m по формулам учитываются знаки δ и γ. Азимут истинный $A = 238^0 + (-0^0 35¶) = 237^0\ 25¶$.

Азимут магнитный $A_m = 238^0 - (0^0 45¶ – (-0^0\ 35¶)) = 236^0\ 40¶$.

Контроль вычисления A и A_m выполняют с помощью графика взаимного расположения меридианов (рис. 1.2).

Схема взаимного расположения меридранов

Из схемы видно, что $A_m = \alpha$ - (-0^0 35¶+0^0 45¶).

Для определения магнитного азимута на текущий год необходимо учесть годовое изменение склонения магнитной стрелки $\Delta\alpha = +2'$

2¶ & 34 года = 68 = 1^0 08¶ ; $\delta = 0\ ^0 45¶ + 1^0\ 08¶ = 1^0\ 53¶$.

На 1993 год $A_m = 238\ ^0 – (0\ ^0\ 35¶ + 1^0\ 53¶) = 238\ ^0 – 2\ ^0\ 28¶ = 235\ ^0\ 32¶$.

1.6 Определение отметок точек и превышений

Отметки точек на карте определяют по горизонталям. если точка находится на горизонтали, то ее отметка равна отметке этой горизонтали. Точки I находится на горизонтали с отметкой 187,5 м. Следовательно, $H_I = 187{,}5$ м (рис. 1.3).

Если точка находится между горизонталями, то ее отметка определяется по формуле $\boldsymbol{H = H_0 + h'}$

где $\boldsymbol{H_0}$ - отметка ближайшей к точке горизонтали,

$\boldsymbol{h'}$ - превышение между точкой и горизонталью $\boldsymbol{H_0}$.

Превышение $\boldsymbol{h'}$ может быть как положительным, так и отрицательным. Зная, что высота между горизонталями изменяется пропорционально заложению, $\boldsymbol{h'}$ определяют по формуле: $\boldsymbol{h' = \frac{h \cdot в}{a}}$,

где h – высота сечения рельефа,

a - расстояние между горизонталями (заложение),

$в$ – расстояние от точки до ближайшей горизонтали H_0.

Пример: Определить отметку H точки 2.

$$h = 2{,}5м \ , \ в = \frac{I}{2}a \ , \ h' = \frac{2{,}5}{2} = 1{,}25м \ ,$$

$$H_0 = 190{,}0 \ , \ H_2 = H_0 + h' = 190{,}0м + 1{,}25м = 191{,}2м \ .$$

Привышение между двумя точками (точки I и 2) находят как разность отметок этих точек

$$h_{1-2} = H_2 - H_1 ,$$

$$H_I = 187{,}5м \ , \quad H_2 = 191{,}2м \ ,$$

$$h_{1-2} = 191{,}2м - 187{,}5 = +3{,}7м.$$

Рис. 1.3. Определение отметок точек

1.7. Помтроение профиля местности по заданному направлению

Профиль по заданному направлению строят по отметкам точек, расположенных на этой линии. Горизонтальный масштаб 1:10 000 (равен масштабу карты), вертикальный – 1:1 000. Пример: Построить профиль по линии 3 – 4 (рис. 1.4.). (Сплошные горизонтали проведены через 2,5 м).

Для построения профиля на миллиметровой бумаге проводят прямую АВ – основание профиля (рис. 1.5), на которую переносят все точки пересечения (а,в,с…) заданного направления с горизонталями карты, и подписывают их отметки. Основанию профиля дают условную отметку H_0 , которая должна быть меньше минимальных отметок точек линии на 15 – 30 м. В примере H_0 = 170,0 м). К основанию профиля в отмеченных точках проводят пунктиром перпендикуляры, на которых откладывают в данном

вертикальном масштабе (1:1000) значения отметок. Полученные точки соединяют отрезками прямых линий.

Шкала отметок в вертикальном масштабе

Рис. 1.5. Профиль по заданному направлению

1.8. Определение крутизны ската

Крутизна ската ν^0 определяют по графику заложений (рис. 1.6.). Для этого измерителем берут заложение «а» (в примере по направлению СД), которое затем откладывают на графике заложений вдоль его вертикальных линий. Затем по основанию графика заложений определяют угол наклона, характеризующий крутизну ската (рис. 1.6.).

$$\nu^0 = 1^0,3 .$$

График заложений

Рис. 1.6. Определение крутизны ската

1.9. Проектирование линии с заданной крутизной ската

Между точками 1 и 2 (рис. 1.7.) спроектировать линию с крутизной ската не более 2^0. Для решения этой задачи по графику заложений измерителем берут заложение, которое соответствует заданной крутизне ската $\nu^0 = 2^0$. Этим раствором циркуля из точки I засекают следующую горизонталь и получают точку «а», затем из точки «а» засекают этим же раствором циркуля следующую горизонталь, получают точку «б» и т.д.

Соединив все точки, получают линию заданного уклона.

Задание выполняют на кальке, на которую предварительно копируют участок местности с горизонталями вдоль проектируемой линии.

Рис. 1.7. Проектирование линии с заданной крутизной ската

Образец бланка

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

кафедра геодезии и фотограмметрии

РАБОТА С ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ КАРТОЙ

1. Расстояние между точками

D = 4,25 см х 10 000 = 425 м по численному масштабу

По линейному масштабу D = 400 м + 25 м = 425 м

2. Географические координаты точек

$$\varphi_{Д} = 54^{0}19'37'' \qquad \lambda_{N} = 54^{0}19'23''$$

$$\lambda_{Д} = 14^{0}17'07'' \qquad \lambda_{N} = 14^{0}15'32''$$

3. Прямоугольные координаты точек

$X_Д$ = 6022584 м X_N = 6022264 м

$X_Д$ = 453460 м $У_N$ = 451788 м

4. Долгота осевого меридиана зоны

$$L_0 = 6^0 \ \& \ n - 3^0 = 6^0 \ \& \ 3 - 3^0 = 15^0$$

5. Расстояние точки от осевого меридиана зоны

$d_Д = У_Д$ -500 км = 453460 м – 500 км = - 46540 м

6. Дирекционный угол и азимуты линии (1-2)

Дирекционный угол α = 238 ^{0}

Истинный азимут А = 237^0 25¶

Магнитный азимут $A_m = 236^0$ 40¶

На 1993 г. магнитный азимут $A_m = 235^0$ 32¶

7. Абсолютные отметки точек

$$H_1 = 187,5 \text{ м}$$

$$H_2 = 191,2 \text{ м}$$

8. Превышение между точками

$$h = H_2 - H_1 = 191,2 \text{ м} - 187,5 \text{ м} = + 3,7 \text{ м}$$

9. профиль местности по заданной линии

10. Крутизна ската ν^0

$$\nu^0_{max} = 7^0 \qquad \nu^0_{min} = 7^0,5$$

11. Проектирование линии с крутизной ската не более 2^0

Преподаватель МД-94-1

Петров

1.10. Измерение площадей по топографическим картам полярным планиметром

полярный планиметр состоит из двух рычагов: полюсного и обводного. Обводный рычаг имеет ручку со шпилем для обвода контуров и подвижную каретку со счетным механизмом. Вместо шпиля может использоваться марка (точка, окружность), выгравированная на стеклянной пластине. полюсный рычаг на одном конце имеет груз с иглой, которая при обводе контура накалывается на бумагу и служит полюсом планиметра. На другом конце этого рычага находится шарнирная головка, которая вставляется в углубление на каретке счетного механизма и соединяет тем самым оба рычага планиметра в одно целое.

Рис. 1.8. счетный механизм планиметра

Счетный механизм планиметра (рис. 1.8.) состоит из циферблата (1) счетного колеса (2) , вращающегося на оси, параллельной обводному рычагу и верньера (3). При обводе фигуры счетное колесо катится по бумаге и дает отсчет. Первую цифру отсчета берут с циферблата, одно деление которого соответствует целому обороту счетного колеса (4) . Следующие две цифры отсчета берут со счетного колеса по нулевому штриху верньера 32 . Четвертая цифра отсчитывается по верньеру – это номер штриха верньера, совпадающего со штрихом счетного колеса - 5. Отсчет на рис. 1.8 равен 4323. площадь, измеренную планиметром вычисляют по формуле:

$$S = C \cdot \Delta h_{cp}.\ \ \Delta n = n_2 - n_1$$

где: C - цена деления планиметра;

n_1 - отсчет по планиметру до обвода контура;

n_2 - отсчет по планиметру после обвода контура.

Образец бланка

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

кафедра геодезии и фотограмметрии

Определение площади на топокартах планиметром							
Обвод квадрата километровой сетки топокарты					Обвод контура измеряемой площади		
Приемы	Отсчеты по планиметру		Разность отсчетов Δn		Отсчеты по планиметру		Разность отсчетов Δn
I	n_1	1102	994		n_1	0085	1184
	n_2	2096			n_2	1269	
	n_2	2096			n_2	1269	
II			993				1191
	n_3	3089			n_3	2460	
	n_3	3089			n_3	2460	
III			986				1195
	n_4	4075			n_4	3655	
$\Delta n_{cp} = 991{,}0$					$\Delta n_{cp} = 1190$		
Площадь квадрата 100 га					Измеряемая площадь		

		$S = C \cdot \Delta n_{ср}$ S = 0,1009 **&** 1190 = 120,1 га
Цена деления планиметра $C = \frac{100га}{\Delta n_{ср}} = \frac{100}{991} = 0{,}1009га$		МД -94-2 Петров

Цену деления планиметра определяют обводом квадрата координатной сетки на топографической карте масштаба 1:10 000, площадь которого известно (P_0 = 100 га).

Для измерения площади устанавливают полюс планиметра вне контура так, чтобы при обводе угол между обводным и полюсным рычагами был в пределах от 30 ^{0} до 150 ^{0}.

Затем устанавливают обводной шпиль над выбранной начальной точкой квадрата и берут по отсчетному механизму отсчет n_1. Обводят квадрат по часовой стрелке до исходной точки и берут отсчет n_2.

Затем выполняют следующие обводы, не меняя положения полюса; берут отсчеты n_3 и n_4. Отсчеты записывают в специальный бланк. Вычисляют разности отсчетов: $\Delta n_1 = n_2 - n_1$, $\Delta n_2 = n_3 - n_2$, $\Delta n_3 = n_4 - n_3$.Расхождение разностей не должно превышать 10 – 12 делений.

Находят среднее арифметическое из разностей по трем приемам:

$$\Delta n_{ср} \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3}{3} = \frac{994 + 993 + 986}{3} = 992$$

цену деления планиметра вычисляют по формуле:

$$C = \frac{P_0}{\Delta n_{ср}} = \frac{100га}{991} = 0{,}1009га .$$

Заданную площадь по топографической карте измеряют также тремя приемами, обводя эту площадь по контуру (см. образец бланка, стр. 16).

$$S = C \cdot \Delta n_{ch} = 0{,}1009 \cdot 1190 = 120{,}1 га \ .$$

2. РАБОТА С АЭРОФОТОСНИМКАМИ

Современные топографические карты создаются с помощью аэрофотосъемки. Аэрофотосъемка характеризуется масштабом фотографирования, фокусным расстоянием аэрофотоаппарата, высотой фотографирования, форматом кадра и рядом других характеристик, которые можно определить непосредственно по аэрофотоснимкам.

2.1. Привязка аэроснимка к топографической карте

Для выполнения задания используют аэроснимок и соответствующую карту. Привязка снимка к карте заключается в отождествлении фотоизображения контуров границ снимка с их графическим изображением на топографической карте. С этой целью рассматривают аэрофотоснимок и карту, опознавая на них идентичные объекты: населенные пункты, элементы дорожной сети, гидрография, контуры растительного покрова и т.д. Изучив изображения идентичных объектов на аэрофотоснимке и карте, с помощью штриховых наметок карандашом фиксируют на карте примерные границы снимка. Если привязка аэрофотоснимка сделана правильно, то полученная фигура должна быть близка к квадрату.

2.2. Определение масштаба аэрофотоснимка и высоты фотографирования

Масштаб аэрофотоснимка определяют по формуле:

$1 \coloneqq \frac{\ell}{L \cdot M}$, отсюда знаменатель масштаба аэроснимка $m = \frac{L}{\ell} \cdot M$,

где: ℓ - длина отрезка на аэрофотоснимке;

L - длина этого же отрезка на топографической карте;

M - знаменатель масштаба карты;

m - знаменатель масштаба аэроснимка.

Для определения масштаба аэрофотоснимка используют два отрезка, концы которых опознают на аэрофотоснимке и карте с погрешностью не более 0,2 мм. С этой целью используют четкие контурные точки аэрофотоснимка и карты: перекрестки дорог, углы построек, углы леса и сельхозугодий.

Оба отрезка должны проходить примерно через главную точку аэроснимка, а расстояния от главной точки до концов отрезка должны быть примерно равными (допустимая разность длин не должна превышать 1 – 2 см). Главная точка «0» аэрофотоснимка находится в точке пересечения линий, соединяющих координатные метки аэрофотоаппарата, изображения которых располагаются в середине каждой из четырех сторон аэрофотоснимка (рис. 2.1.).

Рис. 2.1. Определение главной точки аэроснимка

Образец бланка

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

кафедра геодезии и фотограмметрии

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБА АЭРОФОТОСНИМКА

И ВЫСОТЫ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

Аэроснимок № 034

Лист карты Y-35-38-А-в-3

Исходные данные

Масштаб карты 1:M = 1:10 000

Фокусное расстояние

аэрофотоаппарата f = 100 мм

$$m = \frac{L \cdot M}{\ell} \qquad H = m_{cp} \cdot f$$

допуст. $\Delta m = \frac{2 \cdot \Delta d \cdot M}{\ell_{cp}}$

M = 10 000

Схема расположения отрезков на аэроснимке

Измерение длины отрезков

на аэроснимке	на карте
ℓ_1 = 178,7 мм	L_1 = 195,2 мм
ℓ_2 =148,3 мм	L_2 = 217,0 мм
m_1 = 10926	m_2 = 10943

$\Delta m = m_1 - m_2 = 17$ доп. $\Delta m = 280$

$m_{ср} = 10934$

Высота фотографирования

H = 1093 м

Преподаватель МД-94-1

Иванов

Опознав выбранные точки аэрофотоснимка на топографической карте, измеряют отрезок с помощью измерителя и линейки. Вычисления выполняют в бланке (стр. 19). Разность знаменателей масштаба Δm аэрофотоснимка, полученная из определений по двум отрезкам, не должна превышать величины:

допустимая $\Delta m = \frac{2\Delta d \cdot M}{\ell_{ср}}$, $\Delta m = m_2 - m_1$

где: Δd - допустимая ошибка положения контуров на топографической карте ($\Delta d = \pm 1 мм$).

В качестве окончательного значения знаменателя масштаба аэрофотоснимка принимают его среднее значение из двух определений:

$$m_{ср} = (m_1 + m_2) : 2 \quad .$$

Высоту фотографирования определяют по формуле:

$$H = f \cdot \frac{L \cdot M}{\ell} \quad \text{или} \quad H = f \cdot m_{ср} \ ,$$

где f - фокусное расстояние аэрофотоаппарата, которым была выполнена аэрофотосъемка.

Фокусное расстояние задается преподавателям.

Высоту фотографирования вычисляют в метрах.

3. СОСТАВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ПЛАНА

По данным топографической съемки необходимо составить топографический план местности в масштабе 1:2000 с высотой сечения рельефа 1 м.

Составление плана выполняют в такой последовательности:

построение координатной сетки;

нанесение точек съемочного обоснования по координатам;

нанесение ситуации, точек рельефа на план и проведение горизонталей;

вычерчивание топографического плана.

3.1. Построение координатной сетки

Координатную сетку строят на листе чертежной бумаги размером 289 х 210 мм (формат А 4). Стороны координатной сетки принимают равными 5 х 5 см.

Для построения сетки на листе бумаги карандашом проводят диагонали (относительно углов листа). Из точки пересечения диагоналей откладывают на них циркулем-измерителем 4 равных отрезка (полудиагонали) длиной 12 – 13 см (рис. 3.1.), получают точки а,б,в,г. Соединив эти точки на диагоналях, получают стороны вспомогательного прямоугольника а,б,в,г, на которых, начиная от точки г, измерителем откладывают равные отрезки (по 5 см) – стороны сетки квадратов. Общий размер сетки 20 см по оси *X*, 15 см – по оси *У*.

Правильность построения координатной сетки контролируют путем измерения циркулем-измерителем диагоналей всех квадратов сетки. Ошибки в длинах диагоналей не должны превышать 0,2 – 0,3 мм. После контроля все вспомогательные построения (на рис. 3.1.показаны пунктиром) убирают.

3.2. Нанесение точек съемочного обоснования по координатам

Для нанесения точек съемочного обоснования по координатам сетку координат оцифровывают через 100 метров. За начало координат принимают юго-западный угол рамки. Координаты юго-западного угла сетки выбирают

так, чтобы точки съемочного обоснования разместились примерно в середине сетки. От юго-западного угла к северу подписывают абсциссы Х, к востоку – ординаты У.

Координаты, высоты точек съемочного обоснования и горизонтальные проложения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

Номера точек	Координаты		Высоты, м	Горизонт. проложен., м
	Х	У		
I	5319,8	2490,0	148,2	
				169,2
2	5488,8	2481,6	156,6	
				155,8
3	5469,6	2636,3	154,7	
				159,2
4	5311,2	2619,8	146,5	
				130,1

в примере координаты юго-западного угла удобно взять равными Х = 5,2 км, У = 2,4 км (рис. 3.4). Нанесение каждой точки съемочного обоснования производят с помощью циркуля – измерителя и масштабной линейки. Вначале определяют, в каком квадрате располагается данная точка. Затем значение абсциссы циркулем-измерителем откладывают по обеим сторонам квадрата, наколы соединяют тонкой прямой линией. На этой линии откладывают значение ординаты У. Делают накол, полученную точку обводят условным знаком (кружочком), рядом слева подписывают номер точки, справа отметку до 0,1 м. Накладку точек съемочного обоснования обязательно контролируют. Для этого значение горизонтального проложения

между двумя точками циркулем - измерителем берут по масштабной линейке и сравнивают с расстоянием между соответствующими точками на плане. Расхождение между этими величинами допускается 0,2 мм на плане (рис. 3.4.).

3.3. Нанесение ситуации, точек рельефа и проведение горизонталей

Ситуацию наносят на план по данным полевых измерений и абрисов (рис. 3.2 табл. 3.2).

Съемочные пикеты, снятые полярным способом, наносят на план по горизонтальному углу и горизонтальному проложению. Горизонтальные углы откладывают при помощи кругового транспортира от начального направления по ходу часовой стрелки, а горизонтальное проложение по линейке или циркулем-измерителем в заданном масштабе. Полученную точку обводят кружочком, рядом подписывают номер и отметку. Руководствуясь абрисом и записями, сделанными в примечании, вычерчивают условными знаками элементы ситуации. Виды угодий пока обозначают надписями (рис. 3.2.).

Нанесение съемочных пикетов, снятых на местности способом прямоугольных координат (перпендикуляров), производят с помощью линейки и треугольника, откладывая по линейке расстояния, указанные в абрисе, вдоль начального направления и перпендикулярно к нему в масштабе 1:2000 (рис. 3.2 а., начальное направление линия 3 – 4).

Рис. 3.2. а) Съемка способом перпендикуляров

Таблица 3.2

Исходные данные к составлению
топографического плана
станция 1 $H_1 = 148,2$
начальное направление на т.2

Пикет	Гориз. угол ^{0}	Гориз. пролож.	Высоты Н, м	Примечание
1	350	20,0	150,0	гран. пашни
2	5	92,0	155,0	гран. пашни
3	27	64,5	153,2	шосс. дор.
4	44	94,0	153,7	шосс. дорога (шир. 5 м, гравий)
5	53	52,6	151,5	точка рельефа
6	355	70,0	154,0	столб ЛЭП

Проводят горизонтали по отметкам точек с высотой сечения 1 м путем линейного интерполирования отметок по линии ската. в результате интерполирования находят на плане точки, отметки которых кратны принятому сечению. (На рис. 3.3 проведены горизонтали и отметками 154 и 153 м).

Рис. 3.3. Проведение горизонталей: а) графическим интерполированием, б) с помощью палетки

Горизонтали можно провести с помощью палетки. Для изготовления палетки берут восковку размером примерно 7 х7 см. На восковке проводят

ряд параллельных линий через равные интервалы (0,5 см или 1,0 см), подписывают их значениями отметок через 1 метр, начиная с минимальной отметки (например 151, 152 и т.д. (рис. 3,3 б). Затем палетку накладывают на 2 соседние А и Б точки на плане таким образом, чтобы эти точки заняли на палетке соответствующее положение по высоте (152,4 и 154,4). Направление линии АБ пересекает линии палетки в точке «а» с отметкой 153 м, в точке «б» с отметкой 154 м. Точки «а» и «б» перекалывают на план и подписывают их отметки. Таким же образом находят положение горизонталей между другими точками на плане. Соединяя точки с одинаковыми отметками плавными линиями, проводят горизонтали.

3.4. Вычерчивание топографического плана

План оформляют в соответствии с «Условными знаками для топографических планов масштабов 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500».

Вычерчивают план в следующей последовательности:

пункты съемочного обоснования;

здания, постройки, отдельные местные предметы;

дороги, линии электропередач, просеки, границы контуров и другие элементы линейной протяженности;

надписи объектов и отметки высотных точек.

Вычерчивают горизонтали, выделяют утолщенные горизонтали краткие 5 метрам, размещают надписи горизонталей;

почвенно-растительный покров (условные знаки угодий, лес, луг и пр.);

рамку и зарамочное оформление.

Топографический план вычерчивают в карандаше.

Образец топографического плана приведен на рис. 3.4.

Рис. 3.4. Вычерчивание топографического плана

4. ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ ТРАССЫ

Трассой называют ось проектируемого линейного сооружения: дороги, канала, трубопровода и др. Профиль трассы является основным графическим, по которому выполняется проектирование высотного положения будущего инженерного сооружения. Строят профиль по результатам технического нивелирования пикетов, закрепленных на трассе через 100 м, промежуточных точек и поперечников.

4.1. Обработка результатов нивелирования

По результатам технического нивелирования по пикетажу трассы (рис. 4.1.) разбитой между пикетами 0 и 6 с известными отметками (H_0 = 127,410 м, H_6 = 133,446 м), получены превышения $h_{изм.}$, которые выписаны в специальную ведомость вычисления отметок в графу 2 (табл. 4.1., стр. 29).

Сначала вычисляют невязку нивелирного хода f_h и допустимое значение невязки доп. f_h по формулам:

$$f_h = \sum h_{изм.} - (H_6 - H_0) ,$$

доп. $f_h = 50мм\sqrt{L_{км}}$, где: f_h - полученная невязка нивелирного хода, $\sqrt{h_{изм.}}$ - сумма измеренных превышений по всему нивелирному ходу H_6 – отметка конечного пикета (ПК 6), H_0 - отметка начального пикета (ПК 0), L – длина хода в км (0 . 6 км.).

f_h = + 6016 – (133,446 – 127,410) = 6016 – 6036 = - 20 мм;

доп. $f_h = 50мм\sqrt{0{,}6_{км}} = 40мм$.

Если полученная невязка меньше допустимой, то ее распределяют с обратным знаком на все измеренные превышения, для чего находим поправки δ_h к превышениям ($h_{изм}$).

$\delta_h = -\frac{f_h}{n}$, где n – число превышений.

Поправки округляют до целых миллиметров, распределяют так, чтобы сумма поправок была равна невязке с обратным знаком. В примере $\delta_h = -(-\frac{20мм}{9}) = +2мм$ (и остаток 2 мм). Остаток 2 мм распределяют еще по 1 мм на 2 превышения Таким образом, в нашем примере два превышения получили поправку по 3 мм, а семь превышение – по 2 мм.

Контроль: $\sum \delta_h \cdot 7 + 3мм \cdot 2 = +20мм$

Поправки выписывают в графу 2 над значениями $h_{изм.}$ В графу 3 записывают исправленные превышения $(h_{испр.})$, которые вычисляют по формуле.

$h_{испр.} = h_{изм.} + \delta_h$ = + 8800 +2 = + 0802; - 2100 + 2 = - 2098 и т.д.

Контроль: $\sum h_{испр.} = H_6 - H_0$

Рис. 4.1. Схема нивелирного хода

Далее вычисляют отметки пикетов плюсовых точек оси трассы, отметки поперечного профиля.

Отметки пикетов и плюсовых точек трассы вычисляют по формуле;

$H_n = H_{n-1} + h_{испр.}$,

где: H_n -отметка определяемого пикета

H_{n-1} - отметка предыдущего пикета

$h_{испр.}$ - исправленное превышение между предыдущим и определяемым пикетами.

В нашем примере:

$H_1 = H_0 + h_{испр.} = 127,410 + 0,802 = 128,212$,

$H_2 = H_1 + h_{испр.} = 128,212 - 2,098 = 126,114$.

Контролем правильности вычисления отметок является полученная в результате вычисления отметка конечного пикета (ПК 6), (H_6 = 133,446 м). Отметки всех точек записывают в графу 4 используя полученные отметки пикетов оси трассы, вычисляют отметки точек поперечника.

В ведомости вычисления отметок нивелирного хода выписаны превышения между пикетом 5 и точками поперечного профиля.

Отметки точек поперечного профиля вычисляют по формуле:

$$H_1 = H_5 + h_i ,$$

где: H_1 - отметка определяемой точки;

H_5 - отметка пикета 5;

h_i - превышение между ПК 5 и точкой поперечного профиля.

Таблица 4.1.

Ведомость вычисления отметок

Номер точек	Превышения, мм		Отметки Н м
	$h_{изм.}$	$h_{испр.}$	
1	2	3	4
ПК 0	+2		127,410
	+0800	+0802	
ПК 1	+2		128,212
	- 2100	- 2098	
ПК 1+ 40	+ 2		126,114
	- 0190	- 0188	
ПК 2	+2		127,618
	+2412	+ 2414	
X	+ 2		130.032
	+ 1408	+ 1410	

ПК 3	+ 2		131,442
	+ 2598	+ 2600	
ПК 4	+ 3		134,042
	- 1202	- 1199	
ПК 5	+ 3		132,843
	+ 0600	+ 0603	
ПК 6			133,446
$\sum h$	+ 6016	+ 6036	$H_6 - H_0 = +6036$

Поперечный профиль

Номер точек	Превышения $h_{испр.}$	Отметка H м
ПК 5		132,843
	+0810	
Л + 5		133,653
	- 1588	
Л + 10		131,255
	- 1342	
П + 10		131,501

В примере: $H_{Л+5} = 132 \cdot 843 + 0{,}810 = 133{,}653 м$

$$H_{Л+10} = 132 \cdot 843 - 1{,}588 = 131{,}255 м$$

$$H_{Л+10} = 132 \cdot 843 - 1{,}342 = 131{,}501 м$$

Вычисленные отметки записывают в ведомость в графу «отметки» против соответствующей точки.

4.2. Построение профиля

По вычисленным отметкам пикетов и промежуточных точек на миллиметровой бумаге строят продольный профиль трассы и профиль поперечника. Профили строят в масштабах:

Продольный профиль:

горизонтальный масштаб 1:2 000;

вертикальный масштаб 1:200;

Поперечный профиль:

горизонтальный масштаб 1:200;

вертикальный масштаб 1:200;

На листе миллиметровой бумаги размером 400 х 400 мм вычерчивают сетку профиля. Названия граф и размеры их в миллиметрах показаны на рис. 4.2.

В графе «расстояния» отмечают положение пикетов (через 5 см) и плюсовых точек в заданном масштабе. Между пикетами и плюсовыми точками выписывают расстояния. Икс – точки не строят. Ниже этой графи подписывают номера пикетов.

В графе «фактические отметки» выписывают из ведомости нивелирного хода отметки пикетов и плюсовых точек с округлением до 0,01 м.

Выбирают и подписывают отметку условного горизонта профиля, которая должна быть на 5 – 8 метров меньше самой низкой отметки по трассе. (В примере минимальная отметка ПК 1 + 60 Н = 125,93, следовательно отметку условного горизонта можно взять 120,0 м).

От линии условного горизонта на перпендикулярах, проведенных пунктирными линиями через точки трассы, откладывают отметки точек в масштабе 1:200. Полученные точки последовательно соединяют прямыми линиями, в результате чего получают продольный профиль местности по оси трассы.

Над продольным профилем строят сетку для поперечного профиля. Заполняют графи «расстояния» и «фактические отметки» так же, как и при построении продольного профиля. Под сеткой подписывают пикетажные обозначения точек поперечника (рис. 4.2.).

Выбрав условный горизонт, по вычисленным отметкам строят положение точек поперечника и, соединив эти точки, получают поперечный профиль местности.

4.3. Проектирование по профилю

Вдоль продольного профиля проектируют положение оси будущего инженерного сооружения. Проектную линию намечают графически с учетом следующих требований:

проектную отметку нулевого пикета принимают равной фактической отметке этого пикета;

уклоны отдельных участков проектной линии не должны превышать 0,050;

шаг проектирования (длину отдельного участка) принимают от 200 м до 600 м;

объем земляных работ должен быть минимальным, а объемы насыпей и выемок должны быть примерно одинаковыми, т.е. на профиле должно соблюдаться примерное равенство площадей насыпей и выемок;

изменение уклона проектной линии производят на пикетах или плюсовых точках.

На рис. 4.2. проектная отметка ПК 0 равна фактической отметке (127,41). Намечено три участка проектной линии с разными уклонами. Длина каждого участка 200 м. Вычисляют уклон участка проектной линии по формуле:

$$i = \frac{h}{D} = \frac{H_{кон.} - H_{нач.}}{D},$$

где: i - уклон участка проектной линии,

h - превышение участка проектной линии,

D - горизонтальной проложение участка проектной линии,

$H_{нач.}$ - проектная отметка начального пикета участка проектной линии,

$H_{кон.}$ - проектная отметка конечного пикета участка проектной линии.

В примере уклоны равны:

$$i_1 = \frac{H_2 - H_0}{200} = \frac{127{,}62 - 127{,}41}{200} = \frac{0{,}21}{200} = 0{,}001 ,$$

$$i_2 = \frac{H_4 - H_2}{200} = \frac{134.04 - 127{,}61}{200} = \frac{6.43}{200} = 0{,}032 ,$$

$$i_3 = \frac{H_6 - H_4}{200} = \frac{133{,}45 - 134{,}01}{200} = \frac{-0{,}64}{200} = -0{,}003 .$$

Полученные уклоны округляют до 0,001 и выписывают в графу «Проектные уклоны» над диагональю. Под диагональю выписывают горизонтальное проложение участка с данным уклоном. Направление диагонали показывает знак уклона:

- уклон положительный;
- уклон отрицательный;
- уклон нулевой (горизонтальный участок).

Вычисляют проектные отметки точек продольного профиля по формуле:

$$H_{n+1} = H_n + i \cdot d ,$$

где: H_{n+1} - проектная отметка определяемой точки,

H_n - проектная отметка предыдущей точки,

i - уклон данного участка,

d - горизонтальное проложение между соответствующими точками.

В примере

$$H_1 = H_0 + i \cdot d = 127{,}41 + 0.001 \cdot 100 = 127{,}51 м$$

$$H_{1+40} = H_1 + i \cdot d = 127{,}51 + 0.001 \cdot 40 = 127{,}55 м$$

$$H_{1+60} = H_1 + i \cdot d = 127{,}51 + 0.001 \cdot 60 = 127{,}57 м$$

$$H_2 = H_1 + i \cdot d = 127{,}51 + 0.001 \cdot 100 = 127{,}61 м$$

Полученные проектные отметки выписывают в графу «Проектные отметки». Таким же образом вычисляют проектные отметки для второго участка.

$$H_3 = H_2 + i \cdot d = 127{,}61 + 0.032 \cdot 100 = 127{,}61 + 3{,}20 = 130{,}81$$ и т.д.

Контролем вычислений служат проектные отметки концов участка проектной линии (ПК 2, ПК 4, ПК 6).

Вычисляют рабочие отметки по формуле

$$H_{раб.} = H_{проект.} - H_{фактич.}$$

$$H_{раб.} = 127{,}51 - 128{,}21 = -0{,}70$$ и т.д.

Рабочие отметки выписывают около проектной линии: положительные (высота насыпи) – выше линии, отрицательные (глубина выемки) – ниже проектной линии.

На поперечном профиле по вычислено проектной отметке пикета 5 (H_5 = 133,71) от которого был разбит поперечник, наносят положение проектной линии. Ее проводят горизонтально по 6 метров влево и вправо от оси трассы. Показывают кюветы, (если линия идет в выемке) и откосы (если линия идет по насыпи). Уклон откосов и бортов канав 45 ^{0}. Ширина дна кюветов 0,6 м., глубина 1 м.

Над проектной линией выписывают ее отметку (в примере 133,71).

Все проектные данные – проектные линии, уклоны, проектные отметки, рабочие отметки вычерчивают на профиле красным цветом.

Слева над продольным профилем вычерчивают штамп. (Размеры произвольные рис. 4.2).

5. РАБОТА С ГЕОДЕЗИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

Работа с геодезическими приборами включает измерение горизонтальных углов, вертикальных углов, расстояний теодолитом (рис. 5.1) и измерение превышений нивелиром (рис. 5.5.).

Для выполнения измерений теодолит или нивелир приводят в рабочее положение – горизонтируют и фиксируют. Для горизонтирования теодолита поворотом алидады (8) устанавливают уровень (13) по направлению двух подъемных винтов прибора (5). Вращая эти винты в разные стороны выводят пузырек уровня на середину (в нольпункт). Открепив алидаду, поворачивают ее на 90 ^{0}, устанавливая уровень по направлению третьего подъемного винта. Вращением этого винта приводят пузырек уровня на середину. Затеи вращением диоптрийного кольца (14) устанавливают резкое изображение сетки нитей (рис. 5.3).

5.1. Измерение горизонтальных и вертикальных углов

Устанавливают теодолит в вершине угла, горизонтируют его, вращением алидады (9) и трубы (10) при положении вертикального круга слева (КЛ) наводят ее с помощью визира (3) на левую визирную цель (рис. 5.2), устанавливают ее резкое изображение с помощью кремальеры (12).

Рис. 5.2. Расположение марок при измерении горизонтальных углов

Рис. 5.3. Сетка нитей теодолита

Далее наводящими винтами алидады (9) и трубы (11) точно совмещают центр сетки нитей с визирной целью и с помощью микроскопа (1) берут отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам и записывают в журнал (Табл. 5.1.), затем поворачивают алидаду, наводят сетку нитей на правую визирную цель и также берут и записывают отсчеты по кругам теодолита. Выполненные действия при «круге лево» (КЛ) составляют первый полуприем. Второй полуприем выполняют при «круге право» (КП), для чего трубу переводят через зенит и далее действуют аналогично первому полуприему (КЛ). Порядок записи результатов измерений показан в жернале цифрами с (1) по 8 .

Значение горизонтального угла получают дважды:

1 полуприем КЛ $\beta_л = 95^0 30' - 48^0 25' = 47^0 05'$ (9)

2 полуприем КП $\beta_п = 275^0 30' - 228^0 26' = 47^0 04'$ (10)

Допустимое расхождение угла КЛ – КП не должно превышать 2¶. За окончательное значение угла принимается его средняя величина

$$\beta_{ср} = (\beta_л + \beta_п) : 2 = 47^0 04'.5 \qquad (11)$$

Вертикальные углы вычисляют по формуле $\nu = КЛ - МО$

МО = (КЛ + КП – 180 ^{0}) : 2, где КЛ и КП отсчеты по вертикальному кругу теодолита, МО – место нуля вертикального круга.

МО = (16 ^{0} 32 ¶ + 163 ^{0} 27 ¶ – 180 ^{0}) : 2 = - 0¶.5 (12)

$$\nu = 16^0 32' - (-0,'5) = 16^0 32,'5 \quad (14)$$

Таблица 5.1.

ЖУРНАЛ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ И ДЛИН ЛИНИЙ

Дата 4 декабря исполнитель Иванов С. И.

Точки стояния	Круг	Точки визирования	Горизонтальный круг		
			Отсчет ° ′	Измеренный угол ° ′	Средний угол ° ′
1	2	3	4	5	6
В	КЛ	Д	48 25 (1)	(9) 47 05	(11) 47 04,5
		С	95 30 (3)		
	КП	Д	228 26 (5)	(10) 47 05	
		С	275 30 (7)		

Точки		Круг	Вертикальный круг			Длина линий
Стояния	Визирования		Отсчет	Место нуля	Угол наклона	Измеренн. / Гориз. прол.
7	8	9	10	11	12	13
В	Д	КЛ	16 32 (2)	(12) - 0′, 5	(14) 16 32,5	17,6 (16)
		КП	163 27 (6)			
В	С	КЛ	351 18 (4)	(13) + 0,5	(15) -8 42,5	
		КП	188 43 (8)			
		КЛ				

5.2. Измерение расстояний нитяным дальномером

Измерение расстояний нитяным дальномером производят по рейке с сантиметровыми шашечными делениями (рис. 5.4), для чего труба теодолита наводят на рейку и наводящим винтом трубы (11) совмещают верхнюю дальномерную нить сетки нитей с ближайшим целым дециметровым делением рейки (например 10 дц.). Затем берут отсчет n_2 по нижней нити с точностью до 1 мм.

На рис. 5.4 n_1 = 1000 мм n_2 =1176 мм

Измеренное расстояние $S = K\,(n_1 - n_2)$, где К – коэффициент дальномера. $K = 100$

$S = 100\ (1176\text{-}1000) = 17{,}6$ м

Результат записывают в графу 13 журнала (табл. 5.1). (16)

5.3. Измерение превышений

Нивелир (рис. 5.5) приводят в рабочее положение – горизонтируют, приводя на середину пузыре круглого уровня (7) подъемными винтами (11), фокусируют сетку нитей (1). Затем наводят трубу на заднюю рейку, добиваются ее резкого изображения с помощью кремальеры (5). Элевационным винтом (8) приводят пузырек цилиндрического уровня (9) на середину, берут отсчет по черной стороне рейки средней горизонтальной нитью до 1 мм (рис. 5.6), затем – по красной стороне рейки. Отсчеты записывают в графу 3 журнала ((1) (2) табл. 5.2). Затем рейку устанавливают на переднюю точку и действуя аналогично, берут отсчеты по черной и красной сторонам передней рейки (3) и (4), записывая их в графу 4 журнала.

Превышение вычисляют по формуле $\boldsymbol{h = a - в}$

где : a - отсчет по задней рейке,

$в$ – отсчет по передней рейке.

Превышение вычисляют дважды: по черным и красным сторонам рейки

$h_ч = 1171 - 1793 = -622$ (5)

$h_к = 5854 - 6478 = -624$ (6) $h_ч - h_к = 2$ мм

Расхождение между $h_к$ и $h_к$ не должно превышать 5 мм. В графе 7 вычисляют среднее превышение (7)

$h_{ср.} = (h_ч + h_к) : 2 = -623$ мм.

Рис. 5.5. Основные части нивелира Н-3

1 – диоптрийное кольцо; 2 – зрительная труба; 3 – визир; 4 – объектив; 5 – кремальера; 6 – наводящий вид; 7 – круглый уровень; 8 – элевационный винт; 9 – цилиндрический уровень; 10 – закрепительный винт; 11 – подъемный винт; 12 – подставка.

Рис. 5.6. Поле зрения зрительной трубы нивелира

Таблица 5.2

Журнал нивелирования

№№ станций	Номер точек наблюдений	Отсчеты по рейкам, мм			Превышения, мм	
		Задней а	Передний в	Промежуточный	Вычисленный	Средние
1	2	3	4	5	6	7
	1	1171 (1)				
1		5854 (2)			- 622 (5)	
	2		1793 (3)			- 623 (7)
			6478 (4)		- 624 (6)	

МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

По самостоятельной работе

«ГЕОЛОГИЯ»

для студентов специальности
«Технология геологической разведки»

Автор: Огородников В. Н., д.г-м.н., доцент

Екатеринбург
2019

Введение

Естественные науки – совокупность наук о природе. Природа – в широком смысле – все сущее, весь мир в многообразии его форм; объект естествознания. К естественным наукам относятся и география, и геология. **География –** система естественных – физико-географических и общественных – экономико-географических наук, изучающих географическую оболочку Земли, природные и производственно-территориальные комплексы и их компоненты. **Геология –** комплекс наук о составе, строении и истории развития земной коры и Земли (Советский энциклопедический словарь. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1979).

В школьных программах нет дисциплины «Геологии». Элементарные сведения о Земле как планете и ее внутреннем строении школьники получают на уроках «Географии» в 6 и 7 классах. Для изучения геологических вопросов рекомендуем самостоятельно читать учебники по геологии. В настоящее время выпущено огромное число самых различных учебников, учебных пособий, методических указаний по всем направлениям геологических наук. Любой желающий по своему усмотрению без особого труда может для себя их приобрести. Но следует помнить афоризм Козьмы Пруткова: «Никто не обнимет необъятного!» Нельзя школьникам сразу преподносить геологические знания в объеме читаемой в высшей школе, но знать основы геологии необходимо каждому грамотному человеку для того, чтобы понимать историю развития природы. Без этих знаний невозможно понять процесс формирования как прошлых, так и современных ландшафтов – важнейших составных частей географической оболочки Земли.

Для квалифицированного подхода к встрече с природными объектами рекомендуем иметь элементарные познания по геологии. Аннотации первоочередных лекций приведены в настоящих методических указаниях.

Геология – это наука о Земле, о ее свойствах и изменениях, происходящих на ней в настоящее время, а также совершавшихся во времена прошедшие. Геология – это история Земли, и эту историю она сама записывает. Она сама ведет свою автобиографию; ведет ее без перерыва почти от начала своего образования и до настоящего времени, записывая ее на своих каменных страницах, и человеку остается лишь научиться читать эту занимательную каменную летопись, научиться понимать эти каменные письмена, в которых буквами являются попадающиеся нам под ноги камешки, а чернилами – воды ручьев, рек и морей. Вначале мы должны научиться различать буквы – камни, потом должны постигнуть самый процесс чтения записей Земли, для этого должны изучать геологические процессы, и лишь после того, как мы хорошо освоимся с ними, мы можем приступить к чтению древних страниц этой летописи. В этой великой многотомной летописи Вселенной всякая летопись человека, будь то самый древний папирус, является лишь одной незначительной строчкой, помещенной в конце ее последней страницы. Читая эту великую автобиографию, мы уносимся в бесконечно отдаленные от нас, неизмеримые даже тысячелетиями, времена. Эти далекие времена отдалены от нас во времени так, как отдалены от нас в пространстве далекие, загадочно мерцающие звезды.

Но где и как можно научиться читать эту великую летопись Земли? Где и как надо изучать геологию? Везде и всюду – в каждом овраге, в каждой речке, в любом карьере можно наблюдать результаты геологических процессов. Для изучения геологических процессов необходимо принимать участие в геологических экскурсиях, проходящих по геологическим объектам, доступными непосредственно нашему наблюдению.

1. ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ГЕОЛОГИИ

1.1. НАУКА О ЗЕМЛЕ. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Два греческих слова "гео" — Земля и "логос – учение позволяют трактовать термин "геология" как науку о Земле. Однако в наше время ограничиться таким простым толкованием уже нельзя, поскольку этот термин объединяет в себе целый комплекс самостоятельных направлений, как фундаментальных, так и прикладных.

Под ***фундаментальными*** обычно понимают те направления, которые разрабатывают понятия, открывают явления, закономерности, свойства, определяющие развитие геологии как науки. Фундаментальность не следует отождествлять с теоретическими разработками. К фундаментальным геологическим наукам могут быть отнесены следующие дисциплины: геохимия, минералогия, петрография, геотектоника, общая геология и историческая геология. Названные дисциплины занимаются различными уровнями организации вещества Земли в пространстве и во времени. Именно это обстоятельство в основном и определяет фундаментальность каждого из названных направлений. Все они теснейшим образом связаны между собой.

К ***прикладным направлениям*** принято относить те, которые непосредственно работают на производство: создают приёмы, методы, технологию геологических исследований, связанных в первую очередь, с поисками и разведкой полезных ископаемых, а также охраной и рациональной эксплуатацией земных недр. Их в современной геологии значительно больше, чем фундаментальных. Назовём лишь несколько: региональная геология, структурная геология, геологическое картирование, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, инженерная геология.

1.2. ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ГЕОЛОГИИ

Объектом общей геологии является Земля в целом: её возникновение как планеты, формирование внутренних и внешних оболочек, их функционирование и взаимодействие. Иными словами, речь идёт об изучении Земли как геологической системы.

Предметом непосредственного изучения геологии служат минералы, горные породы, ископаемые органические остатки и современные геологические процессы.

В основе научного познания геологической истории Земли, реконструкции процессов и обстановок прошлого лежит ***метод актуализма.*** При использовании этого метода к пониманию прошлого идут от изучения современных процессов, но с осознанием того, что в прошлом, особенно отдалённом от современности, и физико-географическая обстановка, и сами процессы отличались от современных тем больше, чем больше отдалена от нас прошлая геологическая эпоха.

1.3. ЗНАЧЕНИЕ ГЕОЛОГИИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ОБЩЕСТВА

Огромное значение, которое имеет геология, может быть рассмотрено в двух аспектах - общенаучном и народнохозяйственном.

Общенаучное значение геологии заключается в её неоценимой роли в формировании материалистического понимания природы. Данные геологии играют важную роль в диалектико-материалистическом обосновании философских принципов, отражающих материальное единство мира и его развитие,

Практическое значение геологии заключается в обеспечении минерально-сырьевыми ресурсами различных отраслей хозяйства, в инженерно-геологическом

обосновании строительства разнообразных гражданских и промышленных объектов, в решении питьевого и технического водоснабжения.

1.4. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ГЕОЛОГИИ

Геология зародилась в глубокой древности. Задолго до новой эры человек научился выплавлять металлы, использовать минеральную воду. Издавна привлекали внимание человека и природные процессы. Однако временем возникновения геологии как науки принято считать вторую половину ХУШ в. – период зарождения и бурного развития горнодобывающей промышленности. В России основоположником обобщений геологических знаний стал М.В. Ломоносов (1711-1765), в Западной Европе - Д.Геттон (1726-1797) и А.Г.Вернер (1750-1817).

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗЕМЛЕ

2.1. ЗЕМЛЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ

"Вселенная, весь мир, бесконечный во времени и пространстве и бесконечно разнообразный по тем формам, которые принимает материя в процессе своего развития. Вселенная существует объективно, независимо от сознания человека, её познающего. Вселенная содержит гигантское множество небесных тел, многие из которых по размерам превосходят Землю иногда во много миллионов раз (БСЭ, т.5, с. 1315). Доступная для изучения часть Вселенной называется ***Метагалактикой,*** включающей свыше миллиарда звёздных скоплений, или ***галактик*** (греч. "галактика" - молочный, млечный).

Наша ***Галактика Млечного Пути*** - типичная звездная система с массой около 10^{10} масс Солнца относится к типу спиральных и включает свыше 150 миллиардов звёзд. С Земли, расположенной внутри Галактики, Млечный Путь представляется в виде широкой белёсой полосы звезд, пересекающей небо. Период обращения Солнца и звёзд вокруг центра Млечного Пути 200 млн. лет. Возраст Галактики около 12 млрд. лет. Когда речь идёт о Солнечной системе, то имеется в виду Солнце и всё, что находится в поле его тяготения. К наиболее крупным телам этой системы относятся 9 планет, 34 их спутника, многочисленные кометы и астероиды. Согласно современным космогеническим представлениям Земля и другие планеты Солнечной системы образовались 4,6 млрд. лет назад почти одновременно с Солнцем.

Земля обращается вокруг Солнца по эллиптической орбите на среднем расстоянии 149,6 млн. км (144,117 млн. км в перигелии, 152,083 в афелии), период обращения 365,242 средних солнечных суток (год), скорость в среднем 29,765км\с (30,27км\с в перигелии, 29,27км\с в афелии). Период обращения Земли вокруг оси 23 час 56 мин 4,1 с (сутки).

Пожалуй, все согласны с тем, что исходным веществом для формирования Солнечной системы послужили межзвёздная пыль и газы, широко распространенные во Вселенной. Но каким образом в их составе оказался полный набор химических элементов таблицы Менделеева и что послужило толчком для начала конденсации газа и пыли в протосолнечную туманность остается дискуссионной проблемой. Следующая стадия образования Солнечной системы предусматривает распад протопланетного диска на отдельные планеты внутренней и внешней групп с поясом астероидов между ними. Промежуточной фазой было образование сонма твердых и довольно крупных, до сотен километров в диаметре, тел, именуемых планетезималями, последующее скопление и соударение которых и явилось процессом аккреции (наращивания) планеты. Этот процесс занял не более сотни миллионов лет, т.е. был с геологической точки зрения очень быстрым.

Важнейшее отличие Земли от других планет Солнечной системы - существование на ней жизни, появившейся 3-3,5 млрд. лет назад и достигшей с появлением человека (12 млн. лет назад) своей высшей формы.

2.2. ФОРМА И РАЗМЕРЫ ЗЕМЛИ

Поверхность реальной Земли чрезвычайно сложна и во всех деталях навряд ли может быть описана с помощью математических формул. Однако эта сложность существенно уменьшается при переходе от крупномасштабного к мелкомасштабному изображению, когда особенности рельефа Земли рассматриваются для достаточно обширных территорий.

Под фигурой, или формой Земли, понимают форму ее твердого тела, образованную поверхностью материков и дном морей и океанов. Форма планеты определяется ее вращением, соотношением сил притяжения и центробежной, плотностью вещества и его распределением в теле Земли. Геодезические измерения показали, что упрощенная форма Земли приближается к ***эллипсоиду вращения (сфероиду).*** В СССР в качестве эталона в 1946 году был принят эллипсоид Ф.Н.Красовского и его учеников (А.А.Изотов, и др.), основные параметры которого подтверждаются современными исследованиями и с орбитальных станций. По этим данным экваториальный радиус равен 6378,245 км, полярный радиус 6356,863 км, полярное сжатие 1/298,25.

Поверхность реальной Земли чрезвычайно сложна и во всех деталях навряд ли может быть описана с помощью математических формул. Однако эта сложность существенно уменьшается при переходе от крупномасштабного к мелкомасштабному изображению, когда особенности рельефа Земли рассматриваются для достаточно обширных территорий.

В связи с расчлененностью рельефа (наличием высоких гор и глубоких впадин) действительная форма Земли является более сложной, чем трехосный эллипсоид. Наиболее высокая точка на Земле - гора Джомолунгма в Гималаях - достигает высоты 8848 м. Наибольшая глубина - 11 034 м - обнаружена в Марианской впадине. Таким образом, наибольшая амплитуда рельефа земной поверхности составляет немногим менее 20 км. Учитывая эти особенности, немецкий физик Листинг в 1873 г. фигуру Земли назвал геоидом, что дословно обозначает «землеподобный». **Геоид** — некоторая воображаемая уровневая поверхность, которая определяется тем, что направление силы тяжести к ней будет всегда перпендикулярно. Эта поверхность совпадает с уровнем воды в Мировом океане, который мысленно проводится под континентами. Это та поверхность, от которой проводится отсчет высот рельефа. Поверхность геоида приближается к поверхности трехосного эллипсоида, отклоняясь от него местами на величину 100-150 м (повышаясь на материках и понижаясь на океанах, что, по-видимому, связано с плотностными неоднородностями масс в Земле и появляющимися из-за этого аномалиями силы тяжести.

2.4. СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Изучение внутреннего строения Земли производится различными методами. Геологические методы, основанные на изучении естественных обнажений горных пород, разрезов шахт и рудников, керна глубоких буровых скважин, дают возможность судить о строении приповерхностной части земной коры. Глубинное внутреннее строение Земли изучается главным образом геофизическими методами: сейсмическими, гравиметрическими, магнитометрическими и др. Одним из важнейших методов является сейсмический, основанный на изучении скорости распространения упругих волн, вызванных естественными и "искусственными" землетрясениями.

На основании скорости распространения сейсмических волн австралийский сейсмолог К. Буллен разделил Землю на ряд зон, дал им буквенные обозначения в определённых усреднённых интервалах глубин, которые используются с некоторыми уточнениями до настоящего времени.

Выделяются три главные области Земли:

Земная кора (слой А) - верхняя оболочка Земли, мощность которой изменяется от 6-7 км под глубокими частями океанов до 35- 40 км под равнинными платформенными территориями континентов, до 50 - 75км под горными сооружениями (наибольшие под Гималаями и Андами).

Мантия Земли распространяется до глубин 2900км. В её пределах по сейсмическим данным выделяются: верхняя мантия - слой В глубиной до 400км и С - до 800 - 1000км (некоторые исследователи слой С называют средней мантией); нижняя мантия - слой D до глубины 2900 с переходным слоем от 2700 до 2900км.

Ядро Земли подразделяется на внешнее ядро - слой Е в пределах глубин 2900 - 4980км; переходную оболочку - слой Г - от 4980 - 5120км; и внутреннее ядро - слой G до 6971 км.

Земная кора - это верхняя каменная оболочка Земли, сложенная магматическими, метаморфическими и осадочными породами. Она представляет собой наиболее активный слой твердой Земли - сферу деятельности магматических и тектонических процессов. Нижняя граница земной коры как бы зеркально повторяет поверхность Земли. Под материками она глубоко опускается в мантию, под океанами приближается к поверхности Земли,

Мантия Земли является самым крупным элементом Земли - она занимает 83% ее объема и составляет около 66% ее массы.

Верхняя мантия характеризуется резким нарастанием скорости распространения сейсмических волн с глубиной. Выделяется два слоя: В (35-420 км), С (420-1000 км). Внутри слоя В, с глубин 80-100 км под материками и 50-70 км под океанами и до глубин 250-300 км, выделяется слой пониженной вязкости, который носит название *астеносферы.* Астеносфера выделяется по геофизическим данным как слой пониженной скорости, поперечных сейсмических волн и повышенной электропроводности. Повышенная вязкость астеносферы обусловлена, по-видимому, высокой температурой, приводящей, как полагают, к частичному выплавлению базальтовой магмы. Астеносфера играет важную роль в эндогенных процессах, протекающих в земной коре.

Земная кора вместе с твёрдой частью слоя Гутенберга образует единый жесткий слой, лежащий на астеносфере, который называется *литосферой.* По существу, литосфера является своеобразной геосферой, отделённой от остальной части мантии активным поясом астеносферы.

Земная кора и верхняя мантия, включая астеносферу, представляют собой *тектоносферу* - область Земли, где происходят тектонические явления.

3. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Под воздействием внутренних, или ***эндогеннных,*** и внешних, или ***экзогенных,*** сил земная кора испытывает постоянные изменения, которые называются ***геологическими процессами***. Соответственно различают эндогенные и экзогенные процессы.

Эндогенные процессы определяются глубинными источниками энергии. В результате на поверхности Земли образуются горные хребты и впадины, в земной коре возникают магматические очаги, происходят вулканические извержения, землетрясения. Эндогенные процессы характеризуются сложностью и большим разнообразием.

Экзогенные **процессы** развиваются на поверхности Земли за счёт энергии Солнца, и их интенсивность связана с активностью атмосферных явлений, геологической деятельностью поверхностных и подземных вод, озер, ледников, морей и океанов.

Сформировавшийся под воздействием эндогенных процессов рельеф молодых горных областей подвергается воздействию экзогенных сил, направленных на

сглаживание, выравнивание рельефа. Таким образом, эндогенные и экзогенные процессы развиваются одновременно, связанно и взаимно обусловленно.

К эндогенным процессам относятся тектонические движения, магматизм и метаморфизм.

3.2. ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ

Совокупность тектонических движений и деформаций, под воздействием которых формируются геологические структуры, называется тектоническими процессами, или *тектогенезом.* Тектонические движения – механические перемещения масс горных пород различного масштаба, сопровождающиеся изменениями их залегания и строения, а также связанными с этими изменениями деформациями (дислокациями). Тектоническим движениям принадлежит ведущая роль в развитии всех геологических процессов, так как они обусловливают перераспределение и трансформацию внутренней энергии Земли, влияют на изменение давления, интенсификацию теплопотока и т.д.

Упрощенно в зависимости от интенсивности, преимущественной направленности и геологических результатов тектонические движения можно разделить на две основные группы - *колебательные и дислокационные.*

3.3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАГМАТИЗМА

Магматизмом называют явления, связанные с образованием, изменением состава и движением магмы из недр Земли к ее поверхности. Магма представляет собой природный высокотемпературный расплав, образующийся в виде отдельных очагов в литосфере и верхней мантии, главным образом в астеносфере. Подъем магмы и прорыв ее в вышележащие горизонты происходят вследствие инверсии плотностей, при которой внутри литосферы появляются очаги менее плотного, но мобильного расплава. Магматизм - это глубинный процесс, обусловленный тепловым и гравитационными полями Земли.

В зависимости от характера движения магмы различают магматизм интрузивный и эффузивный. При ***интрузивном магматизме*** (плутонизме) магма не достигает земной поверхности, а активно внедряется во вмещающие вышележащие породы, частично расплавляя их, и застывает в трещинах и полостях коры. При ***эффузивном магматизме*** (вулканизме) магма через подводящий канал достигает поверхности Земли, где образует вулканы различных типов, и застывает на поверхности. В обоих случаях при застывании расплава образуются магматические горные породы. Температуры магматических расплавов, находящихся внутри земной коры, судя по экспериментальным данным и результатам изучения минерального состава магматических пород, находятся в пределах 700-1100°С.

Измеренные температуры магм, излившихся на поверхность, в большинстве случаев колеблются в интервале 900-1100°С, изредка достигая 1350°С. Более высокая температура наземных расплавов обусловлена тем, что в них протекают процессы окисления под воздействием атмосферного кислорода. На больших глубинах в магме в растворенном состоянии присутствуют летучие компоненты - пары воды и газов (H_2O, H_2, CO_2, HCl и др.). В условиях высоких давлений их содержание может достигать 12%. Они являются химически очень активными подвижными веществами и удерживаются в магме только благодаря высокому внешнему давлению.

3.4. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАМОРФИЗМА

Метаморфизм - преобразование горных пород под действием эндогенных процессов, вызывающих изменение физико-химических условий в земной коре. Преобразованию могут подвергаться любые горные породы: осадочные, магматические и

ранее образовавшиеся метаморфические. Изменение минерального состава при метаморфизме может протекать ***изохимически,*** т. е. без изменения химического состава метаморфизуемой породы, и ***метасоматически,*** т. е. со значительным изменением химического состава метаморфизуемой породы за счет привноса и выноса вещества. Изменение структуры и текстуры пород обычно происходит в процессе перекристаллизации вещества. Особенность метаморфических процессов заключается в том, что они протекают с сохранением твердого состояния системы.

Метаморфизм представляет собой сложное физико-химическое явление, обусловленное комплексным воздействием температуры, давления и химически активных веществ.

3.5. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Экзогенные геологические процессы в отличие от эндогенных протекают в самых верхних слоях земной коры на её границе с внешними геосферами Земли. Их энергетической основой является энергия солнечной радиации и сил гравитации. Экзогенные процессы протекают при нормальных значениях температуры и давления с поглощением тепла и направлены на дифференциацию вещества земной коры. Выделяют четыре группы (стадии) экзогенных геологических процессов: выветривание, денудацию, аккумуляцию, диагенез.

Выветривание (нем. "веттер" - погода) представляет собой процесс глубокого изменения магматических, метаморфических и осадочных горных пород и минералов, оказавшихся неустойчивыми в условиях земной поверхности. Изменение физического и химического состояния первичных минералов и горных пород происходит в месте их залегания в результате физического, химического и биологического воздействия воды, углекислого газа, различных минеральных и органических кислот, живых организмов, а также непосредственного воздействия солнечной радиации.

Денудация (лат. "денудацио" - обнажение) - это совокупность процессов удаления (сноса и переноса) продуктов выветривания с места их образования и непосредственного разрушения горных пород агентами денудации (силы гравитации, воды континентов, морей и океанов, ветер, ледники). Перемещая материал с возвышенностей в пониженные участки рельефа, денудационные процессы приводят к разрушению земной поверхности и образованию выровненных форм рельефа.

Аккумуляция (осадконакопление) - геологические процессы, в результате которых рыхлые продукты разрушения первичных горных пород накапливаются в понижениях рельефа: в речных долинах, озёрах, болотах, морях и океанах.

Диагенез (перерождение) представляет собой сложный процесс преобразования продуктов экзогенной деятельности (осадков) в осадочные горные породы под влиянием гравитационных сил и изменения физико-химических условий в приповерхностной части земной коры.

Все экзогенные геологические процессы тесно взаимосвязаны. Благодаря выветриванию происходит подготовка материала для денудации, а сами продукты выветривания, оставшиеся на месте, являются материалом для образования новых горных пород.

Основными результатами экзогенных геологических процессов являются изменения вещественного состава верхней части земной коры, дифференциация вещества по физическим и химическим свойствам, создание толщ осадочных горных пород и форм рельефа земной поверхности. Благодаря экзогенным процессам формируются почвы и полезные ископаемые. Около 60% мировой добычи полезных ископаемых связано с продуктами экзогенной деятельности.

Вместе с тем разрушения берегов рек, озёр и морей, обвалы, оползни, снежные лавины, размыв и разрушение склонов, рост оврагов и заболачивание территорий - это также результаты деятельности экзогенных геологических процессов

4. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Земную кору — верхнюю твердую оболочку Земли - слагают горные породы (магматические, осадочные и метаморфические), состоящие из определенного сочетания минералов, в состав которых входят различные химические элементы. Изучая такую иерархию: химические элементы – минералы – горные породы, можно судить о строении земной коры в различных структурных зонах.

4.1. МИНЕРАЛЫ

Подавляющие большинство химических элементов образуют в земной коре простые или сложные соединения (исключения составляют инертные газы и некоторые самородные элементы). Химические соединения, образовавшиеся в земной коре в результате природных процессов и обладающие определенными химическим составом и физическими свойствами, называются ***минералами.*** Установлено, что в земной коре содержится около 4000 минералов.

Любой минерал обладает вполне определённым химическим составом и вполне определённой кристаллической структурой, т.е. закономерным расположением в пространстве элементарных частиц (молекул, атомов, ионов). В зависимости от особенностей химического состава и кристаллической структуры минералы образуют многогранники различной формы, называемые кристаллами. Эти же характеристики минералов (химический состав и кристаллическая структура) обуславливают все физические свойства, такие, как цвет, блеск, твёрдость и т.д.

4.2. ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Горными породами называются устойчивые парагенетические ассоциации минералов, возникающие в результате определённых геологических процессов и образующие геологически самостоятельные тела в земной коре. Науки, изучающие горные породы, - петрография, литология, астрофизика и физика горных пород.

Традиционно под горными породами подразумеваются только твёрдые тела, в широком применении к горным породам относят также воду, нефть и природные газы.

Горные породы могут слагаться как одним минералом, так и их комплексом. Минералы, входящие в состав горной породы и определяющие её состав и свойства, называются ***породообразующими***

Если горные породы состоят из одного минерала (кварцит, известняк, каменная соль), они называются ***мономинеральными,*** если же из нескольких -***полиминеральными*** (гравий, глина).

Все горные породы обладают комплексом морфологических особенностей, которые объединяют в понятия структура и текстура. Наряду с химическим и минеральным составом структура и текстура являются важнейшими диагностическими признаками горных пород.

По происхождению горные породы делятся на три класса: осадочные, магматические и метаморфические.

Осадочные горные породы образуются только на поверхности земной коры при разрушении любых, ранее существовавших горных пород, в результате жизнедеятельности и отмирания организмов и выпадения осадков из пересыщенных растворов.

Магматические горные породы возникают путём кристаллизации природных силикатных расплавов внутри земной коры или на её поверхности.

Метаморфические горные породы возникают путем коренного преобразования магматических, осадочных и ранее существовавших метаморфических пород под влиянием высоких температур, давления и химически активных растворов.

5. СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Строение земной коры рассматривается отдельно по той причине, что эта геосфера является основным объектом геологии и средой горного производства.

Земная кора - это верхняя каменная оболочка Земли, сложенная магматическими, метаморфическими и осадочными породами и имеющая мощностьот 7 до 75 км. Она представляет собой наиболее активный слой твёрдой Земли - сферу деятельности магматических и тектонических процессов. Нижняя граница земной коры как бы зеркально повторяет поверхность Земли. Под материками она глубоко опускается в мантию, под океанами приближается к поверхности Земли.

Выделяют два главных типа земной коры: континентальную и океаническую.

Мощность ***континентальной*** коры в зависимости от тектонических условий меняется в среднем от 25-45. (на платформах) до 45-75 км (в областях горообразования), однако в пределах каждой геоструктурной области она не остаётся строго постоянной. В континентальной коре различают осадочный, гранитный и базальтовый слои.

Мощность осадочного слоя достигает 20 км, но распространён он не повсеместно. Названия гранитного и базальтового слоев условны и исторически связаны с выделением разделяющей их границы Конрада, хотя последующие исследования показали некоторую сомнительность этой границы.

Основное отличие ***океанической*** коры от континентальной - отсутствие гранитного слоя, существенно меньшая мощность (2-10 км), более молодой возраст (юра, мел, кайнозой), большая латеральная однородность. Океаническая кора состоит из трёх слоев. Первый слой, или осадочный, характеризуется широким диапазоном скоростей и мощностью до 2 км. Второй слой, или акустический фундамент, имеет среднюю мощность 1,2-1,8 км. Глубоководным бурением установлено, что этот слой сложен сильно трещиноватыми и брекчированными базальтами, которые с увеличением возраста океанической коры становятся более консолидированными. Третий слой сложен породами в основном габброидного состава.

Кроме двух главных типов земной коры выделяется кора переходного типа - субконтинентальная в островных дугах и субокеаническая на континентальных окраинах.

Участки земной коры, различающиеся типом геологического строения, называются ***структурными элементами.*** *С* точки зрения закономерностей пространственного строения земной коры океаны и континенты - это ***структуры*** **I** (планетарного) порядка. В пределах структурных элементов I порядка по особенностям геологического строения и развития выделяются структуры П порядка: на материках - платформы и геосинклинальные пояса, на океанической коре - талассократоны и срединно - океанические хребты.

6. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ. ОСНОВЫ ИСТОРИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ

Геология - наука естественно-историческая, и поэтому особо важное значение имеет ее раздел, посвященный изучению развития геологических событий по времени. Задачи исторической геологии - восстановление физико-географических обстановок накопления осадков в различные эпохи, последовательности формирования пород и их

распределения по относительному возрасту, изучение истории развития органического мира от древнейших эпох до настоящего времени.

6.1. ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ И СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ШКАЛЫ

В геологии как в никакой другой науке важна последовательность установления событий, их хронологии, основанной на естественной периодизации геологической истории. Геологическая хронология, или геохронология, основана на выяснении геологической истории наиболее хорошо изученных регионов. На основе широких обобщений, сопоставления геологической истории различных регионов Земли, закономерностей эволюции органического мира в конце прошлого века на первых международных геологических конгрессах была выработана и принята Международная геохронологическая шкала, отражающая последовательность подразделений времени, в течение которых формировались определённые комплексы отложений, и эволюцию органического мира. Таким образом, Международная геохронологическая шкала - это естественная периодизация истории Земли.

Среди геохронологических подразделений выделяются: зон, эра, период, эпоха, век, время. Каждому геохронологическому подразделению отвечает комплекс отложений, выделенный в соответствии с изменением органического мира и называемый стратиграфическим: эонотема, группа, система, отдел, ярус, зона. Таким образом существует две шкалы - геохронологическая и стратиграфическая. Первую мы используем, когда говорим об относительном времени в истории Земли, а вторую, когда имеем дело с отложениями. В настоящее время выделяют три наиболее крупных стратиграфических подразделения - эонотемы: архейскую, протерозойскую и фанерозойскую.

6.2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Представления о закономерностях формирования земной коры развивались на протяжении длительного времени по мере накопления фактического материала, совершенствования геологических и геофизических методов исследований. Особое значение на современном этапе развития теоретической геологии имеют данные, полученные при изучении обширных океанических территорий, и результаты космических исследований.

Гипотезы горизонтального дрейфа континентов

Механизм горизонтального перемещения континентальных глыб был разработан в 1929г. американским учёным А.Холмсом. Его гипотеза подкоровых течений предполагает существование в мантии (субстрате) медленных конвективных потоков, обусловленных различным накоплением тепла под континентами и океанами. Восходящие конвективные потоки приводят к разрыву коры, раздвиганию блоков и образованию молодого океанического дна. В районах нисходящих потоков, наоборот, блоки сталкиваются, сминаются, образуя системы надвигов, шарьяжей, а глубинные слои коры даже вовлекаются в мантию, переходя в глубинные аналоги базальтов - эклогиты.

Можно отметить, что с разработкой гипотезы А.Холмса идеи мобилизма получили новый импульс, обусловивший их широкую популярность и в наши дни. Кроме того, в последние годы при изучении строения дна океанов получены новые данные, которые также используются для подтверждения возможности горизонтального дрейфа. Эти данные послужили основой гипотезы новой глобальной тектоники, или тектоники плит. Гипотеза разработана американскими учёными Г.Хессом и Р.Дицем. Значительный вклад в её развитие внесли зарубежные и советские геологи.

Основные идеи, положенные в основу гипотезы тектоники плит, связаны с открытием зон формирования молодой океанической коры в зонах рифтообразования и зон поглощения коры у глубоководных желобов.

По мнению авторов гипотезы, в зонах рифтообразования происходит "раздвигание" плит литосферы с образованием молодой океанической коры в центральной рифтовой зоне. Это явление называется ***спрединг*** океанического дна, характеризуется прерывистостью, сопровождается внедрениями мантийного вещества из астеносферы и разрывами маломощных базальтов в рифтовой зоне. С этой активной зоной связаны проявления вулканизма, неглубокие зоны землетрясений и аномалии теплового потока.

Образование новой коры в зонах спрединга сопровождается поглощением блоков (плит) литосферы в других участках нашей планеты. По мнению авторов гипотезы, такими участками являются зоны глубоководных океанических желобов, в которых происходит прерывистое поддвигание одной плиты литосферы под другую. Это явление называется ***субдукцией,*** сопровождается кратковременным выделением значительной механической энергии в виде землетрясений, проявлений вулканизма. Длительное поддвигание океанической коры под континентальную приводит к деформации окраинного моря, смещению островной дуги к континенту и складкообразованию. При этом поддвигание может смениться развитием обширных надвигов океанической коры - ***обдукцией***. Другим путём образования орогенных зон, по мнению авторов гипотезы, является столкновение - ***коллизия*** континентов.

Движущие силы механизма перемещения блоков литосферы авторы гипотезы тектоники плит связывают с конвективным перемешиванием мантийного вещества, что близко к взглядам А.Холмса. Однако в отличие от положений гипотезы подкоровых течений, в соответствии с рассматриваемой гипотезой потоки мантийного вещества здесь замыкаются на уровне астеносферы.

Таким образом, в соответствии с гипотезой тектоники плит под действием потоков мантийного вещества происходят глобальные перемещения континентов, но не изолированно, как считал А.Вегенер, а в составе мощных плит литосферы. При таком горизонтальном перемещении плит в зонах спрединга происходит обновление коры, а в зонах субдукции - её поглощение и растворение в астеносфере.

По современным данным, литосфера состоит из семи крупных плит, ограниченных зонами спрединга, субдукции или смятия: Тихоокеанской, Евразиатской, Индийской, Африканской, Антарктической, Северо-Американской и Южно-Американской.

7. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

7.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Важнейший раздел геологии, позволяющий решать обширные прикладные задачи, - учение о полезных ископаемых. Он включает в себя совокупность сведений о геологической позиции и закономерностях размещения месторождений различных полезных ископаемых, методику поисков и экономику минерального сырья, тесно соприкасается с технологий переработки руд и извлечения из них ценных компонентов.

Полезным ископаемым называют природное минеральное образование, которое используется в народном хозяйстве в естественном виде или после предварительной обработки (переработки) путем дробления, сортировки, обогащения для извлечения ценных металлов или минералов. По физическому состоянию полезные ископаемые бывают газообразными, жидкими и твердыми. К первым относятся горючие газы углеводородного состава и негорючие инертные газы, ко вторым - нефть, рассолы, вода, к третьим - большинство полезных ископаемых, которые применяются как

химические элементы или их соединения, а также в виде кристаллов, минералов, горных пород. По промышленному использованию полезные ископаемые разделяются на ***металлические, неметаллические, горючие или каустобиолиты, гидро-и газоминеральные.***

Металлические полезные ископаемые служат для извлечения из них металлов и элементов: черных (железо, титан, хром, марганец и др.); легирующих (никель, кобальт, вольфрам, молибден и др.); цветных (алюминий, свинец, цинк, сурьма, ртуть и др.); благородных (золото, серебро, платина, палладий и др.); радиоактивных (уран, радий, торий и др.); редких и рассеянных (висмут, цирконий, ниобий, тантал, галлий, германий, кадмий, индий и др.); редкоземельных (лантан, церий, иттрий, прометий, самарий, лютеций и др.).

К *неметаллическим* полезным ископаемым принадлежат строительные горные породы (естественные строительные камни, пески, глины, сырье для каменного литья, стекол и керамики и др.), индустриальное (алмаз, графит, асбест, слюды, драгоценные и поделочные камни, пьезокристаллы, оптические минералы и др.), а также химическое и агрономическое сырье (сера, флюорит, барит, галит, калийные соли, апатит, фосфориты и др.).

Горючие ископаемые включают торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, горючие сланцы, озокерит, нефть, горючий газ. Они служат энергетическим и металлургическим топливом, а также сырьем для химической промышленности.

К ***газоминеральному*** сырью относятся негорючие инертные газы: гелий, неон, аргон, криптон и др.

Гидроминеральные полезные ископаемые разделяются на подземные воды питьевые, технические, бальнеологические или минеральные и нефтяные, содержащие ценные элементы (бром, йод, бор, радий и др.) в количестве, позволяющем извлекать их, а также рассолы (озерные рассолы, минеральные грязи, илы). Важным гидроминеральным сырьем являются воды морей и океанов, используемые для получения пресной воды и извлечения многих ценных элементов.

Рудой называется минеральное сырье, содержащее ценные полезные компоненты (металлы, их соединения, минералы) в количестве, достаточном для промышленного извлечения при современном состоянии экономики, техники и технологии. В зависимости от вида извлекаемого компонента выделяются руды металлические (железные, медные, свинцово-цинковые и т. д.) и неметаллические (серные, асбестовые, графитные, апатитовые и др.). По количеству компонентов руды различают монометалльные (мономинеральные), биметалльные (биминеральные) и полиметалльные (полиминеральные).

Месторождением **полезного ископаемого** называется его природное в виде геологических тел скопление в земной коре, которое по условиям залегания, количеству и качеству минерального сырья при данном состоянии экономики и техники может служить объектом промышленной разработки в настоящее время или в ближайшем будущем. К месторождениям полезных ископаемых промышленность предъявляет требования, определяемые технической возможностью и экономической целесообразностью их разработки.

Совокупность требований промышленности к минеральному сырью называется ***кондициями*** - они не являются постоянными и зависят от экономических условий и состояния техники и технологии добычи и переработки минерального сырья.

Площади распространения полезных ископаемых в порядке их уменьшения разделяются на провинции, области (пояса, бассейны), районы (узлы), поля, месторождения, тела.

Телом полезного ископаемого называют ограниченное со всех сторон скопление минерального вещества, которое приурочено к отдельным структурным элементам или их комбинациям.

7.2. ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Являясь природными минеральными образованиями, все полезные ископаемые обладают определенным вещественным (минеральным и химическим) составом, строением или структурно-текстурными особенностями, а также некоторым комплексом физических, физико-химических и технологических свойств. Все эти характеристики в общем случае обусловливают качество полезных ископаемых, которое имеет важнейшее значение для оценки месторождений с целью их промышленного использования.

Вещественный состав металлических и неметаллических руд определяется соотношением рудных, или ценных, и сопутствующих им нерудных, или жильных, минералов. В металлических рудах рудные минералы являются носителями ценных металлов, в неметаллических - минералы сами представляют практический интерес благодаря специфическим свойствам.

По составу преобладающей части минералов выделяются следующие типы руд:

самородные - самородные металлы и интерметаллические соединения - медь, золото, платина и др.;

сернистые **и им** подобные - сульфиды, арсениды и антимониды тяжелых металлов - меди, цинка, свинца, никеля, кобальта, молибдена и др.;

оксидные - оксиды и гидроксиды железа, марганца, хрома, олова, урана, алюминия и др.;

карбонатные - карбонаты железа, марганца, магния, свинца, цинка, меди и др.;

сульфатные - сульфаты бария, стронция, кальция и др.;

фосфатные - *апатитовые и фосфоритовые неметаллические руды, а также фосфаты некоторых металлов и др.;*

силикатные - *сравнительно редкие руды железа, марганца, меди; широко распространенные неметаллические полезные ископаемые - слюды, асбест, тальк и др.;*

галоидные - *минеральные соли и флюорит и др.*

По вещественному составу, определяющему промышленную ценность и технологические свойства, полезные ископаемые разделяются на природные типы и промышленные сорта.

7.3. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В настоящее время известно несколько десятков генетических классификаций месторождений полезных ископаемых. Наиболее известной является классификация В.И.Смирнова.

Эндогенные месторождения, к числу которых относятся скопления полезных ископаемых, прямо или косвенно связанные с магматической деятельностью, подразделяют на: собственно магматические, пегматитовые и постмагматические.

Магматическими называются месторождения, образующиеся из жидких магматических расплавов в процессе их внедрения и раскристаллизации. При подъеме магматических расплавов в верхние горизонты земной коры и остывании происходит их дифференциация, с чем связана концентрация, а иногда и полное обособление рудных компонентов. Процессы образования магматических месторождений достаточно сложны. В одних случаях месторождения образуются в результате внедрения магмы, обогащенной рудными компонентами еще на глубине, в других - рудные концентрации возникают из магм при ее подъеме, в третьих - лишь на месте становления интрузива.

Главная особенность всех магматических месторождений - их связь с материнскими интрузивами, которые рассматриваются как вещественный или

энергетический источник оруденения. Магматические месторождения разделяются на генетические подгруппы: ликвационные, раннемагматические и позднемагматические.

В группу ***экзогенных*** включаются скопления полезных ископаемых, которые образуются при экзогенных процессах в результате химической, биохимической и механической дифференциации вещества земной коры. По способу накопления осадочного материала различают месторождения выветривания и осадочные.

К ***месторождениям выветривания*** относятся остаточные и инфильтрационные месторождения. ***Остаточные*** месторождения полезных ископаемых образуются при физическом и химическом выветривании горных пород, которое сопровождается гидролизом породообразующих минералов, растворением и выносом неустойчивых компонентов.

К **осадочным месторождениям** относятся аллювиальные и прибрежно-морские россыпи, химические и биохимические осадочные месторождения.

Метаморфизованными называют месторождения любого происхождения, испытавшие метаморфические преобразования одновременно с вмещающими породами. При этом процессы метаморфизма могут выражаться в изменении и преобразовании структур и текстур, изменении характера минерального состава руд, а также в переотложении рудного вещества, изменении формы рудных тел, рассланцевании и изменении состава вмещающих пород.

Под ***метаморфическими*** месторождениями понимают такие месторождения, которые возникли в результате метаморфизма горных пород, до того не содержащих промышленных рудных скоплений и не представляющих собой полезного ископаемого. К возникающим в процессе метаморфизма собственно метаморфическим месторождениям относятся месторождения высокоглиноземистого сырья (кианит, андалузит, силлиманит), графита, гранулированного кварца, слюды, амфибол-асбеста, корунда, наждака, граната, титана и др.

8. СИСТЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

Геологическое изучение недр в России производится последовательно и планомерно с тем, чтобы не только получить необходимую геологическую информацию о недрах, но и своевременно выявить промышленные и отбраковать непромышленные скопления полезных ископаемых. В общей системе геологического изучения недр можно выделить три крупных этапа. Этапы геологического изучения включают несколько последовательных стадий.

Этап I. Работы общегеологического и минерагенического назначения.

Стадия 1. Региональное геологическое изучение недр прогнозирование полезных ископаемых.

Этап II. Поиски и оценка месторождений.

Стадия 2. Поисковые работы.

Стадия 3.Оценочные работы.

Этап III. Разведка и освоение месторождений.

Стадия 4. Разведка месторождения.

Стадия 5. Эксплуатационная разведка.

На каждой стадии геологического изучения недр осуществляется их геолого-промышленная оценка, заключающаяся в определении действительной или возможной значимости изучаемого участка земной коры, в котором содержатся или могут содержаться скопления полезной минерализации или же предполагается горное строительство. С этой целью исследуются состав и строение горных пород и полезного ископаемого, условия залегания, степень и характер тектонической нарушенности,

гидрогеологические и инженерно-геологические характеристики месторождения, географо-экономические условия района и т. п.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Для более углубленного изучения отдельных разделов геологических дисциплин рекомендуем воспользоваться следующими методическими указаниями.

Часть 1. Минералы.

Часть 2. Магматические горные породы.

Часть 3. Метаморфические горные породы.

Часть 4. Осадочные горные породы.

Часть 5. Организация геологических экскурсий.

Часть 6. Художественная обработка камнесамоцветного сырья.

МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ
СТУДЕНТОВ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ГЕОЛОГИЯ»
ДЛЯ СТУДЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
«ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОЛОГИЧСКОЙ РАЗВЕДКИ»**

Авторы: Огородников В. Н., д.г-м.н., доцент; Поленов Ю. А., д.г-м.н., доцент

Екатеринбург
2019

Лабораторные занятия по курсу «Геология» представляют важную часть в общем цикле геологических дисциплин. Эти занятия дают студентам возможность познакомиться с главнейшими породообразующими минералами и наиболее распространенными горными породами, а также получить навыки работы с горным компасом.

Выполнение лабораторных работ производится в три этапа. В начале студенты знакомятся с основными породообразующими минералами и учатся распознавать их в составе горных пород. На втором этапе студенты получают навыки определения и описания магматических, метаморфических и осадочных горных пород. В завершение занятий студенты знакомятся с устройством горного компаса и получают представление о работе с ним.

Объем аудиторных лабораторных занятий не достаточен для получения навыков по определению горных пород и минералов, поэтому студенты обязаны самостоятельно заниматься с коллекциями на кафедре в пределах часов, предусмотренных рабочими программами дисциплин.

В целях удобства работы на занятиях методические материалы скомпонованы в четыре самостоятельные брошюры:

Часть 1. Минералы

Часть 2. Магматические горные породы

Часть 3. Метаморфические горные породы

Часть 4. Осадочные горные породы

Часть 1

МИНЕРАЛЫ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИНЕРАЛАХ

Подавляющее большинство химических элементов образуют в земной коре простые или сложные соединения (исключения составляют инертные газы и некоторые самородные элементы).

Минералы – химические соединения, образовавшиеся в земной коре в результате природных геологических процессов и обладающие определенными химическим составом и физическими свойствами.

Каждый минерал обладает вполне определенным химическим составом и вполне определенной кристаллической структурой, т. е. закономерным расположением в пространстве элементарных частиц (атомов, ионов). Например, минерал галит (каменная соль) состоит из 39,4 % Na и 50,6 % Cl и имеет химическую формулу NaCl. Кристаллическая структура галита характеризуется поочередным расположением ионов Na^+ и Cl в углах кубов (рис. 1), где каждый ион хлора окружен шестью ионами натрия, и наоборот.

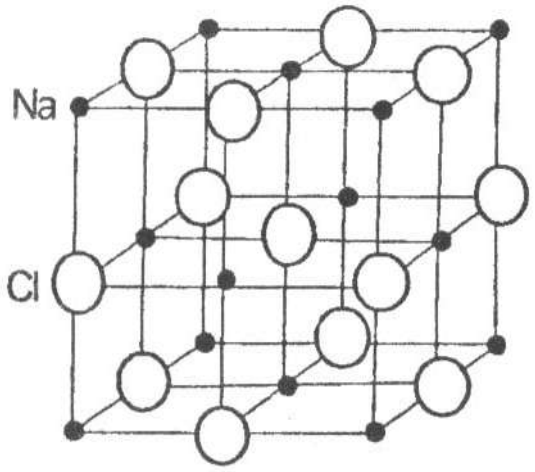


Рис. 1. Кристаллическая структура галита (NaCl)

В зависимости от особенностей химического состава и кристаллической структуры минералы образуют многогранники различной формы, называемые кристаллами. Эти же характеристики минералов (химический состав и кристаллическая структура) обусловливают их физические свойства. Иногда минералы имеют неупорядоченные строения, когда атомы и ионы располагаются беспорядочно, хаотично. Минералы с таким строением называют аморфными.

Образование минералов является результатом различных геологических процессов. По способу образования (источнику энергии) минералы могут быть объединены в две группы.

1. Минералы эндогенного генезиса, образующиеся за счет внутренней энергии Земли. Возникают в результате кристаллизации магмы и связанных с ней горячих газовых и водных растворов (гидротерм) на различных глубинах, а также путем преобразования минералов в условиях больших давлений и температур.

2. Минералы экзогенного генезиса, образующиеся за счет внешней (солнечной) энергии. Источником минералообразования являются разнообразные горные породы, вступающие во взаимодействие с атмосферой, гидросферой и биотой, давая начало новым минералам.

Пути и способы образования минералов разнообразны. Они могут быть следствием: 1) кристаллизации огненно-жидкого силикатного расплава (магмы); 2) кристаллизации из горячих минерализованных растворов (гидротерм); 3) отложения

кристаллического вещества из газообразных продуктов возгонов; 4) перекристаллизации минералов и горных пород; 5) образования новых минералов за счет разрушения ранее созданных.

1.1. Формы нахождения минералов

В природе минералы встречаются в виде отдельных хорошо образованных кристаллов либо в виде скоплений неправильной формы зерен (агрегатов).

1.1.1. Облик кристаллов

Среди минералов выделяют три группы, обладающие характерным обликом, или габитусом, кристаллов.

Изометричные – формы, имеющие близкие размеры во всех направлениях. Примером могут служить кубы пирита, галенита, октаэдры магнетита, ромбоэдры кальцита и др. (рис. 2).

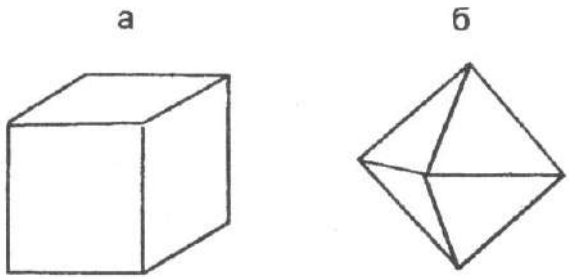


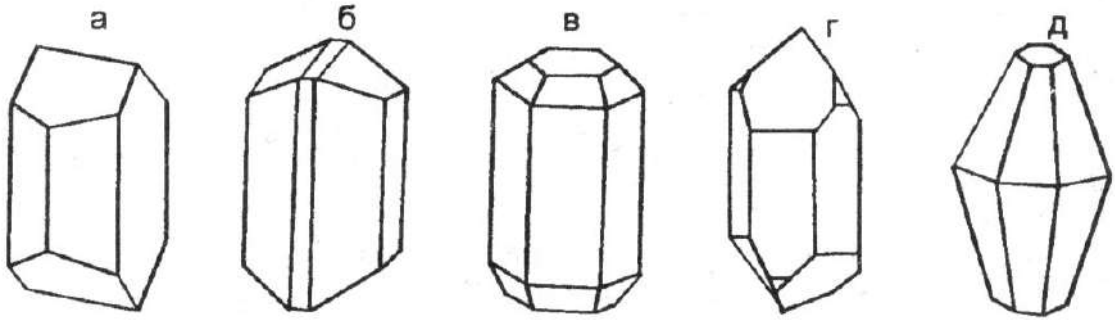
Рис. 2. Изометричные формы кристаллов:
а – кубический кристалл пирита;
б – октаэдрический кристалл магнетита

Уплощенные - формы, хорошо развитые преимущественно в двух направлениях. Сюда относятся таблитчатые, пластинчатые, листоватые и чешуйчатые кристаллы слюды, хлорита, графита и т. д. (рис. 3).

Рис. 3. Уплощенные формы кристаллов:
а – таблитчатый кристалл гематита;
b– пластинчатый кристалл мусковита

Удлиненные - формы, развитые в одном направлении. К этой группе относятся призматические, столбчатые, шестоватые, игольчатые и волокнистые кристаллы роговой обманки, пироксена, кварца и т. д. (рис. 4).

Рис. 4. Удлиненные формы кристаллов:



а – полевого шпата; б – роговой обманки; в – апатита; г – кварца; д - корунда

1.1.2. Минеральные агрегаты

В природе чаще встречаются не единичные кристаллы минералов, а скопления или срастания различной формы зерен. Эти скопления называют минеральными агрегатами.

Агрегаты бывают мономинеральными (моно - один), т. е. состоящими из зерен одного минерала, и полиминеральными (поли - много), сложенными несколькими различными минералами. Выделяют несколько видов минеральных агрегатов.

Зернистые агрегаты обладают наибольшим распространением в земной коре. В зависимости от формы слагающих зерен различают собственно зернистые (состоящие из изометричных зерен), а также пластинчатые, листоватые, чешуйчатые, волокнистые, игольчатые, шестоватые и другие агрегаты. По величине зерен можно выделять агрегаты крупнозернистые, более 5 мм в поперечнике, среднезернистые - от 1 до 5 мм и мелкозернистые - с зернами менее 1 мм.

Землистые агрегаты - порошкообразные, рыхлые мягкие минеральные массы скрытокристаллического строения, обычно пачкают руки, легко распадаются на мелкие комочки.

Сажистые - (черные цвета) или охристые (желтого, бурого и других ярких цветов). Образуются в процессе химического выветривания. Примером являются минерал каолинит и марганцевые руды.

Натечные формы выделений минералов образуются на стенках пустот при медленном испарении или охлаждении поступающих туда растворов. Эти образования имеют разнообразную форму: почковидную, гроздевидную, неправильную, цилиндрическую. Натеки, свисающие в виде сосулек со сводов пустот, называются сталактитами, а поднимающиеся им навстречу со дна пустот - сталагмитами. Характерным примером натечных образований являются: лимонит, малахит, кальцит.

Друзы - это сростки более или менее хорошо ограненных кристаллов на стенках каких-либо пустот. Примером могут служить довольно часто встречающиеся друзы кристаллов кварца или пирита.

Реже встречаются другие виды минеральных агрегатов: *секреции* -выполнение пустот изометричной, часто округлой формы, отличающиеся концентрически-зональным строением. Мелкие секреции в излившихся эффузивах называют миндалинами, крупные – жеодами; *конкреции* — шарообразные или неправильной формы стяжения и желваки, образующиеся в рыхлых осадочных породах (илах, глинах, песках и др.); *оолиты* - (от греч.-яйцо) - мелкие стяжения сферической формы размером от долей миллиметра до нескольких миллиметров, образующиеся путем наслоения коллоидального материала на песчинки в подвижной водной среде.

1.2. Физические свойства минералов

Минералы отличаются друг от друга по многим внешним признакам: цвету, блеску, твердости, форме и другим свойствам. Все физические свойства находятся в прямой зависимости от химического состава и кристаллической структуры, поэтому каждый из минералов характеризуется своим набором физических свойств, позволяющим проводить их диагностику (определение).

1.2.1. Оптические свойства

Цвет

У минералов различают идиохроматическую, аллохроматическую и псевдохроматическую окраски.

Идиохроматическая (от греч. «идиос» - свой, собственный и «хрома» - цвет) окраска обусловлена внутренними свойствами минерала, особенностями строения кристаллической решетки. Такую окраску имеют латунно-желтый пирит, черный магнетит, свинцово-серый галенит и др.

Аллохроматическая (от греч. «аллос» - посторонний) окраска связана с присутствием в минералах либо элементов-хромофоров (красителей), либо тонкорассеянных механических примесей. Например, очень сильным элементом-красителем является хром. Даже незначительная примесь Cr_2O_3 (0,1 %) окрашивает бесцветный минерал корунд в ярко-красный цвет, прозрачная разновидность которого называется рубином.

Наличие тонкорассеянных механических примесей оксидов и гидрооксидов железа в бесцветных минералах окрашивает последние во всю гамму красно-желтых тонов. Тонкорассеянное органическое вещество дает серые, черные цвета и т. д. Примером окраски такого рода может служить цвет галита. Чистые минералы галита прозрачны и бесцветны или имеют белый цвет. Но часто те или иные красящие пигменты обусловливают окраску различных цветов: серый (обычно глинистые частицы), желтый (*гидроксиды* железа), красный (*оксиды* железа), бурый и черный (органические вещества).

Природа окрашивания некоторых минералов кроется в нарушении однородности строения их кристаллических решеток, в возникновении в них различных дефектов (черный кварц, аметист и др.).

Псевдохроматическая (от греч. «псевдос» - ложный) окраска не имеет ничего общего с природой самого минерала. Некоторые минералы меняют окраску в зависимости от освещения. Например, на полированной поверхности минерала лабрадорита при некоторых углах поворота освещения появляются густые синие и зеленовато-синие переливы, вызванные интерференцией световых лучей, отраженных от плоскостей спайности лабрадорита. Такое явление называется иризацией.

Иногда минералы бывают покрыты тонкой поверхностной пленкой другого минерала, которая обычно имеет радужную окраску, напоминающую окраску тонких пленок нефти на поверхности воды. Подобные пленки на минералах называют побежалостью.

При определении окраски минерала обычно широко применяется метод сравнения с окраской хорошо известных предметов или веществ: яблочно-зеленый, лазурно-синий, шоколадно-коричневый и т. п. Эталонами считаются названия цветов следующих минералов: фиолетовый у аметиста, зеленый у малахита, красный у киновари, бурый у лимонита, свинцово-серый у галенита, железо-черный у магнетита, латунно-желтый у пирита, металлически-золотистый у золота.

Прозрачность - способность минерала пропускать свет. В зависимости от этой способности все минералы делятся: на прозрачные - горный хрусталь, топаз, исландский шпат и др.; полупрозрачные - флюорит, сильвин и др.; непрозрачные - пирит, магнетит и др.

Цвет черты

Это цвет тонкого порошка минерала, который легко получить, если провести испытуемым минералом черту на матовой (неглазурованной) поверхности фарфоровой пластики, называемой бисквитом. Цвет черты является более надежным признаком по сравнению с окраской минералов. В ряде случаев он соответствует цвету минерала (серая черта у серого галенита), но иногда цвет черты резко отличается от цвета минерала (латунно-желтый пирит оставляет черную черту). Для некоторых минералов этот признак является диагностическим. Например, очень похожие друг на друга минералы группы железа легко распознаются по цвету черты: магнетит имеет черную черту, гематит – вишневую, лимонит – желто-бурую.

Цвет черты определяется только у минералов с металлическим блеском, потому что другие минералы имеют белую или светлоокрашенную черту.

Блеск

Блеск – способность минералов отражать от своей поверхности световой поток. Установлено, что блеск зависит от показателя преломления минерала, т. е. величины, характеризующей разницу в скорости света при переходе из воздушной в кристаллическую среду. Минералы с показателем преломления 1,3-1,9 имеют *стеклянный* блеск, с 1,9-2,6 — *алмазный* блеск. *Полуметаллический* блеск отвечает минералам с показателем преломления 2,6-3,0 и *металлический* – выше 3,0. Металлический блеск отвечает отражению полированной поверхности металла. Такой блеск характерен для непрозрачных минералов. Примером могут служить минералы пирит, галенит, халькопирит. Полуметаллический блеск напоминает блеск потускневшего металла. Он характерен для гематита, графита и др. Наиболее широко распространен стеклянный блеск, на его долю приходится около 70 % минералов. Стеклянным блеском обладают горный хрусталь, кальцит, корунд, флюорит, амфиболы, пироксены, полевые шпаты и другие минералы.

Более сильным, чем стеклянный, является алмазный блеск, характерный, например, для алмаза, серы.

Блеск минерала зависит также от характера его поверхности. Если поверхность неровная, то отраженный свет несколько рассеивается, преобразуя стеклянный и алмазный блески в так называемый жирный. Порошковатые рыхлые минералы, обладающие тонкой пористостью, имеют матовый блеск, так как микроскопические поры являются своего рода «ловушками» для света. Примерами могут служить каолинит, землистые массы лимонита и др.

У минералов с параллельно-волокнистым строением наблюдается типичный шелковистый блеск (асбест), полупрозрачные «слоистые» и пластинчатые минералы имеют перламутровый отлив.

1.2.2. Механические свойства

Спайность и излом

Спайностью называют свойство минералов раскалываться по определенным направлениям, обусловленным строением их кристаллических решеток, образуя при этом ровные площади – плоскости спайности. Это свойство минералов связано исключительно с внутренним их строением и не зависит от внешней формы кристаллов. Например, при раскалывании кристаллов кальцита самой разнообразной формы получается спайный выколок всегда одной и той же формы – ромбоэдр, кристаллов флюорита – октаэдр, галенита и галита – куб.

По степени совершенства различают следующие виды спайности: *весьма совершенная* - минералы легко расщепляются на тонкие листочки, чешуйки (мусковит, биотит, хлорит, тальк, графит); *совершенная* — минералы при ударе раскалываются на обломки, со всех сторон ограниченные тремя и более плоскостями спайности (кальцит, флюорит, галенит, галит); *средняя* – минералы раскалываются на обломки, ограниченные двумя плоскостями спайности и неровными поверхностями по случайным направлениям (полевые шпаты, роговая обманка, пироксен); несовершенная – минералы раскалываются на обломки, ограниченные неровными поверхностями и одной плоскостью спайности (корунд, апатит); весьма несовершенная или отсутствует – минералы раскалываются только по случайным направлениям с неровными поверхностями (кварц, магнетит, пирит).

Чтобы не спутать грани кристаллов с плоскостями спайности необходимо помнить, что направление спайности дает систему взаимопараллельных плоскостей или трещин. При определении спайности в агрегате выбирается одно или несколько наиболее крупных зерен и в них наблюдаются плоскости спайности. Если угол спайности, например, равен 90 градусам, то излом *ступенчатый*, а если угол спайности острый – излом *занозистый.*

Неровные поверхности, получаемые при расколе минерала по случайным направлениям, называют *изломом.* Наиболее распространен *неровный* излом, но иногда наблюдаются и другие виды: *гладкий, раковистый* – излом характерен для минералов с

весьма несовершенной спайностью, напоминает поверхность раковины с концентрической скульптурой (кварц, пирит); *ступенчатый, занозистый* – излом характерен для игольчатых или волокнистых минералов (селенит). Излом, как и спайность, определяется внутренним строением минерала, его кристаллической решеткой.

Твердость, хрупкость, ковкость, упругость

Под твердостью минерала подразумевается степень его сопротивления внешним механическим воздействиям. В минералогической практике применяют наиболее простой способ определения твердости - царапанье одного минерала другим, т. е. устанавливается относительная твердость минерала. Для оценки относительной твердости немецким минералогом Ф. Моосом была предложена шкала, состоящая из десяти минералов, каждый из которых, обладая более высокой твердостью, своим острым концом царапает все предыдущие с меньшими номерами. Твердость минералов-эталонов в шкале условно обозначена целыми числами.

Шкала Мооса представлена следующими минералами:

Тальк	$Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	1
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2
Кальцит	$CaCO_3$	3
Флюорит	CaF_2	4
Апатит	$Ca_5[P0_4]_3(F,C1)$	5
Ортоклаз	$K[A1Si_30_8]$	6
Кварц	SiO_2	7
Топаз	$A1_2[SiO_4]F_2$	8
Корунд	$A1_20_3$	9
Алмаз	C	10

Для определения твердости исследуемого минерала устанавливают, какой эталон с максимальным номером он царапает. Например, если испытуемый минерал царапает апатит, но оставляет порошок, т. е. истирается на ортоклазе, значит его твердость выше 5, но ниже 6 и оценивается в 5.5.

Относительную твердость можно определить, не имея шкалы Мооса, используя некоторые заменители. Так, твердость ногтя – 2,5; медной монеты – 3,0-3,5; оконного стекла – 5,0; стального ножа – 6,0; напильника – 7,0. Твердость порошковатых разностей бывает занижена по сравнению с твердостью этого минерала в крупных зернах.

Под хрупкостью понимают свойство минерала крошиться при проведении по нему черты ножом. Противоположный эффект – гладкий блестящий след – свидетельствует о свойстве минерала деформироваться пластически. Ковкие минералы расплющиваются под ударом молотка в тонкую пластинку, упругие – способны восстанавливать форму после снятия нагрузки (слюды, асбест).

1.2.3. Прочие свойства

Удельный вес

Удельный вес может быть точно замерен только в лабораторных условиях различными методами; приблизительное суждение об удельном весе можно получить путем сопоставления с распространенными минералами, удельный вес которых принимается за эталон. Все минералы по удельному весу можно разделить на три группы:

легкие - с удельным весом меньше 3 г/см^3 (галит, гипс, кварц и др.); *средние* - с удельным весом порядка 3-5 г/см^3 (апатит, корунд, пирит и др.); *тяжелые* - с удельным весом больше 5 г/см^3 (галенит, золото и др.).

1.2.4. Специфические свойства

Некоторые минералы обладают особыми, характерными только для них свойствами, когда нет необходимости определять их в других индивидах.

Магнитность. Сравнительно небольшое число минералов обладает свойством воздействовать на магнитную стрелку. Для минералов, обладающих магнитностью, это свойства имеет важное диагностическое значение. Минералы, обладающие ярко выраженными ферромагнитными свойствами, могут притягивать даже мелкие железные предметы - опилки, булавки (магнетит). Менее магнитные минералы (парамагнитные) слабо притягиваются магнитом (пирротин), и, наконец, имеются минералы, которые отталкивают магнитную стрелку, - самородный висмут.

Реакция с соляной кислотой. С соляной кислотой взаимодействуют минералы из класса карбонатов:

- кальцит $CaCO_3$ - бурно реагирует, "вскипая" в кислоте;
- доломит $CaMg(CO_3)_2$ - «вскипает» только в порошке;
- магнезит $MgCO_3$ - не реагирует с кислотой.

Двойное лучепреломление. Двупреломление света – разложение светового луча, входящего в кристалл, на два. Это свойство характерно для карбонатов, особенно для прозрачной разновидности кальцита – исландского шпата. При наложении исландского шпата на рисунок или текст явственно заметно раздвоение изображения.

Физиологические свойства. (Воздействие на вкусовые, обонятельные и тактильные анализаторы человека). Ряд минералов можно определить по вкусу. Например, галит имеет соленый вкус, сильвин – горько-соленый. Эти минералы, кроме того, растворяются в воде. Другие минералы можно различить по запаху. При горении серы ощущается запах сернистого газа, в то время как горящий янтарь издает ароматический запах. Существенна также степень шероховатости минералов, т. е. ощущение, возникающее при прикосновении к минералу. Есть минералы жирные на ощупь (тальк), гладкие (горный хрусталь) и шершавые (каолин).

1.3. Классификация минералов

Существует несколько классификаций минералов, в основу каждой из которых положены различные признаки. Наиболее признанной является кристаллохимическая классификация, в основе которой лежит в равной мере химический состав и кристаллическая структура минералов. По этой классификации выделяется большое количество классов, из которых в данном курсе будут рассмотрены лишь следующие: 1 - самородные элементы, 2 - сульфиды 3 - галогениды, 4 - оксиды и гидрооксиды, 5 - карбонаты, 6 - сульфаты, 7 - фосфаты и 8 - силикаты.

Класс 1 - самородные элементы – некоторые химические элементы в свободном минеральном состоянии. К ним относят: *металлы* - золото (Au), серебро (Ag), медь (Cu) и др.; *полуметаллы* - мышьяк (As), висмут (Bi); *неметаллы* - графит (C), сера (S) и др.

Класс 2 – сульфиды – соли сернистой кислоты H_2S. Наиболее характерными признаками, свойственными большинству сульфидов, являются сильный металлический блеск и высокий удельный вес. Сюда относят минералы: пирит – FeS_2, халькопирит – $CuFeS_2$ и галенит – PbS.

Класс 3 – галогениды – соли соляной кислоты HCl (*хлориды*) и соли плавиковой кислоты HF (*фториды*). Для них характерны низкая твердость (2-4), прозрачность и совершенная спайность. К этому классу относят галит – NaCl, сильвин – КС1 и флюорит – CaF_2.

Класс 4 – оксиды и гидрооксиды – соединения металлов и неметаллов с кислородом и водой H_2O. Для оксидов характерна прочность кристаллической решетки, чем обусловлена их высокая твердость (5-9). К этому классу относят корунд – $A1_2O_3$, кварц – SiO_2, опал – $SiO_2 \cdot nH_2O$ и минералы группы железа: магнетит – Fe_3O_4, гематит – $Fe_2O_3 \cdot n\ H_2O$.

Класс 5 – карбонаты – соли угольной кислоты H_2CO_3. Большая часть карбонатов бесцветна, твердость невысокая (3), характерна совершенная спайность по ромбоэдру и эффект двойного лучепреломления. К этому классу относят кальцит – $CaCO_3$, доломит – $CaMg(CO_3)_2$, магнезит – $MgCO_3$.

Класс 6 – сульфаты – соли серной кислоты H_2SO_4. В технических науках их называют купоросами. Для минералов этого класса характерна низкая твердость (2-3,5) и пестрые цвета окраски. К ним относят гипс – $CaSO_4 \cdot 2H2O$ и ангидрит – $CaSO_4$, медный купорос – $CuSO_4$ и железный купорос – $FeSO_4$.

Класс 7 – фосфаты – соли ортофосфорной кислоты H_3PO_4. Характерна средняя твердость (5) и светлая окраска. Сюда относят минерал апатит – $Ca_5[PO_4]_3(F,C1)$.

Класс 8 – силикаты – самая обширная группа породообразующих минералов, содержащих SiO_2. Основой кристаллической решетки силикатов является скелет из кремнекислородных тетраэдров $[SiO_4]^{-4}$ (рис.5,а). Кремнекислородные тетраэдры в структурах силикатов могут находиться либо в виде изолированных друг от друга структурных единиц $[SiO_4]$, либо сочленяются друг с другом разными способами. В зависимости от способа их сочленения выделяют следующие подклассы:

Островные силикаты с изолированными тетраэдрами (см. рис.5, а) представлены оливином. Для них характерны повышенные твердость и удельный вес, а также изометричные формы кристаллов.

Цепочечные силикаты с одинарными цепочками тетраэдров (см. рис. 5, б) представленные пироксенами;

Ленточные силикаты со сдвоенной цепочкой тетраэдров (см. рис. 5, в) представлены роговой обманкой. Несмотря на существенное различие в количественных соотношениях компонентов, цепочечные и ленточные силикаты имеют много общих свойств: удлиненная форма кристаллов, средняя спайность в двух направлениях, твердость 5-6, темный цвет.

Листовые силикаты с непрерывными слоями кремнекислородных тетраэдров представлены слоями кремнекислородных тетраэдров (рис. 5, г). Сюда относят слюды (биотит, мусковит), хлорит, тальк, каолинит, серпентинит. В прямой зависимости от кристаллической структуры находится важное диагностическое свойство этих силикатов - весьма совершенная спайность, а также гексагональная форма кристаллов.

Каркасные силикаты с непрерывными трехмерными каркасами тетраэдров $[SiO_4]^{-4}$ представлены почти исключительно алюмосиликатами, в которых часть ионов Si^{4+} в кремнекислородных тетраэдрах замещена на ионы $A1^{3+}$. Для этих силикатов характерна светлая окраска и твердость 5-7.

3. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Основная цель работы – знакомство с минералами и изучение их физических свойств. Исследование физических свойств выполняется в соответствии с рекомендациями, изложенными в разделе 1. Вначале определяется форма и характер минеральных агрегатов, затем цвет, блеск и другие физические свойства. Полученные данные сводятся в таблицу описания минералов.

Название	Форма кристаллов	Физические свойства минералов						Приме-
		цвет	цвет	блеск	спай-	твер-	спец.	

минерала, формула	или минераль-ных агрегатов		черты		ность	дость	св-ва	чание
1	2	3	4	5	6	7	8	9

После нескольких лабораторных занятий проводится контрольная работа для проверки и закрепления полученных знаний.

Часть 2

МАГМАТИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

2.1. Общие сведения о магматических горных породах

Магматические горные породы образуются в результате затвердевания магмы на глубине или на земной поверхности при вулканических извержениях. Магматические породы также называют изверженными.

Магма (от греч. «густая мазь») — огненно жидкий, главным образом силикатный расплав, возникающий в верхней мантии или в земной коре. Магма содержит большое количество растворенных газов и паров воды (F, C1, CO_2, H_2O и др.). На большой глубине магма находится под очень большим всесторонним давлением и обладает высокой температурой.

Поднимаясь вверх, магма внедряется в твердые и относительно холодные породы, которым она отдает свое тепло, начинает охлаждаться и кристаллизоваться. Большую роль в процессе кристаллизации играют летучие компоненты: пары воды и газа, способствующие и часто определяющие скорость кристаллизации минералов.

Поднимаясь вверх, магма оказывается в различных термодинамических условиях.

На значительных глубинах при медленном остывании магмы и сохраняющемся большом давлении происходит постепенная, последовательная и полная кристаллизация расплава. Последовательность в кристаллизации магмы связана с существованием минералов с разной температурой плавления. Тугоплавкие минералы кристаллизуются при более высоких температурах, когда другие еще находятся в расплаве.

К тугоплавким относят минералы, содержащие Fe и Mg (железисто-магнезиальные силикаты: оливин, авгит, роговая обманка, биотит и др.). При понижении температуры последовательно кристаллизуются и другие минералы.

Таким образом, на больших глубинах весь силикатный расплав превращается в агрегат тех или иных минералов, образуется полнокристаллическая горная порода. Долго сохраняющиеся условия высоких температур и давления создают благоприятные условия роста для всех минералов, в результате образуются полнокристаллические и равнокристаллические структуры пород с более или менее одинаковым размером зерен всех минералов.

На средних и небольших глубинах условия кристаллизации магмы менее стабильны и более разнообразны.

Если масса и температура расплава, внедрившегося на средних глубинах, достаточно велики для прогрева вмещающих пород и давление является достаточным для удержания в расплаве летучих компонентов, происходит также полная раскристаллизация расплава и

образуется полнокристаллическая порода. При этом центральные части получают равнокристаллическое, а краевые — неравнокристаллическое строение в связи с относительно быстрым охлаждением на контакте с вмещающими породами и частичной потерей летучих компонентов. Летучие компоненты для некоторых минералов являются катализаторами и заметно повышают скорость их роста, тогда при полнокристаллическом строении возникает большая разница в размерах зерен разных минералов, могут возникать порфировидные структуры.

На небольших глубинах температура и давление магмы могут быть недостаточными для ее полной кристаллизации. В таких условиях часть магмы успевает раскристаллизоваться и превратиться в минеральные зерна — вкрапленники, а другая часть затвердевает в виде вулканического стекла — аморфной массы, в которой могут быть зародыши кристаллов — микролиты, хорошо различимые только под микроскопом. В этих условиях образуются неполнокристаллические породы.

При вулканических извержениях магма либо изливается на земную поверхность (или на дно водного бассейна) в виде лавы, либо при взрывах выбрасывается в воздух на разную высоту, застывает и падает на поверхность в виде твердых частиц и обломков разного размера (вулканический пепел, песок, лапилли, вулканические бомбы), давая начало пирокластическим горным породам обломочного строения. Последние образуют особую группу вулканических пород и будут рассмотрены ниже.

Магма, излившаяся на поверхность в виде лавы, попадает в условия резкого понижения температуры и давления и связанной с этим почти полной потери летучих компонентов, что приводит к быстрому затвердеванию лавы. При этом если расплав поднимается медленно и с больших глубин и до выхода на поверхность в нем произошла частичная кристаллизация, то есть образовались кристаллы минералов, то при затвердевании на поверхности образуются неполнокристаллические породы. При быстром движении расплав не успевает кристаллизоваться и застывает на поверхности в виде вулканического стекла, образуя стекловатую породу, в которой кристаллы почти или полностью отсутствуют.

По условиям образования магматические горные породы подразделяют на следующие виды.

1. **Интрузивные** (внедрившиеся):
   - глубинные (абиссальные),
   - полуглубинные (гипабиссальные).
2. **Вулканические**:
   - эффузивные (излившиеся),
   - пирокластические.

Интрузивные, или внедрившиеся (от лат. «интрузио» — внедрение), горные породы образуются при застывании магмы под земной поверхностью и по глубине застывания делятся на глубинные и полуглубинные.

Глубинные, или абиссальные (от греч. «абиссос» — бездонный), или плутонические, породы формируются на больших глубинах, в условиях длительно сохраняющихся высоких температур и давлений и характеризуются полной раскристаллизацией магматического расплава.

Полуглубинные (гипабиссальные) горные породы, затвердевшие на средних и небольших глубинах, по условиям образования являются промежуточными между глубинными интрузивными и эффузивными. Температура и давление магмы на разных глубинах меняются по-разному, и могут возникать как полно-, так и неполнокристаллические породы.

Излившиеся, или **эффузивные,** породы (от лат. «эффузио» — излияние) образуются при излиянии лавы на дневную поверхность, где резко понижаются температура и давление. Эффузивные породы характеризуются неполной кристаллизацией или быстрым затвердеванием расплава в виде вулканического стекла.

Различия в условиях образования магматических пород четко отражаются на их внешнем облике и легко распознаются макроскопически по характеру структуры и текстуры.

2.2. Структуры и текстуры магматических горных пород

Структуры магматических горных пород макроскопически классифицируются по степени кристалличности вещества, относительному и абсолютному размеру зерен.

По *степени кристаллизации* магматического расплава выделяют следующие структуры:

полнокристаллические, когда все вещество раскристаллизовано в агрегат минералов;

неполнокристаллические, когда часть расплава раскристаллизовалась и образовались минеральные зерна, а другая часть затвердела в виде вулканического стекла;

стекловатые, когда вся порода представлена вулканическим стеклом. Для глубинных пород характерны полнокристаллические структуры, для полуглубинных — полно- и неполнокристаллические, а для излившихся — неполнокристаллические и стекловатые структуры.

По *относительному размеру* минеральных зерен выделяют структуры:

равнокристаллические (равномерно-кристаллические). Если порода полнокристаллическая по степени кристаллизации и размеры минеральных зерен близки по величине;

неравнокристаллические структуры выделяются как для полнокристаллических, так и для неполнокристаллических пород.

Для полнокристаллических различают:

неравнокристаллические, когда размер минеральных зерен различается не резко;

порфировидные, если одни зерна по размеру резко отличаются от других.

Для неполнокристаллических пород различают:

порфировые, состоящие из нераскристаллизованной части исходного расплава, которая вне зависимости от ее количества в породе называется «основной массой», и раскристаллизованной — «вкрапленников», представленных кристаллами минералов;

афировые, если порода состоит из основной массы без вкрапленников .

Равно- и неравнокристаллические и порфировидные структуры характерны для интрузивных пород, порфировые и афировые — для эффузивных и близповерхностных полуглубинных пород.

Для пород полно- и равнокристаллических выделяют *структуры по абсолютному размеру зерен*, см:

Гигантокристаллические	> 1
Крупнокристаллические	1-0,3
Среднекристаллические	0,3-0,1
Мелкокристаллические	0,1-0,05
Скрытокристаллические (афанитовые)	< 0,05

Все вышеперечисленные структуры, от гиганто- до скрытокристал-лической, характерны для интрузивных глубинных и полуглубинных пород, афанитовые — для основной массы эффузивных пород (вкрапленники при этом могут иметь различные размеры).

Среди многочисленных структур, выделяемых по взаимоотношениям минералов в породе, макроскопически хорошо различима *пегматитовая (письменная)*, характеризующаяся закономерным прорастанием полевого шпата кварцем, образующим клинообразные зерна, напоминающие древнееврейские письмена, откуда и произошло название структуры.

Текстуры изверженных горных пород подразделяют на компактные, когда нет пор и пустот, и некомпактные, если есть в породе пустоты и поры. К компактным текстурам относят: *массивную, пятнистую, флюидалъную, полосчатую, миндалекаменную;* к некомпактным — *пористую, пенистую, пузырчатую.*

Массивная текстура отличается беспорядочным расположением минеральных зерен, она наиболее характерна для интрузивных пород, нередко встречается и в эффузивных породах.

Пятнистую текстуру выделяет при неравномерном распределении светлых и темных минералов в породе. Встречается реже, главным образом в интрузивных породах.

Флюидальная текстура отличается ориентированным расположением удлиненных кристаллов, например столбиков роговой обманки, что отражает вязкое течение магмы или лавы в процессе застывания, при котором удлиненные кристаллы, как бревна в реке, располагаются своими длинными осями по направлению течения более или менее параллельно друг другу.

Флюидальная текстура может проявляться также в *полосчатости,* характеризующейся различиями в составе или структуре полос.

Некомпактные текстуры характерны для эффузивных пород и связаны с выделением из лавы летучих компонентов, после чего в затвердевшей лаве остаются пустоты округлой или миндалевидной формы.

Если пустоты мелкие (до нескольких миллиметров), образуется *пористая,* более крупные — *пузырчатая текстура*. В особо благоприятных условиях пары и газы могут вспенивать лаву, и при застывании образуется *пенистая,* или *пемзовая, текстура,* в которой пустоты по объему преобладают.

Миндалекаменная (мандельштейновая) текстура характерна для эффузивных горных пород и образуется в результате заполнения пор и пустот в затвердевшей лаве вторичными минералами (кварц, халцедон, кальцит, хлорит и др.). Образовавшиеся миндалины обычно выделяются своим более светлым цветом на фоне темно-серой или черной породы. От вкрапленников миндалины отличаются округлой или миндалевидной формой. Горные породы с миндалекаменной текстурой называют мандельштейнами.

2. 3. Классификация магматических горных пород по химическому и минеральному составам

В основу классификации магматических горных пород положены химический и минеральный составы и структурные особенности пород (см. таблицу).

Химический анализ магматических горных пород показывает, что они состоят в основном из восьми оксидов: SiO_2, $A1_2O_3$, Fe_2O_3, FeO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O. В значительно меньших количествах присутствуют TiO_2, MnO, P_2O_5, H_2O и некоторые другие. Из главных оксидов только SiO_2 присутствует во всех магматических породах в значительных количествах. Оксид SiO_2 и принят за основу химической классификации изверженных горных пород.

По содержанию кремнезема (оксида SiO_2) магматические породы подразделяют на четыре группы:

- кислые (SiO_2 = 64-78 %),
- средние (SiO_2 = 53-64 *%),*
- основные (SiO_2 = 44-53 %),
- ультраосновные (SiO_2 = 30-44 %).

Границы между этими группами магматических пород в известной мере являются условными, так как между породами соседних групп существуют постепенные переходы.

Важным показателем для классификации является содержание в магматической породе щелочей. По сумме щелочей ($Na_2O + K_2O$) выделяют три ряда магматических пород:

нормальной щелочности (низкощелочные, известково-щелочные), субщелочные (умеренно-щелочные) и щелочные (с высокой щелочностью).

Границы содержаний суммы щелочей для выделения рядов значительно варьируют в зависимости от группы магматических пород по содержанию оксида SiO_2.

По относительному количеству железисто-магнезиальных силикатов в объемных процентах (M — цветное число) магматические породы подразделяют на ультрамафические ($M > 70$), мафические ($70 > M > 20$) и салические ($M < 20$).

Химический состав магматических пород взаимосвязан с комплексом слагающих их минералов. Минералами — показателями степени кислотности (содержания оксида SiO_2) являются кварц и оливин. Кислые породы отличаются значительным содержанием кварца. Для основных и ультраосновных пород характерен оливин, а кварц может встречаться только как второстепенный (менее 5 %) минерал и макроскопически обычно не виден. Средние по степени кислотности породы, занимая промежуточное положение и по минералогическому составу, являются переходными между кислыми и основными породами. В них выделяют средние кварцевые, переходные к кислым, и средние бескварцевые, переходные к основным породы.

Количество железисто-магнезиальных темноцветных минералов постепенно увеличивается от кислых к основным и ультраосновным породам. Некоторые разности основных и все ультраосновные породы состоят почти на 100 % из цветных силикатов и относятся к ультрамафитам.

Содержание полевых шпатов уменьшается от кислых к основным породам. В кислых и средних породах полевые шпаты развиты широко, в основных — количество их уменьшается, а ультраосновные породы являются бесполевошпатовыми.

Высокая щелочность магматических пород определяется присутствием щелочных минералов, таких как нефелин, калиевый полевой шпат и другие.

Химический и минералогический состав определяют цвет магматической породы: чем кислее порода, тем она светлее, чем основнее — тем темнее. Кислые и средние породы обычно бывают серыми или цветными (розовыми, красными, желтыми), основные — темно-серыми или черными, ультраосновные — черными или темно-зелеными.

Условия образования не оказывают существенного влияния на химический и минеральный состав изверженных пород. Поэтому в классификации по степени кислотности

Классификация магматических горных пород нормальной щелочности

	Группы пород по содержанию SiO_2 (в масс. %)							
	кислые (78-64)		средние (64-53)		основные (53-44)		ультраосновные (44-30)	
	глубинные	излившиеся	глубинные	излившиеся	глубинные	излившиеся	глубинные	излившиеся
Породы нормальной щелочности	Гранит, гранодиорит	Риолит, обсидиан, дацит	Диорит	Андезит	Габбро	Базальт	Дунит, перидотит, пироксенит, горнблендит	Пикрит, коматиит
Породо-образующие минералы	**Кварц,** КПШ, биотит, кислый плагиоклаз В обсидиане, пемзе - стекло		Средний плагиоклаз, роговая обманка, пироксен		Основной плагиоклаз, пироксен, роговая обманка, оливин		Оливин, пироксен, роговая обманка	
Количество кварца	15-40 %		-		-		-	
Цвет излившихся пород		Белый, серый, светлые тона		Темно-серый, коричневый		Черный		Черный
Количество темно-цветных минералов в глубинных породах	10-15 ± 5 %		25 ± 15 %		50 ± 15 %		100 %	

изверженных пород в одну группу объединяют различные по происхождению (интрузивные, эффузивные, жильные), но близкие по химическому и минеральному составу.

Первоначальный минералогический состав магматических пород может заметно меняться в результате вторичных изменений.

Магматические горные породы весьма разнообразны, но лишь немногие из них распространены в земной коре широко. Наиболее широко развиты породы основного и кислого состава.

В земной коре среди магматических пород *около 70 %* составляют *основные* породы, а *кислые* и *средние* вместе — *около 30 %.* На ультраосновные породы приходится незначительная доля процента.

При этом среди эффузивов самыми распространенными являются лавы основного состава (базальты), а среди интрузивных образований — кислые породы (граниты и гранодиориты).

Среди всех типов по степени кислотности (кислые, средние и т. д.) наиболее широко распространены магматические породы нормальной щелочности (известково-щелочные). Однако субщелочные и щелочные породы хотя и развиты меньше, но не являются редкими.

В таблицах приводится характеристика наиболее часто встречающихся разновидностей глубинных (плутонических) и эффузивных пород.

Порядок описания интрузивных пород.

1. Цвет.
2. Структура (по степени кристаллизации, по относительному размеру зерен и для равно-, полнокристаллических по абсолютному размеру зерен).
3. Текстура.
4. Минералогический состав в процентах.
5. Характеристика каждого из минералов, входящих в состав породы (размер и форма зерен, цвет, спайность, излом, блеск).
6. Вывод: название породы, условия образования, группа по степени кислотности и щелочности.
7. Эффузивный аналог.

Порядок описания эффузивных пород.

1. Цвет.
2. Структура (по степени кристаллизации, по относительному размеру зерен).
3. Текстура.
4. Соотношение основной массы и вкрапленников в процентах.
5. Характеристика основной массы (цвет, особенности).
6. Характеристика вкрапленников (цвет, форма и размер зерен, спайность, блеск, излом, вторичные изменения).
7. Вывод: название, условия образования, группа по степени кислотности и щелочности.
8. Глубинный аналог.

После нескольких лабораторных занятий проводится контрольная работа для проверки и закрепления полученных знаний.

Часть 3

МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

3.1. Общие сведения о метаморфизме

Горные породы после формирования могут попасть в такую геологическую обстановку, которая будет существенно отличаться от обстановки образования породы и на нее будут оказывать влияние различные эндогенные силы: тепло, давление (нагрузка) вышележащих толщ, глубинные флюиды, растворы и газы, вода, водород, углекислота и др. Изменение магматических и осадочных пород в твердом состоянии под воздействием эндогенных факторов и называется **метаморфизмом**. Преобразованию могут подвергаться любые горные породы: осадочные, магматические и ранее образовавшиеся метаморфические. В физико-химических условиях, отличных от тех, в которых образовались горные породы, происходит изменение их минерального состава, структуры и текстуры. Изменение минерального состава при метаморфизме может протекать **изохимически**, т. е. без изменения химического состава метаморфизуемой породы, и **метасоматически**, т. е. со значительным изменением химического состава метаморфизуемой породы за счет привноса и выноса вещества. Особенность метаморфических процессов заключается в том, что они протекают с сохранением твердого состояния системы, без существенного расплавления пород. Лишь при определенных физико-химических условиях метаморфизм сопровождается частичной или полной кристаллизацией исходных пород. Процессы подобного характера объединяются под названием **ультраметаморфизма.**

В зависимости от интенсивности метаморфических процессов наблюдается постепенный переход от слабо измененных, сохраняющих состав и структуру исходных разностей, до глубоко преобразованных пород, первичная природа которых практически утрачена. Метаморфические отложения широко распространены в земной коре.

Метаморфизм - процесс преобразования любых исходных пород под воздействием изменившихся физико-химических условий среды. Он реализуется преимущественно путем перекристаллизации пород без существенного плавления под воздействием меняющихся температур, давлений, газовой (флюидной) среды. Преобразуя свой минеральный состав, порода, таким образом, приспосабливается к изменившимся термодинамическим (Т-Р) условиям.

Название термина происходит от греческого слова metamorpho – преобразование, превращение. Метаморфическим преобразованием могут подвергаться изначально осадочные, магматические и (повторно) метаморфические породы. При этом исходные породы, как правило, после таких преобразований полностью теряют свой первоначальный облик.

Факторами метаморфизма, т. е. непосредственными причинами преобразования пород, являются: давление (Р), температура (Т), а также растворы и газы (флюиды), пронизывающие толщи горных пород.

Давление при метаморфических преобразованиях может быть обусловлено рядом причин: давлением нагрузки вышележащих толщ (литостатическим - Рл), динамическим давлением тектонического движения (стрессовым - Рс), давлением движущейся магмы (Рм), а также давлением поровых (гидротермальных и флюидных) растворов (Рф). Главным среди отмеченных причин следует считать тектоническое или стрессовое давление, способное достигать десятков тысяч атмосфер и распространяться на огромные пространства. При проявлении тектонического или стрессового давления роль нагрузки вышележащих пород может оказаться незаметной, а проявление магматического и порового давления флюидов на таком фоне может повлиять на характер минеральных преобразований лишь локально, в местах их проявления.

Температура метаморфических преобразований могут быть обусловлены

несколькими причинами и достигать уровней, когда порода начинает плавиться, т. е. 1000 - 1200 °С. Всегда существует температурный фон, обусловленный глубиной погружения пород, т. е. геотермическим градиентом (Тг), составляющим обычно около 30°/1 км. Однако основные тепловые превращения в породе осуществляются за счет тектонических подвижек (Тс), а также нередко сопровождающих такие движения аномальных глубинных тепловых потоков (Тф). На контакте с магматическими породами преобразование осуществляется за счет прогрева пород очагом остывающей магмы (Тм).

Гидротермальные растворы и флюиды, которые способны привносить или выносить различные химические компоненты, могут влиять на характер минералообразования, создавать специфическую окислительную или восстановительную (Eh), а также кислую либо щелочную (pH) среды.

Глубинные флюиды насыщены, прежде всего, парами воды и углекислоты, а также более редкими соединениями водорода, хлора, фтора и др.

3.2. Типы метаморфизма

В зависимости от сочетания упомянутых выше факторов выделяются те или иные типы метаморфизма. Наиболее простая схема типов метаморфизма, выделяющихся в зависимости от термодинамических (Р, Т) параметров, показана на рис. 1, а геологические условия их проявления - на рис. 2. Можно говорить о контактовом типе метаморфизма, когда порода преобразуется под преимущественным воздействием температуры, а также динамическом, когда основным фактором выступает давление, и динамотермальном, когда проявляются оба фактора одновременно. Каждый из этих типов обладает своими специфическими геологическими условиями проявления (рис. 2).

Контактовый тип метаморфизма проявляется в породах обрамления магматических тел, на контакте с ними, поэтому он называется контактовым. Температура магматических тел колеблется в интервале 800-1200° С, а вмещающие породы, разогретые первоначально за счет геотермического градиента, могут быть относительно «холодным». Ширина зоны (ореол) контактового метаморфизма зависит, главным образом, от объема магматического очага и может достигать нескольких километров. Если вмещающая порода разогрета жильным магматическим телом (пегматитовая жила, дайка гранитоидов и т. д.), то прогретой бывает лишь узкая полоса в несколько метров.

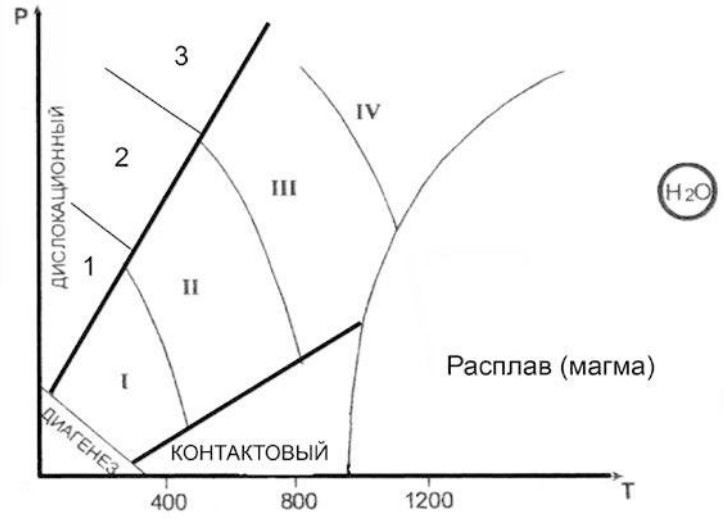


Рис. 1. Типы метаморфизма

Фации умеренного давления: I – зеленосланцевая, II – Эпидот-амфиболитовая, III – амфиболитовая, IV – гранулитовая

Фации высокого давления: 1– глаукофановая, 2 – дистен-мусковитовых сланцев и дистеновых гнейсов, 3 – эклогитовая

Весьма существенную роль при контактовом метаморфизме играет химический состав магмы и вмещающих пород, а точнее, контрастность состава между ними. В случае резкого контраста между многокомпонентной магмой и вмещающими породами на их контакте протекают диффузионные процессы взаимного проникновения, меняющие как состав внешней оболочки магматического тела, так и состав вмещающих пород. Такой процесс перекристаллизации пород, протекающий с существенным изменением их первичного химического состава, называется **метасоматозом**. Обычно метасоматоз сопровождается интенсивной гидротермальной и флюидной проработкой, способствующей привносу и выносу химических компонентов. Типичными представителями таких контактово-метасоматических процессов (на границе между силикатными магмами и известняками) являются скарны. С другой стороны, в случае, если силикатная магма находится в контакте с близкими ей по химическому составу вмещающими породами, то формируются роговики - прогретые и перекристаллизованные продукты метаморфизма первичных пород без проявления метасоматоза.

Дислокационный метаморфизм протекает в условиях высокого стрессового давления, под воздействием тектонических движений по крупным разрывным нарушениям (разломам). При этом, происходит дробление пород с образованием структур катаклаза, а под действием проникающих в ослабленные зоны флюидов (гидротермальных растворов), горные породы подвергаются частичной или полной перекристаллизации и цементации.

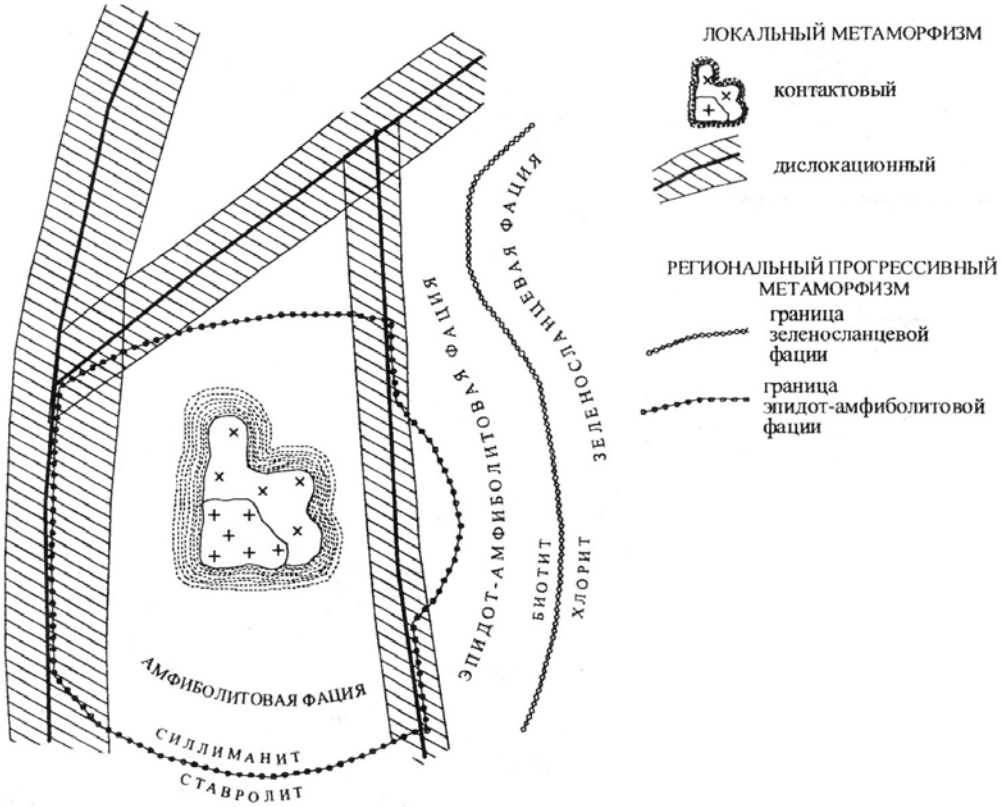


Рис. 2. Схематическая карта метаморфизма

Новообразованными минералами - индикаторами высоких давлений являются кианит, глаукофан, пироп, омфацит (пироксен), алмаз. Эти минералы фиксируют давления больших глубин, где всегда имеется и некоторый температурный фон, создаваемый геотермальным градиентом. В приповерхностных условиях можно наблюдать и неперекристаллизованные брекчии, милониты, филлониты.

Процессы контактового и дислокационного типов метаморфизма протекают в

ограниченных пространствах, т. е. развиваются локально. Контактовый метаморфизм проявляется в виде узкой полосы вокруг магматических тел, а дислокационный – такой же полосой сопровождает тектонические трещины, в связи с чем эти два тип метаморфизма объединяются под общим названием **локальный метаморфизм** (рис. 3).

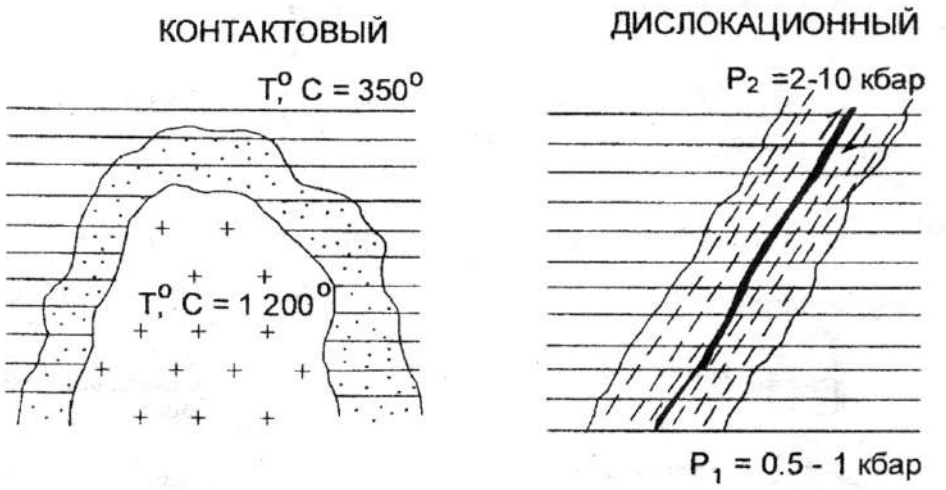


Рис. 3. Локальные типы метаморфизма

В противоположность локальному выделяют **региональный метаморфизм.** Региональный метаморфизм – широкомасштабный процесс, охватывающий огромные территории в пределах подвижных поясов земной коры. Главными его факторами являются температура и давление, а также воздействие воды и углекислоты, содержащихся в исходных породах и способствующих ходу химических реакций. Преобразование горных пород, происходящее на глубине без существенного плавления и метасоматоза, сопровождается перекристаллизацией и развитием новых минералов в условиях расплющивания и пластического течения вещества, что приводит к появлению характерной для метаморфических образований ориентированности (параллельному расположению) минеральных зерен. Породы регионального метаморфизма имеют наиболее широкое распространение.

Метасоматоз контактовый – процесс метасоматического изменения горных пород в контакте с интрузивными телами. При метасоматозе возникают как экзометасоматиты, то есть контактовоизмененные вмещающие породы под воздействием внедрившихся в них интрузий, так и эндометасоматиты, являющиеся продуктами изменения самих интрузивных образований при биметасоматических реакциях. Температурный режим этих процессов изменяется от 900 до 300-200 °С. Примерами контактового метасоматоза могут служить скарнообразование, грейзенизация и пр.

1.2. Фации метаморфизма

В зависимости от параметров метаморфизма и минерального состава образующихся пород выделяют **фации метаморфизма**, понимая под этим термином совокупности горных пород, минеральный состав которых находится в равновесии при данных условиях метаморфизма.

Для метаморфических пород, в соответствии с типами метаморфизма, выделяют две группы фаций:

- фации умеренных давлений (региональный метаморфизм);

- фации высокого давления (дислокационный метаморфизм).

Метаморфические породы **умеренных давлений** подразделяются на четыре фации. По мере возрастания P-T условий регионального метаморфизма выделяют: 1 – зеленосланцевую фацию; 2 – эпидот-амфиболитовую фацию; 3 – амфиболитовую фацию; 4 – гранулитовую фацию. Название фации определяется по типичной породе, сложенной определенной ассоциацией минералов. В области термодинамических условий гранулитовой (иногда амфиболитовой) фации в породе может отмечаться частичное плавление, такое преобразование называют ультраметаморфизмом. Это переходная зона от метаморфизма к магматизму, сложенная мигматитами.

Фация зеленых сланцев (зеленосланцевая) соответствует наиболее низкотемпературной ступени регионального метаморфизма и объединяет породы, сформировавшиеся в температурном интервале 250-450 °C при давлении от 1,5 до 3 кбар. Широкое развитие минералов зеленого, светло-зеленого цвета (хлорита, актинолита, серицита, талька и др.) определило название фации.

Эпидот-амфиболитовая фация отвечает более высокотемпературной ступени регионального метаморфизма (T = 450-600 °C, P = 3-6 кбар) и поэтому характеризуются заменой низкотемпературных минералов более высокотемпературными. Граница прорисована линией исчезновения хлорита и замещением его биотитом. В этой фации появляется гранат, эпидот, ставролит, роговая обманка и другие. Наиболее широко распространены кристаллические сланцы с гранатом, биотитом, мусковитом, ставролитом и другие.

Амфиболитовая фация представлена гнейсами, амфиболитами, для образования которых требуются уже значительные температуры и давление (T = 600-800 °C, P = 4-8 кбар). При этих условиях исчезает эпидот, ставролит.

При высоком содержании в породах воды наступает частичное их плавление – анатексис с возникновением гранитного расплава, что приводит к образованию мигматитов.

Гранулитовая фация отличается наиболее интенсивными параметрами метаморфизма (T = 750-1100 °C, P = 6-11 кбар). Такие условия создавались на больших глубинах, на ранних стадиях развития Земли – архейского и протерозойского эонов. Породы, сформированные в условиях этой фации, почти полностью лишены воды; гидроксилсодержащие минералы в них содержатся редко.

В условиях дислокационного метаморфизма выделяются **фации высокого давления,** которые локализуются в глубинных узких тектонических зонах, формируются в условиях повышенного давления (до 10-20 кбар) и температурах 300-800 °C.

Глаукофановая фация является наиболее низкотемпературной и в этом отношении сопоставимой с зеленосланцевой фацией. Эта фация характеризуется развитием различных сланцев, в которых обычно присутствует хлоритоид, фенгит, парагонит, глаукофан.

Фация дистен-мусковитовых сланцев и дистеновых гнейсов соответствует примерно интервалам температур эпидот-амфиболитовой фации умеренных давлений, но наряду с минералами, свойственными указанной фации появляются новые минералы, индикаторы высокого давления – дистен, омфацит, глаукофан, пироповый гранат, парагонит и ряд других минералов. Обычными породами этой фации являются дистен-мусковитовые (парагонитовые) сланцы и более высокотемпературные дистеновые гнейсы.

Эклогитовая фация включает весьма своеобразные породы, называемые эклогитами. Главными минералами эклогитов является пироксен (омфацит) и гранат (пироп).

3**.3. Особенности минерального состава метаморфических горных пород**

Широкий диапазон термодинамических условий проявления метаморфизма обусловил большое разнообразие минерального состава пород. Кроме того, этот набор минералов зависит от состава исходных пород. Сам механизм перекристаллизации пород,

протекающий в твердом виде, представляет собой сложный процесс замещения одних минералов (неустойчивых при новых Р-Т- условиях) другими, более устойчивыми. При этом важную роль играют поровые флюиды как катализаторы реакций замещения.

Кроме упоминавшихся минералов, входящих в состав магматических пород, выделяется группа минералов, характерных преимущественно для метаморфических пород.

Тальк – низкотемпературный чешуйчатый минерал, возникающий при гидротермальной проработке магнезиальных пород. Мягкий, с жирным блеском.

Хлорит – низкотемпературный чешуйчатый минерал часто с зеленоватым оттенком. Образуется при гидротермальной проработке основных пород.

Серпентин – возникает как продукт гидротермальной проработки ультраосновных пород. Не обладает четко выраженной формой (иногда образует волокнистые агрегаты), серого с зеленоватыми оттенками цвета.

Серицит – низкотемпературная, мелкочешуйчатая, наиболее гидроксилнасыщенная разновидность слюды - мусковита. Присутствие в породе серицита обусловливает ее шелковистый блеск.

Эпидот – образует призматические кристаллы, лучистые или зернистые агрегаты. Цвет светло-зеленый. Блеск сильный стеклянный.

Гранат – кристаллы изометричные в виде ромбододекаэдров, реже зернистые агрегаты. Цвет – от коричневого до красного. Макроскопически легко узнается по характерному облику кристаллов и цвету.

Актинолит – низкотемпературная разновидность роговой обманки. Образует волосовидные, тонколучистые неориентированные агрегаты. Цвет светло-зеленый.

Глаукофан – разновидность роговой обманки, образующаяся при высоких давлениях. Образует тонколучистые агрегаты. Цвет густо фиолетовый до черного.

Ставролит – кристаллы в виде коротких ромбического сечения призм, характерные двойники, напоминающие прямой или косой (угол 60°) крест. Цвет коричневый, красно-бурый до черного. Легко узнается по цвету и двойниковым формам.

Дистен (кианит) – кристаллы длинные, уплощенные. Имеет анизотропию твердости. Цвет голубой или синий.

3.4. Текстуры и структуры метаморфических горных пород

Текстуры и структуры метаморфических пород зависят от специфических физических условий их образования. Эти условия отличаются от термодинамических параметров кристаллизации магматических пород, для которых действует в полной мере известный закон Паскаля, обеспечивающий при любом направленном тектонических движений одинаковое давление во все стороны. Этим условием обеспечивается повсеместная массивная текстура глубинных магматических пород. Слюды в гранитах, например, благодаря действию закона Паскаля, не ориентированы в одном направлении.

Метаморфические процессы не достигают условий плавления, поэтому породы изменяются в твердом или пластичном состоянии, когда закон Паскаля работает лишь частично или не проявляется вовсе. Для регионального метаморфизма, например, ориентированное давление влияет на форму возникающих минералов, а также на их параллельную или субпараллельную ориентировку. Поэтому у низкотемпературных продуктов регионального метаморфизма отмечаются, как правило, **сланцеватые текстуры** с параллельным и субпараллельным расположением вытянутых, уплощенных или чешуйчатых минералов.

С повышением температуры, в условиях амфиболитовой фации, когда вещество начинает проявлять пластические свойства, а значит, частично проявляется закон Паскаля,

четкая ориентировка удлиненных, уплощенных минералов постепенно исчезает, т. к. давление становится, до определенной степени, всесторонним. Такая текстура со слабо выраженной ориентировкой минералов называется **гнейсовой,** по названию главного и типичного представителя пород амфиболитовой фации - гнейса.

Максимальное проявление закона Паскаля достигается в условиях гранулитовой фации, поэтому ее продукты не несут следов ориентировки минералов, а текстура называется **массивной** как у глубинных магматических пород.

Так как региональный метаморфизм протекает в условиях тектонического давления, то сланцеватые текстуры могут усложняться мелкой складчатостью. Тогда такая текстура называется плойчатой. Нередко метаморфические процессы высокотемпературных фаций сопровождаются расслоением первично однородной массы на слои контрастного минерального состава. Образуются темно-окрашенные (с амфиболом, слюдами) и светлоокрашенные (с кварцем, полевым шпатами) слои. В этом случае говорят о **полосчатой** текстуре пород.

Более широкий диапазон текстур характерен для продуктов локального (контактового и дислокационного) метаморфизма. Для скарнов, роговиков, березитов, лиственитов, мраморов, образующихся при контактовом метаморфизме без проявления тектонического (стрессового) давления, наиболее часто отмечается **массивная** текстура, хотя может встречаться пористая, ноздреватая, пятнистая и другие.

Структурные особенности метаморфических пород также в существенной степени определяются Р-Т условиями среды минералообразования. Очевидно, что в условиях полной анизотропии среды, когда относительно «холодная» твердая порода подвергается тектоническому направленному сжатию, легче кристаллизоваться и расти чешуйчатым минералам, которые относительно легко могут наращивать свой размер вкрест, перпендикулярно вектору давления. В то же время в условиях изотропной среды гранулитовой фации, когда давление становится всесторонним, возникают благоприятные условия для кристаллизации изометричных, объемных минералов.

Так как для метаморфических процессов отмечается тесная обусловленность внешними факторами формы минералов, эта особенность заложена в понятие структуры (в противоположность магматическим и осадочным породам, где в понятие структуры вкладывается не форма, а размер минералов, зерен и т. д.). Форма минералов, а значит и структура породы, совместно с ее текстурными особенностями позволяют восстанавливать Р-Т условия образования продуктов метаморфизма.

Конкретные названия структур определяются несколькими латинскими названиями упомянутых форм минералов: лепидос - чешуйка; нематос - нить, иголка; гранос - зерно. Кроме того, следует помнить, что метаморфизм – процесс постоянного обновления минерального состава породы, все минералы вновь выросшие, возникшие. Этот процесс называется бластезом (от греческого «бластос» – росток). В итоге структуры продуктов регионального метаморфизма, в зависимости от формы слагающих ее минералов, могут называться: лепидобластовая, гранобластовая, нематобластовая, либо более сложными комбинированными названиями: лепидо-гранобластовая, немато-гранобластовая или лепидо-немато-бластовая т. д.

Гранобластовая структура чаще отмечается для пород амфиболовой и гранулитовой фаций метаморфизма при наличии зерен изометричной формы кварца, полевых шпатов, гранатов, карбонатов и др.

Лепидобластовая характерна обычно для зеленосланцевой фации при обилии чешуйчатых, листоватых минералов – серицита, мусковита, биотита, хлорита, талька, серпентина.

Нематобластовая в чистом виде встречается редко (амфиболиты, актинолитовые сланцы) и отличаются наличием минералов игольчатой, длиннопризматической формы (эпидот, роговая обманка, актинолит, кианит, рутил).

Иногда в породе отмечаются разнозернистые агрегаты, когда один из

новообразованных минералов резко выделяется по размеру среди остальных. В этом случае можно говорить о **порфиробластовой** структуре.

Значительно меньшую информацию об условиях образования несут структуры контактового метаморфизма, продукты которого чаще всего обладают **кристаллобластовыми** структурами.

Среди пород регионального метаморфизма имеется два характерных исключения. В зависимости от P-T условий различные формы минералов возникают лишь в том случае, если в исходном химическом составе имелись в наличии необходимые породообразующие компоненты, позволяющие строить все многообразие решеток минералов (чешуйчатых, игольчатых, зернистых). Среди осадочных пород известны две мономинеральные, а значит простые по составу, образования - известняки ($CaCO_3$, $MgCO_3$) и кварцевые пески (SiO_2). При метаморфизме эти простые по составу породы не способны формировать игольчатые, чешуйчатые и другие, кроме зернистых, формы. Поэтому известняки при метаморфизме переходят в мономинеральную (с одним кальцитом) породу – мрамор с возможным укрупнением зерна по мере роста температуры. Аналогично ведут себя кварцевые пески, которые способны образовать только зернистый агрегат кварцита. Так как отмеченные породы не способны реагировать на давление изменением формы зерен, то для них, обычно, трудно восстановить тип метаморфизма – региональный или контактовый.

3.5. Методика выполнения лабораторной работы

Основная цель лабораторной работы – знакомство с метаморфическими горными породами, их текстурно-структурными особенностями, минеральным составом. Студенты должны научиться определять продукты разных типов метаморфизма (регионального, термального и дислокационного) и, при возможности, устанавливать их исходный состав (эдукт).

Выполнение лабораторных работ проводится в определенной последовательности: вначале определяется текстура породы, позволяющая устанавливать тип метаморфизма; затем исследуются структурные особенности, по которым восстанавливают термодинамические условия проявлений метаморфизма (фации – для продуктов регионального метаморфизма), которые уточняются после диагностики минерального состава породы. По совокупности полученных сведений о метаморфической породе делаются выводы об исходной породе (эдукте).

Описание пород ведется в следующей последовательности: цвет породы, текстура, структура, минеральный состав. По совокупности всех описанных признаков студент должен определять тип метаморфизма, фациальный уровень (P-T- условия), и при возможности предположить возможный состав эдукта.

Часть 4

ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

4.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

4.1.1. Литогенез

Формирование осадочных пород представляет собой сложный и длительный процесс, связанный с экзогенными процессами. В образовании осадочных пород выделяют следующие стадии: 1) образование исходного осадочного материала; 2) перенос осадочного материала; 3) накопление осадка (седиментогенез); 4) преобразование осадка в осадочную породу (диагенез); 5) изменение осадочной породы до начала метаморфизма или начача выветривания (катагенез). Процесс формирования осадочной породы, начиная от образования исходного материала и заканчивая превращением осадка в породу, носит название литогенеза. Крупный вклад в изучение этого процесса внесли советские учёные Н. М. Страхов, Л. В. Пустовалов, Г. Ф. Крашенинников, Н. Б. Вассоевич, Л. Б. Рухин, Н. В. Логвиненко, Т. А. Лапинская и др.

Исходным материалом осадочных пород служат продукты разрушения магматических, метаморфических и ранее образовавшихся осадочных пород на поверхности Земли. Разрушаются горные породы и входящие в их состав минералы в результате экзогенных процессов, причём основная масса продуктов разрушения образуется в результате выветривания. Под действием поверхностных вод и в меньшей степени ледников и ветра продукты разрушения переносятся к областям седиментации (осадконакопления). Весь этот материал, находящийся на стадии переноса, при соответствующих условиях рельефа и геохимической обстановки может перейти в осадок. При этом начинается третья стадия образования породы - седиментогенез, или накопление осадка. Осаждение частиц может быть временным, когда частицы вновь подхватываются движением среды, или окончательным, когда происходит накопление осадка, т. е. постепенное закрепление частиц на дне.

Подавляющая масса осадков накапливается в конечных водоёмах стока - озёрах и, главным образом, морях. Такие осадки называют субаквальными. В отличие от них осадки, накапливающиеся на суше, вне водной среды, называют субаэральными. В конечных водоёмах стока в зависимости от характера поступающего материала, а также от гидродинамического и гидрохимического режимов формируются осадки трёх типов: обломочные, органогенные и хемогенные. Характерно, что породы биогенного происхождения встречаются только в толщах субаквальных отложений. Субаэральные отложения обычно представлены только обломочными и хемогенными образованиями, отличными по своим свойствам от тех же разностей, сформировавшихся в субаквальных условиях. На стадии седиментогенеза закладываются такие важные свойства осадка, как минеральный состав, размер и форма слагающих его частиц, слоистость. Следующим этапом формирования породы является стадия диагенеза. Диагенез - совокупность процессов, преобразующих осадок в осадочную породу. Свежесформированные осадки обычно образуют рыхлые, сильно обводнённые слои, насыщенные разнообразными химически активными соединениями. Кроме минеральных веществ в осадке присутствует органическое вещество в виде остатков отмерших организмов и живые бактерии.

Только что образовавшийся осадок представляет собой рыхлое или текучее тело, обильно обводненное, богатое микроорганизмами и состоящее из весьма разнообразного материала, частью твердого, частью жидкого и газообразного. Главная особенность свежесформированного осадка - отсутствие равновесия между входящими в его состав реакционноспособными соединениями. Из-за неравномерности свежий осадок представляет собой неустойчивую физико-химическую систему. Так, в осадке имеется

много кислорода и богатых им веществ, здесь же - живые организмы, нуждающиеся в кислороде для своего существования, и органическое вещество, которое способно к окислению и сгоранию. Пропитывающая иловый осадок вода по составу почти не отличается в первый момент от воды наддонной. Эта вода не насыщена карбонатами, кремнеземом, фосфатами и другими компонентами; в то же время в осадке много биогенно осажденных или перенесенных в виде взвеси кальцита, магнезита, кремнезема и других веществ. В состав глинистых минералов в виде примеси входят также поглощенные ими катионы многих металлов.

После фиксации осадка на дне естественно начинается процесс уравновешивания этой системы. Физико-химическое равновесие достигается при процессах обезвоживания, разложения органических остатков, уплотнения и цементации осадков, образования конкреций.

Стадией диагенеза заканчивается процесс собственно формирования осадочной горной породы. Она продолжает существовать в земной коре до тех пор, пока находится в термодинамических условиях, характерных для верхних горизонтов. Однако и здесь осадочная горная порода не остаётся неизменной. Наступает стадия катагенеза. Катагенез — это совокупность процессов, изменяющих осадочную породу в период её' существования до начала метаморфизма или выветривания. В отличие от диагенетических процессов, обусловленных внутренней неуравновешенностью осадка, причиной катагенез является отсутствие равновесия между породой и средой, в которую она попадает в результате прогибания или подъёма участков земной коры. Основными факторами катагенеза являются температура и воздействие подземных вод. В целом процессы катагенеза протекают менее интенсивно, чем диагенетические, но зато чрезвычайно длительны и приводят к заметным результатам, а именно: уплотнению и обезвоживанию, растворению и выносу ряда минералов подземными водами, перекристаллизации минералов в осадочной породе.

4. 1.2. Химический и минеральный составы осадочных пород

Осадочные горные породы состоят из различных по составу и происхождению компонентов: аллотигенных, органических остатков разного типа и вулканогенного материала.

Аллотигенные (привнесённые извне) компоненты составляют основную массу обломочных и некоторых глинистых пород и представляют собой обломки и частицы пород и минералов различного размера. Как правило, в осадочных породах встречаются обломки наиболее устойчивых минералов и пород. Главным образом это кварц, затем следуют полевые шпаты, слюды. пироксены, амфиболы.

Аутигенные (образовавшиеся на месте нахождения) компоненты образуются за счёт выделения минерального вещества из природных растворов или в результате обменных и других реакций либо в воде бассейна осадконакопления, либо в осадочной горной породе. Наибольшее значение из них имеют глинистые минералы, карбонаты, сульфаты, соли, оксиды и гидроксиды Fe, Mn, Al, Si, а также фосфаты. Эти минералы слагают основную массу хемогенных и часть глинистых пород, а также широко распространены в цементах обломочных пород и конкрециях.

Органические остатки. В осадочных горных породах присутствуют органические останки или следы жизнедеятельности организмов. Это обломки раковин или скелетных частей различных животных и растительных организмов. В породах биогенного происхождения органические останки являются преобладающим компонентом, а в некоторых случаях породы целиком сложены ими (ракушняки, известняки, мел и др.).

В значительной части современных осадков присутствует вулканогенный материал в виде обломков вулканического стекла и эффузивных пород. Вулканогенный материал попадает в осадки обычно как примесь вулканического пепла, песка и более крупных

образований при извержениях. При этом название породы состоит из двух слов, например, туфогенный песчаник. Следует иметь в виду, что прилагательное в этом словосочетании (в данном случае «туфогенный») означает, что вулканогенного материале в породе меньше, чем терригенного. В песчанистом туфе меньше терригенного материала, чем вулканогенного.

3.2. Классификация осадочных горных пород

Общепризнанных классификаций осадочных горных пород нет, что связано, прежде всего, с разнообразием процессов и факторов, контролирующих образование осадков. В нашей стране распространением пользуется классификация осадочных пород, предложенная в 1958 г. М. С. Шевцовым, в основу которой положено, с одной стороны, их происхождение, а с другой - их химический и минеральный составы. Упрощенная классификация осадочных пород приведена в виде таблицы.

По генетическим признакам среди осадочных горных пород выделяют три главные группы.

1. Терригенные (обломочные) породы образуются в результате механического разрушения ранее существовавших горных пород и накопления обломочного материала. К ним относят песчаники, гравелиты, конгломераты, а также их не сцементированные и неокатанные разности: пески, гравий, дресву, галечник и щебень. В эту же группу входят глинистые породы, являющиеся продуктом преимущественно химического разрушения пород, а также переотложения глинистых минералов, освободившихся при выветривании глинистых толщ и тончайшего дробления химически стойких минералов.

2. Органогенные породы, которые образуются в результате жизнедеятельности организмов (коралловые постройки) и их отмирания (кости рыб, зубы акул и т. д.). В отдельную группу выделяют каустобиолиты, образующиеся из растительных и животных (планктон) останков, преобразованных под влиянием биохимических, химических и другихгеологических факторов и обладающих горючими свойствами. Это - угли, торф, сапропель и др.

3. Хемогенные породы, образующиеся при химическом разрушении, растворении минералов материнских пород и последующем выпадении новых минералов в осадок из пересыщенных растворов.

Более детальное подразделение осадочных пород в пределах выделяемых генетических групп производится по вещественному и минеральному составам. Терригенные осадочные горные породы по размеру обломков (частиц) подразделяют на грубообломочные (псефиты), песчаные (псаммиты), пылеватые (алевролиты) и глинистые (пелиты). По характеру связи (цементации) обломочного материала их подразделяют на сцементированные и несцементированные (рыхлые).

При классификации органогенных и хемогенных пород определяющим является их химический состав.

3.3. Текстуры и структуры осадочных горных пород

Строение осадочных пород характеризуется текстурой и структурой.

Текстура - это общий рисунок породы, черты ее строения, определяемые способом заполнения пространства, характером сочетания между собой элементарных частиц (минералов, зерен, обломков). Текстура породы формируется с этапа накопления осадка. Возникшие в процессе осадконакопления первичные текстуры отражают состояние среды в момент накопления осадочного материала и результаты её взаимодействия с осадком. Вторичные текстуры возникают в уже сформировавшейся породе при процессах диагенеза и гипергенеза.

'Структура осадочной породы - это особенности её строения, которые определяются размером, формой, степенью однородности составных частей, а также количеством, размером и степенью сохранности органических остатков. Элементы структуры породы формируются на протяжении всех этапов образования и жизни породы.

Важнейшим признаком, характеризующим строение осадочных пород, является их слоистая текстура. Образование слоистости связано с условиями накопления осадков. Любые перемены этих условий вызывают либо изменение отлагающегося материала, либо обстановку в его поступлении, что внешне выражается в появлении слоев.

Классификация осадочных горных пород

ТЕРРИГЕННЫЕ				
Структура	Рыхлые, несцементированные		Сцементированные	Размер, мм
	неокатанные	окатанные		
псефитовая	Глыбы Щебень Дресва	Валуны Галечник Гравий	>50 Конгломераты 10 Гравелит	> 1-10
псаммитовая	Песок		Песчаник	0,1-1,0
алевритовая	Алевриты		Алевролиты	0,01 -ОД
пелиговая	Глины		Аргшшпы	<0,01
ОРГАНОГЕННЫЕ				
Название			Химический состав	
Известняки, мел			CaCOз	
Доломит			CaMg(CQ,)	
Опоки, трепела			SiQz-nHaO	
Сапропелиты, торф, уголь			Органические соединения углерода	
ХЕМОГ ЕННЫЕ				
Название			Химический состав	
Соли галоидные: галит сильвин Соли сернокислые: гипс ангидрит Соли фосфатные: аштит Бурые железняки Бокситы			NaCl KC1 CaS0$_4$-2H20 CaS0$_4$ АЩз • nH$_2$O, Al(OHb A10(OH)	

Слои представляют собой более или менее плоские тела, горизонтальные размеры которых во много раз больше их толщины (мощности), и отделяющиеся друг от друга поверхностями напластования. Слоистая текстура обусловлена чередованием слоев нескольких разностей осадочных пород и может быть вызвана резким изменением размера обломочных частиц и вещественного состава пород либо ориентировкой осадочного материала.

Для осадочных пород характерна также пористая текстура, характеризующая степень её проницаемости. По степени пористости выделяют следующие породы:

микропористые, в которых пористость не заметна на глаз, но устанавливается специальными методами;

мелкопористые, в которых можно различить мелкие частые поры;

крупнопористые - с колебанием размера пор в пределах от 0,5 до 2,5 мм;

кавернозные имеют крупные поры (каверны) на месте выщелоченных раковин и остатков других организмов, а также отдельных частей горной породы.

Для однородных, преимущественно зернистых хемогенных и органогенных пород, характерны массивные текстуры. Все несцементированные осадочные горные породы имеют рыхлую текстуру.

Структура осадочных пород отражает их происхождение. Структуры осадочных пород определяются, главным образом, размером и отчасти формой слагающих их частиц. По величине обломков для терригенных горных пород (мм) выделяют такие структуры, как: галечная (окатанные обломки) - 10 - 100; щебеночная (остроугольные обломки) - 10 - 100; гравийная (окатанные обломки) - 1 - 10 ; дресвяная (остроугольные обломки) — 1-10; псаммитовая -0,1-1; алевролитовая — 0,01 - 0,1; пелитовая - < 0,01.

Для хемогенных пород (известняки, доломит, гипс) характерна кристаллически-зернистая структура. В зависимости от размера слагающих породу зерен выделяют крупнозернистую (преобладают зерна величиной 1,0 -0,5 мм), среднезернистую (0,5 - 0,25 мм), мелкозернистую структуры (0,25 -0,1 мм), иногда, когда порода плохо отсортирована, выделяют разнозернистую структуру.

Оолитовая структура наблюдается в случаях, когда в породе в массовых количествах присутствуют мелкие шаровидные стяжения (оолиты) различного размера (боксит, оолитовый известняк).

Структуры пород, в составе которых большое участие принимают остатки организмов (свыше 20 - 30 % объема породы), определяются степенью сохранности этих останков и их количеством. Выделяются следующие структуры: биоморфная - в случае хорошей сохранности скелетных остатков организмов; детритовая - порода почти полностью состоит из скелетных обломков размером крупнее 0,1 мм.

Осадочные породы имеют самую разнообразную окраску и оттенки. При этом иногда окраска является признаком, характерным для определения этих пород, и зависит: 1) от окраски минералов, слагающих пород; 2) окраски рассеянных в породе примесей и цемента; 3) цвета тончайшей корочки, часто обволакивающей зерна составляющих породу минералов. Белый и светлосерый цвета обычно обусловлены окраской главных минералов осадочных пород (кварца, каолинита, кальцита, доломита и др.) и свидетельствует до некоторой степени о чистоте породы. Темно-серый и черный цвета чаще всего появляются в результате примеси углеродистого вещества и, реже, оксидов и гидрооксидов марганца. Красный и розовый цвета связаны с примесью в породе оксидов железа, а зеленый цвет зависит от примеси закисного железа и присутствия минералов с зеленой окраской - чаще глауконита, реже хлорита и малахита.

4.3. Методика выполнения лабораторной работы

Основная цель лабораторной работы - знакомство с осадочными горными породами, их текстурно-структурными особенностями, минеральным составом.

Правильное определение осадочных горных пород возможно только при полном учете всего комплекса внешних свойств. Подробно должны быть описаны текстура и структура породы, характер слоистости (в случае отсутствия последней это должно быть специально указано), наличие или отсутствие кавернозности и т. д. Необходимо устанавливать и указывать возможно точнее структуру породы со всеми ее особенностями, окраску, твердость, излом, удельный вес и другие признаки, точно определять состав породы. Не менее подробно, чем породу, следует описывать и все инородные включения в нее: органические остатки, конкреции, прожилки, различные выделения, выщветы, примазки и т. д. Полное описание дает возможность установить тип породы и способ ее образования, а тем самым и определить ее.

При описании псефитов следует указывать состав, окраску, величину и характер окатанности обломков, состав и окраску цемента и соотношение в породе обломков и цемента.

Описывая глину, необходимо указать следующие ее внешние признаки: цвет, причем подчеркнуть, в каком состоянии влажности описывается глина; пластичность (глина бывает жирная, пластичная, сухая и песчанистая); характер примесей, часто обусловливающих окраску; структуру; растительные остатки и окаменелости.

МИНОБРНАУКИ РФ
Уральский государственный горный университет

Н.В. Рубан, И. А. Антонова

Гидрогеология и инженерная геология

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям по дисциплине «Гидрогеология и инженерная геология» для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки»

Екатеринбург
2020

МИНОБРНАУКИ РФ

Уральский государственный горный университет

Н.В. Рубан, И. А. Антонова

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям по дисциплине «Гидрогеология и инженерная геология» для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки»

Екатеринбург

2018

Содержание

1. Основы гидрогеологической стратификации ____ *4*

2. Изучение режима подземных вод ____ *11*

3. Водные свойства горных пород ____ *14*

3.1. Определение коэффициента фильтрации глинистых и песчаных горных пород ____ **14**

3.1.1. Водопроницаемость горных пород ____ 14

3.1.2. Определение коэффициента фильтрации песчаных грунтов ____ 16

4. Химический состав подземных вод ____ *18*

4.1. Обработка результатов химического анализа подземных вод ____ **19**

4.2. Графическое изображение результатов химических анализов ____ **22**

4.3. Оценка качества питьевых вод ____ **28**

5. Построение и анализ карт гидроизогипс ____ *32*

7. Построение и анализ гидрогеологических разрезов ____ *37*

Список литературы ____ *41*

1. Основы гидрогеологической стратификации

Гидрогеологическая стратификация – это расчленение геологического разреза на элементы, существенно отличающиеся в гидрогеологическом отношении.

По Г. Н. Каменскому «гидрогеологический элемент – это некоторый объем геологической среды, выделенный на основе гидрогеологических признаков и не подвергающийся дельнейшему членению».

Главный принцип гидрогеологической стратификации основан на учете стратиграфических и гидрогеологических признаков системы «вода-порода». При этом основное расчленение геологического разреза выполняется с учетом геолого-структурных особенностей территории, а литолого-фациальный анализ рассматривается как база для определения исходных гидрогеологических свойств. По этим признакам в разрезе выделяют водонасыщенные и неводонасыщенные, водопроницаемые и водонепроницаемые слои и пласты и пр.

Гидрогеологический слой (тело) – это одновозрастные породы, характеризующиеся выдержанностью по мощности и распространению, и обладающие относительно одинаковыми фильтрационными и емкостными свойствами. Выделяют следующие типы слоев: водоносный, водоупорный, относительно водоупорный, неводонасыщенный проницаемый, слабопроницаемый, непроницаемый.

Водоносный горизонт (зона) – проницаемое гидрогеологическое тело, постоянно содержащее подземные воды и отличающееся преимущественно однородным составом пород, характером питания, транзита и разгрузки подземных вод. Водоносная зона отличается от водоносного горизонта пространственной локализацией повышенной трещиноватости (тектонической или экзогенной) и проницаемости пород.

Относительно водоносный горизонт (зона) – слабопроницаемое гидрогеологическое тело, содержащее подземные воды.

Относительно водоупорный горизонт (зона) – весьма слабопроницаемое гидрогеологическое тело, содержащее подземные воды преимущественно в связанном виде и характеризующееся замедленной, вертикальной фильтрацией при возникновении градиента напора между смежными водоносными подразделениями.

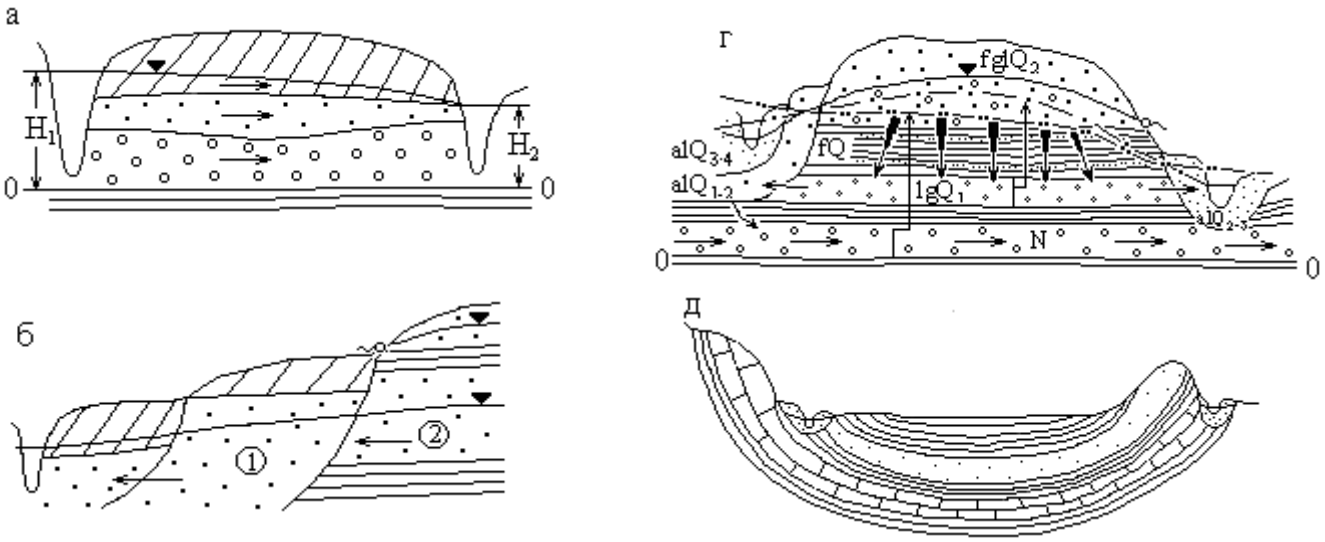
Водоупорный горизонт (зона) – практически водонепроницаемое гидрогеологическое тело.

Водоносный (относительно водоносный) комплекс – гидрогеологическое тело, состоящее из нескольких гидравлически взаимосвязанных водоносных (относительно водоносных) горизонтов или зон и разделяющих их локально или относительно водоупорных горизонтов (зон).

Водоносный этаж - система водоносных горизонтов (зон) и комплексов, характеризующаяся общими условиями водообмена и формирования подземных вод. Водоносный этаж подстилается входящим в его состав региональным водоупорным горизонтом, повсеместно развитым в границах гидрогеологической структуры.

Гидрогеологический бассейн – совокупность нескольких водоносных, водоупорных и относительно водоупорных горизонтов и (или) комплексов, характеризующихся в целом, общностью геологического развития и формирования гидродинамических, гидрохимических и гидрогеотермических процессов.

Гидрогеологическая система – совокупность нескольких гидрогеологических бассейнов, характеризующихся в целом общностью формирования ресурсов подземных вод.



Типы исходных элементов гидрогеологической стратификации (ИЭГГС) с геологической средой, представленной осадочными породами: а) водоносный горизонт неоднородного строения с грунтовыми водами; б) водоносные горизонты ①, ② с межпластовыми грунтовыми водами; в) водоносный комплекс с грунтовыми ① и напорными ② водами в четвертичных отложениях; г) междуречный бассейн с межпластовыми напорными водами в неогеновых, четвертичных отложениях и грунтовыми водами в аллювиальных и флювиогляциальных отложениях; д) артезианский бассейн с напорными водами.

Рис. 1.1. Элементы гидрогеологической стратификации

Выделение гидрогеологических элементов по условиям залегания.

Факторы, определяющие условия залегания подземных вод:

- Геологические (структурно-тектонические, литолого-фациальные и генетические типы отложений);
- Геоморфологические (тип, форма рельефа, характер и степень его эрозионной расчлененности, влияющие на условия питания и разгрузки подземных вод);
- Физико-географические или ландшафтные (определяют характер связи подземных вод с атмосферой, реками и т. п., величину питания и режим подземных вод, их запасы и ресурсы, качество).

По условиям залегания выделяют два вида подземных вод: грунтовые (безнапорные ①) и артезианские (напорные②), рис. 1.2.

По степени и характеру водонасыщенности выделены в разрезе 3 зоны: А – неполного (аэрации); Б – полного насыщения капельножидкой водой пор и трещин водовмещающих пород; и В – диссипации (где вода может находиться в диссоциированном состоянии). Для каждой зоны характерны преобладающие виды подземных вод по условиям нахождения и движения в горных породах. В зоне А – инфильтрационная и физически связанная вода, основная форма ее движения – инфильтрация (или влагоперенос). В зоне Б – свободная гравитационная вода, основная форма движения – фильтрация (или миграция подземных вод); в зоне В – физически- и химически связанная вода.

В таблице 1.1 приведена систематизация основных факторов, при анализе которых выделяются гидрогеологические системы по условиям залегания, а в таблице 1.2 приведены основные виды гидрогеологических систем с грунтовыми и напорными водами.

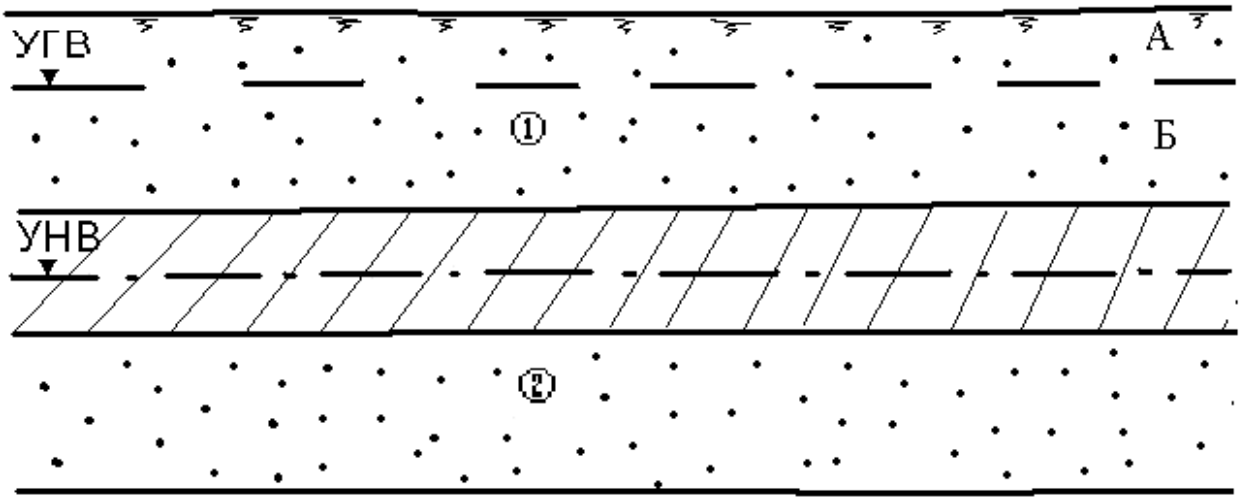


Рис. 1.2. Виды подземных вод по условиям залегания

Таблица 1.1

Факторы, определяющие выделение гидрогеологических систем в гидролитосфере по условиям залегания

Зона	Вид подземный воды	Признак				
		гидрогеологический	структурный	морфологический	литолого-генетический	гидротермодинамический
Аэрации	Инфильтрационная, физически связанная	Локальные зоны, потоки	-	-	-	Влагоперенос
Насыщения	Грунтовая (гравитационная)	Бассейны, потоки	Платформы, геосинклинали Впадины, прогибы, щиты, синклинали, антиклинали, разрывные структуры и др.	Речные долины, междуречья, конусы выноса, предгорные равнины, мелкосопочник, озы, камы	Осадочные породы, метаморфические и изверженные породы Недислоцированные, дислоцированные Терригенные, карбонатные Аллювий, пролювий, делювия	Фильтрация Миграция а) конвекция, б) гидродисперсия, в) диффузия, г) сорбция, д) растворение и др.
	Напорная (гравитационная)	Бассейны, склоны, потоки	Платформы, геосинклинали Впадины, прогибы, щиты, синклинали, антиклинали, разрывные структуры и др.	Виды складчатых структур Виды разрывных нарушений	Осадочные породы, метаморфические и изверженные породы Недислоцированные, дислоцированные Терригенные, карбонатные Аллювий, пролювий, делювия	Фильтрация Миграция а) конвекция, б) гидродисперсия, в) диффузия, г) сорбция, д) растворение и др.
	Глубинная (физически и химически связанная, свободная)	Потоки	Крупные разломы линеаменты и др.	-	Осадочные породы, метаморфические и изверженные породы	Миграция
Диссипации	мономолекулярная	- » -	Системы глобальных разломов	-	-	

Таблица 1.2

Систематизация гидрогеологических систем по условиям залегания

<table>
<tr><td>Зоны гидролитосферы</td><td>Виды подземных вод</td><td colspan="7">Виды гидрогеологических систем по условиям залегания</td></tr>
<tr><td>Неполного насыщения</td><td>Инфильтрационная, капиллярная и гравитационная</td><td colspan="7">Инфильтрующаяся вода (локальные потоки)
Зона с капиллярно-подвешенной водой
Верховодка (локальный бассейн)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Полного насыщения</td><td rowspan="2">Грунтовые (гравитационные)</td><td colspan="5">А. Грунтовые потоки и бассейны вне криолитозоны и молодой вулканической деятельности</td><td>Б. Грунтовые бассейны и потоки криолитозоны</td><td>В. грунтовые бассейны и потоки зон молодой вулканической деятельности</td></tr>
<tr><td>I. Потоки речных долин:
1) потоки в аллювии равнинных рек;
2) подрусловые потоки;
3) потоки в погребенных долинах</td><td>II. Бассейны и потоки междуречных пространств:
1) в осадочных отложениях, недисло-цированных;
2) то же, дислоцированных;
3) в изверженных и метаморфических породах;
4) то же, с зонами разломов;
5) в вулканических лавах.</td><td>III. Потоки конусов выноса, предгорных равнин:
1) поток грунтовых вод головной части конуса выноса;
2) поток грунтово-напорных вод слоистых толщ.</td><td>IV. Бассейны синклинальных структур:
1) горных сооружений;
2) мелко-сопочника.</td><td>V. Бассейны и потоки с линзами пресных вод:
1) под-песчаными;
2) под-такырными;
3) при-канальными, приречными.</td><td>С наличием зон высокотемпературных полей, гейзеров, фумарол и др. в отложениях речных долин, междуречных пространств синклинальных структур, горных сооружений</td><td>С наличием зон многолетних мерзлых пород в отложениях речных долин, междуречных пространств, синклинальных структур горных сооружений</td></tr>
</table>

Продолжение таблицы 1.2.

Зоны гидролитосферы	Виды подземных вод	Виды гидрогеологических систем по условиям залегания						
	Напорные (гравитационные)	I. Артезианские бассейны: 1) платформ; 2) меж-горных впадин, краевых прогибов; 3) наложенные бассейны; 4) бассейны горных сооружений в осадочных отложениях, лагунах, вулканогенах	II. Артезианские склоны: 1) моноклиналей; 2) асимметричных структур; 3) выклинивания.	III. Субартезианские бассейны: 1) в осадочных отложениях на щитах; 2) в осадочных породах на платформах; 3) в дислоцированных породах горных сооружений.	IV. Бассейны междуречных пространств с межпластовыми напорными водами: 1) в четвертичных ледниковых отложениях; 2) в горизонтально залегающих четвертичных и более древнего возраста осадочных отложениях.	V. Потоки напорных вод крупных разломов: 1) вне криолитозоны и молодой вулканической деятельности; 2) в криолитозоне; 3) в зоне молодой вулканической деятельности.		
Диссипации	Глубинные (химически и физически связанные, гравитационные)	Сосредоточенные потоки напорных вод систем глобальных нарушений						

2. Изучение режима подземных вод

Режим подземных вод – процесс изменения во времени основных показателей подземных вод под влиянием различных факторов в данной естественноисторической обстановке.

Основными характеристиками режима называют числовые значения, характеризующие главные морфологические особенности хронологических графиков изменения показателей режима. Хронологическими называют графики изменения уровня, расхода, минерализации, температуры подземных вод во времени. К основным характерным параметрам режима относят (рис. 2.1): амплитуде А и период Т колебаний, экстремальные точки (минимумы, максимумы), средние, минимальные, максимальные и другие значения уровня, расхода, минерализации и т. п. С помощью этих характеристик можно более компактно в числовом виде представить хронологические графики показателей режима и тем самым уменьшить объем исходной информации.

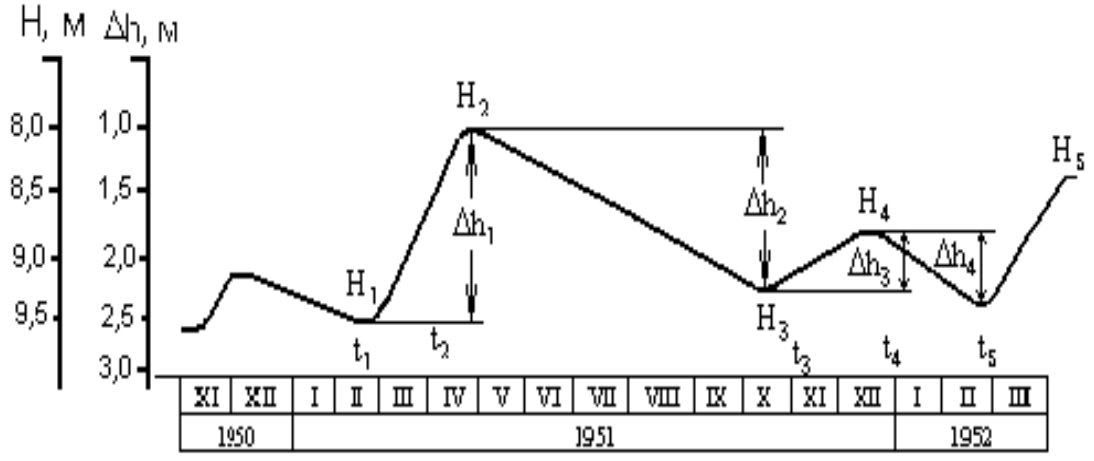


Рис. 2.1. Основные показатели сезонного изменения уровня подземных вод (по М. А. Шинкаревскому)

Определяют минимальные и максимальные значения суточных, декадных, месячных, весенних, летних, зимних, многолетних амплитуд,

подъемов, спадов (для уровней), температур, минерализации воды и других показателей режима. За эти интервалы времени вычисляют средние значения показателей:

$$П_{ñð} = \frac{\sum_{1}^{n} П_i}{n},$$

где $П._i$ – значение показателя; n – число имеющихся показателей за рассматриваемый интервал времени.

К экстремальным точкам графиков относят максимум и минимум уровня, температуры, минерализации и соответственно дату его наступления (см. рис. 2.1). Амплитуды характеризуют разность между максимальным $П_{max}$ и минимальным $П._{min}$ значениям каждого из этих показателей за выделенный период времени

$$A = П_{max} - П._{min}$$

При нарушенном режиме вычисляют характерные показатели от действия техногенных факторов, например, амплитуду многолетнего подъема уровня воды под влиянием орошения или амплитуду снижения уровня воды под влиянием откачки и т. п.

Период колебаний T характеризует интервал времени между двумя значениями какого-либо показателя режима

$$T = t_2 - t_1$$

Чаще всего это интервал между временем наступления максимального и минимального значений показателя.

Задача. В предгорной части долины реки в толще аллювиальных песчано-глинистых отложений оборудованы створ наблюдательных скважин и гидрометрический пост на реке (рис.2.2). Провести первичную обработку наблюдений, пользуясь фактическими данными (таблица 2.1). Для этого выполнить следующее:

1) построить хронологические графики колебаний уровня воды в реке и скважинах; предварительно вычислить отметки уровня воды, зная, что отметки устьев скважины равны: скв.1 – 211,7 м, скв.2 – 211,65 м, скв 3. – 211,63 м, отметка “0” на гидропосте равна 209,5 м;
2) по графикам определить основные параметры режима подземных вод;
3) установить наличие и характер связи с рекой, для этого нанести на геологический разрез (рис. 2.2) положение уровня грунтовых вод на минимальные и максимальные даты.

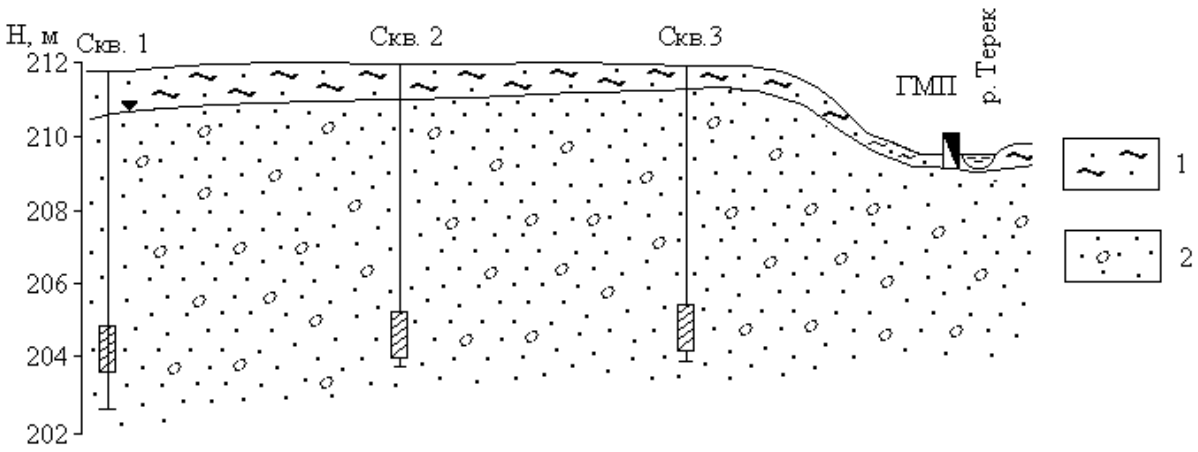


Рис. 2.2. Гидрогеологический створ в предгорной части долины р. Терека (alQ_4): 1 – супесчаный почвенный слой; 2 – гравийно-галечниковые отложения; ГМП – гидрометрический створ

Таблица 2.1

Данные наблюдений за уровнями грунтовых вод и реки

Дата наблюдений	Глубина залегания уровня от поверхности земли, м			
	Скв.1	Скв.2	Скв.3	Река

I/I 2002 г.	6,05	6.55	7.05	0.50
15/I	6,02	6.52	7.02	0.50
I/II	6,06	6.56	7.16	0.50
15/II	6,10	6.60	7.10	0.50
I/III	6,10	6.60	7.10	0.50
15/III	6,10	6.60	7.10	0.50
I/IV	6,10	6.60	7.10	0.60
15/IV	6,10	6.60	7.10	0.60
I/V	6,10	6.60	7.10	1.00
15/V	6,00	6.50	7.05	0.70
I/VI	5,90	6.40	6.90	1.00
15/VI	5,80	6.30	6.80	0.80
I/VII	5,80	6.30	6.80	1.00
15/VII	5,30	5.90	6.50	1.00
I/IX	4,50	5.00	5.90	1.00
15/IX	4,40	4.90	5.90	0.60
I/X	4,40	4.90	5.90	10.45
I/XI	4,40	4.90	6.0	0.50
15/XI	4,85	5.35	6.10	0.45
I/XII	4,90	5.40	6.13	0.50
I/I 2003 г.	5.00	5.30	6.15	0.50
15/I	5.90	6.40	6.90	0.45

3. Водные свойства горных пород

3.1. Определение коэффициента фильтрации песчаных горных пород

3.1.1. Водопроницаемость горных пород

Процесс фильтрации – это механическое движение свободной воды под действием градиента напора в порах и трещинах горных пород в условиях их полного заполнения этой водой. Водопроницаемость горных пород – это способность их пропускать через себя воду.

Водопроницаемость зависит от размера сообщающихся между собой пор и трещин в горных породах и характеризуется коэффициентом фильтрации, имеющим размерность скорости (см/с, м/с, м/сут).

Такая размерность получается из закона линейной фильтрации – закона Дарси, согласно которому количество фильтрующей воды в единицу времени

прямо пропорционально коэффициенту фильтрации $К_ф$, площади фильтрации F и гидравлическому градиенту J:

$$Q = K \cdot F \cdot J \qquad (1)$$

Разделив правую и левую части этого уравнения на F, получим

$$\frac{Q}{F} = K \cdot J, \text{ где } \frac{\text{Q}}{\text{F}} = V \qquad (2)$$

Из формулы (2) следует, что коэффициент фильтрации есть скорость фильтрации при градиенте, равном единице.

$$V = \text{К при J} = 1 \qquad (3)$$

Формулой (3) определяется скоростная размерность коэффициента фильтрации горных пород.

Следует отметить, что расчетная скорость фильтрации отличается от истинной скорости движения воды в породах, так как жидкость движется не через всю площадь, а через площадь поровых и трещинных пространств.

Величина коэффициента фильтрации зависит от физических свойств горных пород (гранулометрический состав, плотность сложения и др.).

Средние значения $К_ф$ для различных горных пород приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Классификация пород по водопроницаемости

Группа	$К_ф$, м/сут	Примеры пород
Весьма проницаемые	>100	Крупный гравий, закарстованные сильнотрещиноватые известняки, галечник с песчаным заполнителем.
Хорошо проницаемые	100 – 10	Гравийно-галечниковые отложения, крупнозернистые пески, сильнотрещиноватые породы.
Проницаемые	10 – 1	Пески разной зернистости, трещиноватые породы.
Слабопроницаемые	$1 – 10^{-1}$	Мелко- и тонкозернистые пылеватые пески, супеси, слабо трещиноватые породы.

Группа	$К_ф$, м/сут	Примеры пород
Весьма слабопроницаемые	10^{-1}- 10^{-3}	Мелкие и средние суглинки, песчаные породы.
Относительно водоупорные	10^{-3}	Средние глины, плотные суглинки.

В лабораторных условиях коэффициент фильтрации определяется с помощью специальных приборов на образцах естественного и нарушенного сложения.

3.1.2. Определение коэффициента фильтрации песчаных грунтов

Определение коэффициент фильтрации песчаных пород с помощью прибора, называющегося трубкой СпецГео, в основе работы которого лежит принцип трубки Дарси, и который дает возможность вести испытания пород при постоянном гидравлическом градиенте.

В состав трубки Спецгео входит:

1) фильтрационная трубка, состоящая из прямого цилиндра с площадью поперечного сечения 25 $см^2$ и высотой 100 мм с заостренными краями, перфорированного дна с отверстиями размером 2х2 мм и муфты с латунными сетками;
2) мерный стеклянный баллон со шкалой объемом 100 $см^3$;
3) приспособление для насыщения грунта водой и регулирования градиента напора, состоящее из подставки, подъемного винта, планки со шкалой градиентов напора от 0,1 до 1.

Последовательность определения.

1. Заполняют цилиндр испытуемым грунтом.

При испытании пород естественного сложения заостренным концом рабочего цилиндра вырезают образец грунта.

При испытании пород нарушенного сложения с высушенным до воздушно-сухого состояния грунтом проводят 2 опыта: в предельно рыхлом и предельно плотном сложении. В 1-ом случае наполнение цилиндра производится насыпанием грунта до необходимой высоты без уплотнения, во 2-ом – цилиндр наполняется слоями грунта толщиной 1-2 см с уплотнением каждого слоя трамбованием.

2. Насыщение грунта водой.

В корпус наливают воду и вращением подъемного винта поднимают подставку до упора. Устанавливают цилиндр с грунтом на подставку, медленно погружают в воду до отметки градиента напора 0,8 и оставляют его в таком положении до тех пор, пока грунт увлажнится. В процессе водонасыщения грунта поддерживают постоянный уровень воды у верхнего края корпуса. Породу водонасыщают снизу, чтобы не произошло защемление воздуха. На полное водонасыщение укажет появившаяся на поверхности грунта пленка воды.

3. После водонасыщения грунта на образец помещают латунную сетку, на цилиндр одевают муфту. Вращением винта устанавливают цилиндр с грунтом до совмещения отметки необходимого градиента напора на пленке с верхним краем крышки корпуса и доливают воду в корпус до верхнего его края.

Замеряют температуру воды, заполняют его мерный стеклянный баллон и, закрывая пальцем его отверстие, быстро опрокидывают отверстием вниз и укрепляют в муфте фильтрационной трубки так, чтоб его горлышко соприкасалось с латунной сеткой.

После установки мерного баллона в него начинают равномерно подниматься мелкие пузырьки воздуха, что указывает на начало фильтрации. Если в баллон прорываются крупные пузырьки воздуха, то его необходимо опустить глубже, добившись появления мелких пузырьков.

Отметив уровень воды в стеклянном баллоне, заметить соответствующее этому уровню время по секундомеру. Следить за скоростью фильтрации воды.

Замеры расхода воды произвести несколько раз (не менее четырех) и вычислить среднее значение.

4. Обработка результатов. Данные опыта занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Журнал для определения Кф в трубке СпецГео

№ опыта	Описание породы	Площадь поперечного сечения трубки	Градиент напора	Температура воды	Объем профильтрованной воды	Время фильтрации	$К_ф$ по отдельным замерам	Средний коэффициент фильтрации

Коэффициент фильтрации $К_{10}$, м/сут, приведенный к условиям фильтрации при температуре воды 10 ^{0}С, вычисляют по формуле:

$$K_{10} = \frac{864 \cdot V}{t \cdot A \cdot T \cdot J},$$

где V – объем профильтровавшейся воды при одном замере, см^3;

t- время фильтрации;

А – площадь поперечного сечения цилиндра с грунтом, см^2;

J - градиент напора;

$T=0,7+0,03T_ф$ – температурная поправка,

где $T_ф$ - фактическая температура воды при опыте;

864 – переводной коэффициент (из см/сек в м/сут).

4. Химический состав подземных вод

Природные воды являются растворами сложного состава и разнообразной минерализации, колеблющейся в пределах от единиц миллиграммов до сотен граммов в литре.

Формирование химического состава природных вод происходит в результате выщелачивания, испарения, конденсации, ионного обмена, поглощения и выделения газов, органической жизни и продуктов ее

деятельности и других физико-химических процессов взаимодействия вод с породами, почвами и газами. Растворяющая способность воды делает ее важнейшим агентом в геохимических процессах перераспределения элементов в земной коре.

В практике гидрогеологических работ исследование химического состава природных вод решает следующие задачи:

1. Изучение закономерностей формирования и распространения природных вод различного состава.
2. Исследование природных вод как поискового критерия на месторождения полезных ископаемых.
3. Оценка природных вод как химического сырья для получения йода, брома, бора, меди и др. веществ.
4. Оценка состава и свойств природных вод для питьевого, технического, сельскохозяйственного, лечебного и других видов использования.
5. Оценка загрязненности природных вод под воздействием антропогенных факторов.

С целью определения химического состава растворенных в воде веществ производят химический анализ воды.

В зависимости от задач и целей исследований полнота и характер анализа могут быть различными. В практике применяются общие, сокращенные и специальные анализы воды, производимые в полевых и стационарных условиях.

4.1. Обработка результатов химического анализа подземных вод

Ионно-солевой состав воды принято выражать в виде содержания в воде отдельных ее компонентов ионов.

Результаты химического анализа вод могут быть представлены в различных формах. Различают ионно-весовую, эквивалентную и процент-эквивалентную формы выражения химических анализов.

Ионно-весовая форма – основная форма выражения результатов анализа, представляет собой выражение ионно-солевого состава подземных вод в виде

весовых количеств отдельных ионов в миллиграммах или граммах на 1 л воды, а для минерализованных вод и рассолов – на 1 кг воды.

Однако, для полной характеристики свойств воды ионная форма выражения анализа недостаточна. Поэтому наряду с ионной формой пользуются мг/экв формой выражения анализа, наиболее полно отражающей внутреннюю химическую природу входящих в состав воды веществ и ее важнейшие свойства.

Эквивалентная форма основана на том положении, что ионы в растворе реагируют между собой не в равных весовых количествах, а в эквивалентных количествах, зависящих от массы иона и их валентности. Эквивалентным весом иона называется частное от деления его ионной массы на валентность, например: эквивалент Na^+ равен 23/1; Cl^- - 35,5/1; Ca^{2+} - 40/2. Следовательно, при реакции реагируют на 1 г Na с 1 граммом Cl^-, а 1 эквивалент Na^+ с 1 эквивалентом Cl^-.

Для перехода от ионно-весовой формы к мг/экв–форме необходимо число миллиграммов каждого иона разделить на его эквивалентный вес, или умножить на коэффициент, представляющий величину, обратную эквивалентному весу. В таблице 4.1. представлены пересчетные коэффициенты для наиболее распространенных в подземных водах ионов.

Таблица 4.1

Таблица эквивалентных масс и пересчетных коэффициентов

Анионы А	Эквивалентная масса	Пересчетный коэффициент	Катионы К	Эквивалентная масса	Пересчетный коэффициент
Cl^-	35,457	0,02820	Na^+	22,997	0,04348
SO_4^{2-}	48,033	0,02082	K^+	39,098	0,02558
HCO_3^-	61,018	0,01639	Mg^{2+}	12,160	0,08224
CO_3^{2-}	30,005	0,03333	Ca^{2+}	20,040	0,04990
NO_2^-	46,008	0,02174	NH_4^+	18,040	0,05543
NO_3^-	62,008	0,01613	Fe^{2+}	27,925	0,03581
PO_4^{3-}	31,658	0,03159	Fe^{3+}	18,617	0,05371

Если содержание какого-либо иона выражают в эквивалентной форме, то перед символом ставят знак “r” (реагирующая величина).

Согласно правилу Фрезениуса, все химические соединения, растворенные в водном растворе, реагируют между собой в эквивалентных количествах, т. е.

$$\Sigma rK = \Sigma rA$$

Практически в полном анализе, когда все ионы определены аналитически, точного совпадения цифр ввиду погрешностей анализа не бывает.

Для сопоставления химического состава природных вод различной минерализации и более ясного представления о соотношениях между ионами одной и той же воды проводится пересчет результатов анализа воды в % - эквивалентную форму.

Для вычисления %-экв принимают сумму мг·экв анионов (ΣrA), содержащихся в 1л воды за 100% и вычисляют процент содержания каждого аниона в мг·экв по отношению к этой сумме. Аналогично поступают и с катионами:

$$\%-экв\underset{(илиК)}{A} = \frac{100 \cdot rA(илиК)}{\sum rA(илиК)}$$

Результат анализа ионов, выраженный в различных формах, представляют в виде таблицы 4.2:

Таблица 4.2

Пример выражения результатов химического анализа воды

Катионы	Содержание			Анионы	Содержание		
	мг/л	мг-экв/л	%-экв/л		мг/л	мг-экв/л	%-экв/л
Na^+	78	3,39	34	Cl^-	125	3,53	36
K^+	9	0,23	2	SO_4^{2-}	83	1,73	17
Ca^{2+}	89	4,44	44	NO_3^-	5	0,08	1
Mg^{2+}	24	1,97	20	HCO_3^-	282	4,62	46
Итого pH=7,6	200	10,03	100	Итого	495	9,96	100

Определение общей минерализации. Для определения общей минерализации находят сумму миллиграммов всех ионов, молекул и других соединений, содержащихся в воде согласно выполненному анализу. О

величине общей минерализации можно судит по сухому, или плотному остатку, полученному после выпаривания воды. Растворенные газы, летучие соединения, в том числе органические вещества, при выпаривании и высушивании улетучиваются, но могут идти процессы гидролиза и образования кристаллогидратов. Все это может приводить к значительным погрешностям в определении сухого остатка. Расхождение между экспериментальным определением сухого остатка и расчетной величиной общей минерализации не должно превышать 3 %.

Определение видов жесткости воды. Общая жесткость определяется как сумма миллиграмм-эквивалент в 1 л ионов Ca^{2+} и Mg^{2+}, карбонатная – как величина иона HCO_3^-, связанного с Ca^{2+} и Mg^{2+}. В случае, когда количество иона HCO_3^- превышает суммарное содержание ионов Ca^{2+} и Mg^{2+}, вся жесткость считается карбонатной. Постоянную жесткость воды определяют как разницу между общей и карбонатной.

4.2. Графическое изображение результатов химических анализов

Формула Курлова (или формула состава воды) - прием наглядного изображения химического состава природной воды. Эта формула представляет собой псевдодробь, в числителе которой в убывающем порядке записывают процент-эквивалентное содержание анионов, в знаменателе катионов.

Перед дробью сокращенно указывают величину минерализации (М) в г/л с точностью до одного десятичного знака, и компоненты (в том числе и газы), придающие воде специфические свойства (CO_2, H_2S, Br, Y, радиоактивность и др.). Справа от дроби указывают показатели, характеризующие Eh, pH, T (ºC), при наличии данных – дебит Q скважины или источника в $м^3$/сут.

Ионы, присутствующие в количествах менее 10 %-экв/л в форму не вносят.

В наименование состава воды включаются анионы и катионы, содержание которых превышает 25 %-экв/л. Наименование состава воды дается в следующем порядке: по минерализации, по анионному, затем по катионному составу (в

порядке увеличения), по специфическим компонентам, по величине pH, по температуре.

В качестве примера рассмотрим формулу состава воды для приведенного выше результата химического анализа подземных вод.

$$M0,7\,\frac{HCO_3\,46Cl36SO_4\,17}{Ca44Na34Mg\,20}\,pH7,6$$

Т. е. вода хлоридно-гидрокарбонатная натриево-кальциевая пресная, слабощелочная.

Существуют графические способы выражения химического состава природных вод, которые позволяют на небольшой по размерам схеме показать результаты сотен анализов. Рассмотрим 2 из них: метод треугольных координат и график–квадрат Толстихина.

Метод треугольных координат (графики-треугольники Фере). Применение равносторонних треугольников для отображения химического состава природных вод основано на общеизвестном их свойстве: общая длина перпендикуляров, восстановленная из любой точки равностороннего треугольника на его стороны, является величиной постоянной, т. е. перпендикуляры из каждой точки треугольника могут служить координатами (рис. 4.1).

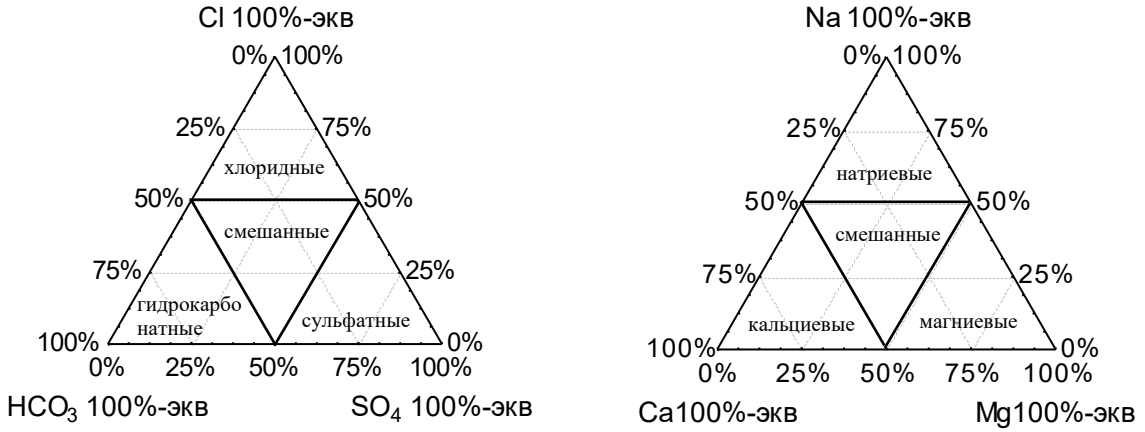
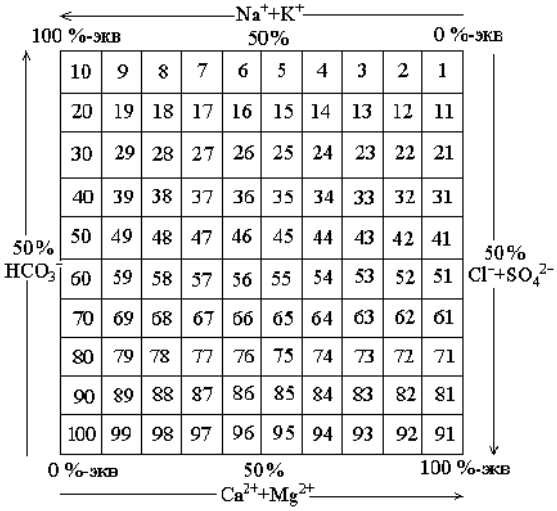


Рис. 4.1. Графическая систематизация химических анализов подземных вод по треугольникам Фере

Графики-треугольники Фере составляются отдельно для катионов и анионов, содержание которых дается в %-экв/л. В вершинах треугольников содержание ионов составляет 100 %-экв/л. Каждая сторона треугольника делится на 10 равных частей по 10 %-экв. Положение анализов определяется пересечением 3-х линий, параллельных основаниям треугольника.

Группировка анализов в вершинах треугольников указывает на преобладание в водах соответствующих ионов; в средней части располагаются смешанные по составу воды. Графики-треугольники дают возможность определения соотношений каждого иона, но сопоставление анализов затрудняется разобщенным изображением анионов и катионов.

График-квадрат Н. И. Толстихина. График-квадрат представляет собой квадрат, каждая сторона которого разделена на 10 равных частей – по 10 %-экв. По горизонтальным сторонам квадрата наносят количество катионов (%-экв), по вертикальным – количество анионов. На левой стороне квадрата сверху вниз откладывается эквивалентное содержание сумы ионов $Cl^-+SO_4^{2-}$; на правой - соответственно, снизу вверх HCO_3^-; на верхней стороне слева направо - $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ и тяжелые металлы (Me), внизу - Na^++K^+. Положение анализа на квадрате отмечается точкой и определяется пересечением 2-х осей координат (рис. 4.2).



10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
40	39	38	37	36	35	34	33	32	31
50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
60	59	58	57	56	55	54	53	52	51
70	69	68	67	66	65	64	63	62	61
80	79	78	77	76	75	74	73	72	71
90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
100	99	98	97	96	95	94	93	92	91

Рис. 4.2. Графическая систематизация химических анализов подземных вод по квадрату Н. И. Толстихина

Группировка анализов в вершинах квадрата указывает на преобладание химического состава воды: если точка находится в верхнем правом углу квадрата, вода, как правило, имеет гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав; если в левом верхнем углу – гидрокарбонатный натриевый. В левом нижнем углу сосредоточены преимущественно хлоридные и сульфатные натриевые воды, а в правом нижнем – хлоридно-сульфатные магниево-кальциевые, в центре – смешанные по составу воды.

Недостатком использования графиков-квадратов является суммарное изображение ионов Cl^- и SO_4^{2}, Ca^{2+} и Mg^{2+}.

Задание. Обработать химический анализ подземный воды, приведенный в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Результаты химических анализов воды

№ п.п.	Водопункт	Температура воды, ^0C	pH	Своб. CO_2, мг/л	Сухой ост., мг/л	Анионы, мг/л				Катионы, мг/л			Примечание
						CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	
1.	Скважина 1	8	7,2	0,8	298	-	115,9	107,4	8,9	12,9	52,1	15,2	NO_3 –1.4 мг/л
2.	Скважина 2	7	7,7	15,0	328	-	158,6	118,8	5,3	16,0	66,1	14,6	
3.	Скважина 3	6	7,1	49,5	278	-	134,2	71,1	7,1	8,5	50,1	12,1	$Fe_{общ}$ - 0,2 мг/л
4.	Шахтный водоотлив	15	7,8	21,0	3394	348,1	2041,0	4,1	585,0	1364,0	9,0	23,1	NO_3 -3,3 мг/л $Fe_{общ}$ – 0,2 мг/л
5.	Скважина 4	5	8,5	57,0	468	3,0	94,6	258,4	5,3	19,1	73,2	32,8	NO_2 – 0,02 мг/л NO_3 – 0,2 мг/л
6.	Скважина 5	7	7,3	1,6	798	-	405,7	261,2	24,8	170,1	50,1	36,4	NO_3 – 7,0 мг/л
7.	Шахтный водоотлив	10	7,6	33,3	1062	42,0	610,2	174,4	120,6	300,7	23,1	52,3	NO_3 –7,5 мг/л
8.	Скважина 6	8	7,7	88,0	211	-	58,0	93,4	10,6	9,4	30,1	15,8	NO_3 – 0,9 мг/л
9.	Шахтный водоотлив	13	7,3	12,4	3184	9,0	485,1	1564,7	280,1	465,3	244,5	198,2	NO_3 – 1,8 мг/л NO_2 – 1,2 мг/л
10.	Скважина 7	10	7,7	43,7	688	12,0	201,3	179,7	152,4	104,8	70,1	44,9	NO_3 – 0,9 мг/л
11.	Шахтный водоотлив	12	7,6	31,5	3164	24,0	521,7	811,8	921,8	826,5	86,2	149,6	NO_3 – 0,5 мг/л
12.	Скважина 8	9	7,1	8,8	390	-	67,1	206,1	7,1	14,9	62,1	21,8	NO_3 – 1,2 мг/л NH_4 –1,2 мг/л
13.	Скважина 9	9	7,1	19,2	332	-	259,3	68,8	7,5	16,3	70,1	20,6	NO_3 –1,8 мг/л Fe –0,9 мг/л

Продолжение табл. 4.3

№ п.п.	Водопункт	Температура воды, ^0C	pH	Своб. CO_2, мг/л	Сухой ост., мг/л	Анионы, мг/л				Катионы, мг/л			Примечание
						CO_3^{2-}	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	$Na^+ + K^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	
14.	Шахта	14	7,7	10,5	2078	66,0	744,4	161,7	657,8	703,0	28,1	53,5	NO_3 – 4,0 мг/л
15.	Скважина 10	10	8,3	22,4	328	6,0	137,3	115,6	7,1	11,3	66,1	15,2	
16.	Скважина 11	8	7,9	38,9	447	-	94,6	245,7	7,1	9,4	75,2	31,6	NO_3 – 1,2 мг/л NH_4 – 2,0 мг/л
17.	Скважина 12	7	8,1	71,8	489	-	85,4	256,0	12,4	27,1	80,2	27,3	NO_3 -22,5 мг/л Fe –5,7 мг/л
18.	Скважина 13	8	8,0	13,3	304	-	125,1	104,1	14,2	29,9	56,1	7,9	NO_3 – 8,0 мг/л
19.	Шахта	13	7,3	46,0	1056	-	317,2	385,4	145,3	159,3	116,2	55,3	NO_3 – 1,2 мг/л
20.	Шахта	14	7,4	11,0	1250	-	283,7	503,6	138,2	143,4	134,2	74,1	NO_3 –0,5 мг/л
21.	Скважина 14	9	7,5	78,5	438	-	140,3	216,3	10,6	18,6	86,1	24,3	
22.	Шахта	13	7,9	28,0	1842	-	-	291,8	850,9	537,3	58,1	45,0	NH_4 –0,7 мг/л Fe –2,0 мг/л
23.	Скважина 15	10	6,4	21,1	617	-	30,5	393,4	7,1	19,8	78,2	49,8	NO_3 – 1,5 мг/л NH_4 – 1,0 мг/л Fe – 1,7 мг/л
24.	Скважина 16	8	7,1	36,5	295	-	36,6	141,1	26,6	18,8	47,1	15,2	NO_3 – 8,0 мг/л
25.	Скважина 17	9	7,6	15,4	367	-	244,0	1,0	9,0	46,3	35,3	6,0	

4.3. Оценка качества питьевых вод

При оценке подземных вод для питьевого водоснабжения пользуются следующими нормативными документами: ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая», СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».

Согласно этим документам, питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства.

Безопасность воды в эпидемическом отношении определяют ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям, представленным в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Микробиологические и паразитологические показатели качества воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы
Термотолерантные колиформ-ные бактерии (ТТКБ)	число бактерий в 100 мл	отсутствие
Общие колиформные бактерии (ОКБ)	число бактерий в 100 мл	-”-
Общее микробное число (ОМЧ)	число образующих колоний бактерий в 1 мл	не более 50
Колифаги	число бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл	отсутствие
Споры сульфитредуцирующих клостридий	число спор в 20 мл	отсутствие
Цисты лямблий	число цист в 50 л	отсутствие

Безвредность питьевой воды по химическому составу определяется ее соответствием нормативам по:

- обобщенным показателям и содержанию вредных химических веществ, наиболее часто встречающихся в природных водах на территории Российской Федерации, а также веществ антропогенного происхождения, получивших глобальное распространение (таблица 4.5);
- содержанию вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки в системе водоснабжения (таблица 4.6);

- содержанию вредных химических веществ, поступающих в источники водоснабжения в результате хозяйственной деятельности человека (приложение 2 СанПиНа 2.1.1074-01).

Таблица 4.5

Обобщенные показатели и содержания вредных химических веществ в природных водах

Показатели	Ед. изм.	Нормативы (предельно-допустимые концентрации (ПДК), не более	Показатель вредности*	Класс опасности
Обобщенные показатели				
Водородный показатель	Ед. pH	в пределах 6-9		
Общая минерализация (сухой остаток)	мг/л	1000 (1500)**		
Жесткость общая	мг-экв/л	7,0 (10)**		
Окисляемость перманганатная	мг/л	5,0		
Нефтепродукты, суммарно	мг/л	0,1		
Поверхностно-активные вещества (ПАВ), анионоактивные	мг/л	0,5		
Фенольный индекс	мг/л	0,25		
Неорганические вещества				
Алюминий (Al^{3+})	мг/л	0,5	с.-т.	2
Барий (Ba^{2+})	-“-	0.1	-“-	2
Бериллий (Be^{2+})	-“-	0,0002	-“-	1
Бор (B, суммарно)	-“-	0,5	-“-	2
Железо (Fe, суммарно)	-“-	0,3 (1,0)**	орг.	3
Кадмий (Cd суммарно)	-“-	0,001	с.-т.	2
Марганец (Mn, суммарно)	-“-	0,1 (0,5)**	орг.	3
Медь (Cu, суммарно)	-“-	1,0	-“-	3
Молибден (Mo, суммарно)	-“-	0,25	с.-т.	2
Мышьяк (As, суммарно)	-“-	0,05	-“-	2
Никель (Ni, суммарно)	-“-	0,1	-“-	3
Нитраты (по NO_3^-)	-“-	45,0	орг.	3
Ртуть (Hg, суммарно)	-“-	0,0005	-“-	1
Свинец (Pb, суммарно)	-“-	0,03	-“-	2
Селен (Se, суммарно)	-“-	0,01	-“-	2
Стронций (Sr^{2+})	-“-	7,0	-“-	2
Сульфаты (SO_4^{2-})	-“-	500	орг.	4
для климатических районов				
- I и II	-“-	1,5	с.-т.	2
- III	-“-	1,2	-“-	2

Продолжение табл. 4.5.

Показатели	Ед. изм.	Нормативы (предельно-допустимые концентрации (ПДК), не более	Показатель вредности*	Класс опасности
Хлориды (Cl^-)	-“-	350	орг.	4
Хром (Cr^{6+})	-“-	0,05	с.-т.	3
Цианиды (CN^n)	-“-	0,035	-“-	2
Цинк (Zn^{2+})	-“-	5.0	орг.	3
Органические вещества***				
γ-ГХЦГ (линдан)	-“-	0,002	с.-т.	1
ДДТ (сумма изомеров)	-“-	0,002	-“-	2
2,4-Д	-“-	0,03	-“-	2

Примечание: * - *лимитирующий признак вредности вещества, по которому установлен норматив: «с.-т.» - санитарно-токсикологический, «орг.» - органолептический;* ** - *величина, указанная в скобках, может быть установлено по постановлению главного государственного санитарного врача по соответствующей территории для конкретной системы водоснабжения на основании оценки санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки;* *** - *нормативы приняты в соответствии с рекомендациями ВОЗ.*

Таблица 4.6

Содержание вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки в системе водоснабжения

Показатели	Ед. изм.	Нормативы (предельно-допустимые концентрации (ПДК), не более	Показатель вредности	Класс опасности
Хлор				
- остаточный свободный	мг/л	в пределах 0,3-0,5	орг.	3
- остаточный связанный	-“-	в пределах 0,8-1,2	-“-	3
Хлороформ (при хлорировании воды)	-“-	0,2	с.-т.	2
Озон остаточный	-“-	0,3	орг.	
Формальдегид (при озонировании воды)	-“-	0,05	с.-т.	2
Полиакриламид	-“-	2,0	-“-	2
Активированная кремнекислота (по Si)	-“-	10	-“-	2
Полифосфаты (по PO_4^{3-})	-“-	3,5	орг.	3
Остаточные количества алюминий- и железосодержащих коагулянтов	-“-	см. показатели «Алюминий» и «Железо» таблицы 4.5		

При обнаружении в питьевой воде нескольких химических веществ, относящихся к 1 и 2 классам опасности и нормируемых по санитарно-токсикологическому признаку вредности, сумма отношений обнаруженных концентраций каждого из них в воде к величине его ПДК не должна быть больше 1. Расчет ведется по формуле:

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + ... + \frac{C_n}{ПДК_n} \leq 1$$

Благоприятные органолептические свойства воды определяются ее соответствием нормативам, указанным в таблице 4.7, а также нормативам содержания веществ, оказывающих влияние на органолептические свойства воды, приведенным в табл. 4.5 и 4.6 и в Приложении 2 СанПиН 2.1.4.1074-01.

Таблица 4.7

Нормируемые значения показателей органолептических свойств воды

Показатели	Единицы измерения	Норматив, не более
Запах	баллы	2
Привкус	-“-	2
Цветность	градусы	20 (35)*
мутность	ЕМФ (единицы мутности по формазину) или мг/л (по каолину)	2,6 (3,5)* 1,5 (2,0)*

Примечание: * - *величина, указанная в скобках, может быть установлена по постановлению главного государственного санитарного врача по соответствующей территории для конкретной систему водоснабжения на основании оценки санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки.*

Не допускается присутствие в питьевой воде различимых невооруженным глазом водных организмов и поверхностной пленки.

Радиационная безопасность питьевой воды определяется ее соответствием нормативам по показателям общей α и β-активности, представленным в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Нормируемые показатели общей α и β-активности питьевой воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы	Показатель вредности
Общая α-активность	Бк/л	0,1	радиац.
Общая β-активность	Бк/л	1,0	- « -

5. Построение и анализ карт гидроизогипс

Грунтовые воды - подземные воды первого от поверхности постоянно существующего водоносного горизонта, залегающего на первом выдержанном водоупорном пласте.

Форма поверхности грунтовых вод определяется водопроницаемостью пород, условиями питания водоносного горизонта, конфигурацией берегов рек, к которым стекают грунтовые воды, понижением водоупора, мощностью водоносного пласта и т. д.

О форме их поверхности можно судить по карте изогипс.

Гидроизогипсами называют линии, соединяющие точки одинаковой абсолютной высоты поверхности грунтовых вод, или иначе - это линии - горизонтали зеркала грунтовых вод.

Для построения карты изогипс пользуются данными замеров глубин залегания уровней грунтовых вод в скважинах, шурфах, колодцах, горных выработках, отметками источников, сведениями водомерных постов на поверхностных водоемах.

Так как уровень грунтовых вод постоянно изменяется под влиянием различных природных и искусственных факторов, все данные, используемые при построении карт изогипс, должны быть взяты на одну дату, т. е. получены по одновременным замерам всех точек наблюдения, поэтому карты изогипс всегда датируются.

Карты изогипс составляют в масштабах от 1:10000 до 1:200000 в зависимости от характера и стадии гидрогеологических исследований. Сечение гидроизогипс выбирают в зависимости от принятого масштаба карты, пустоты пунктов наблюдений за уровнем грунтовых вод, уклона их поверхности. Обычно берут сечения 0,5, 1, 2, 5 и более м.

Глубина залегания грунтовых вод в каждой точке замера пересчитывается на абсолютные или относительные отметки:

$$H_в = H_з - h,$$

где $H_в$ - абсолютная отметка уровня грунтовых вод;

$H_з$ - абсолютная отметка поверхности земли;

h - глубина залегания подземных вод.

Вычисленные отметки уровня грунтовых вод наносятся на топографическую основу и методом интерполяции строят изогипсы.

Наиболее удобно интерполировать отметки по способу треугольников: все точки, по которым производятся замеры, соединяют линиями, образующими треугольники. При интерполяции этим методом должны соблюдаться следующие правила:

Линии, образующие треугольники, необходимо проводить так, чтобы длинная сторона была перпендикулярна к направлению падения потока.

Нельзя интерполировать точки, расположенные по разные стороны поверхностных водотоков и водоемов. При наличии таких водотоков определять отметки урезов рек по водомерным постам и использовать их при интерполяции как точки выхода грунтовых вод на урезе реки (предварительно должен быть проанализирован характер дренирования грунтовых вод).

Не следует проводить интерполяцию между грунтами скважин, расположенных далеко друг от друга. Лучше проводить интерполяцию для каждой группы скважин отдельно, иначе можно исказить действительную форму поверхности грунтового потока.

При интерполяции удобно пользоваться палеткой на кальке в виде масштабной сетки, состоящей из системы параллельных линий, проведенных на расстоянии 2 - 5 мм. С помощью масштабной сетки пропорционально делят отрезки, соединяющие точки, отметки уровня которых подлежат интерполяции. После интерполяции соединяют точки с одинаковыми отметками; эти кривые и будут гидроизогипсами.

Необходимо отметить, что грунтовый поток обычно разбивается реками и поверхностными водоемами на отдельные, более мелкие потоки. Поэтому не следует интерполировать точки, расположенные по разные стороны поверхностных водотоков и водоемов. При наличии таких водотоков необходимо определять отметки урезов рек по водомерным постам и использовать их при интерполяции как точки выхода грунтовых вод на урезе реки.

Кроме карт гидроизогипс для целей проектирования и строительства могут составляться карты глубин залегания поверхности грунтовых вод, или карты гидроизобат. **Гидроизобатами** называют линии, соединяющие точки с одинаковыми глубинами залегания грунтовых вод. Карты гидроизобат, так же как и гидроизогипс, строят методом интерполяции глубин залегания уровня грунтовых вод.

Чаще всего для решения различных практических задач, карты гидроизогипс и гидроизобат составляют на одной и той же топографической основе.

Анализ карт гидроизогипс позволяют составить краткую гидрогеохимическую характеристику участка. По карте гидроизогипс можно определить:

- Направление движения грунтовых вод на заданном участке.
- Глубину залегания грунтовых вод в любой точке или на любом участке.
- Уклон грунтового потока.

- Характер взаимосвязи грунтовых вод с поверхностными.
- Условия питания и разгрузки подземных вод.

Направление движения грунтовых вод определяется по нормам к 2-м смежным гидроизогипсам. Движение воды направлено от более высоких отметок уровня к более низким.

Глубину залегания грунтовых вод в любом заданном пункте определяют по разности отметок горизонтами рельефа и гидроизогипсы.

Уклон потока подземных вод (J) определяется для любого заданного участка карты делением сечения карты гидроизогипс на кратчайшие расстояния между двумя гидроизогипсами, взятые в масштабе карты:

$$J = \frac{H_1 - H_2}{L}$$

где H_1 и H_2 – отметки уровня грунтовых вод в двух точках;

L – расстояние между этими точками в масштабе карты.

Для определения уклона грунтового потока выбирается участка с наиболее равномерным и прямолинейным распределением гидроизогипс.

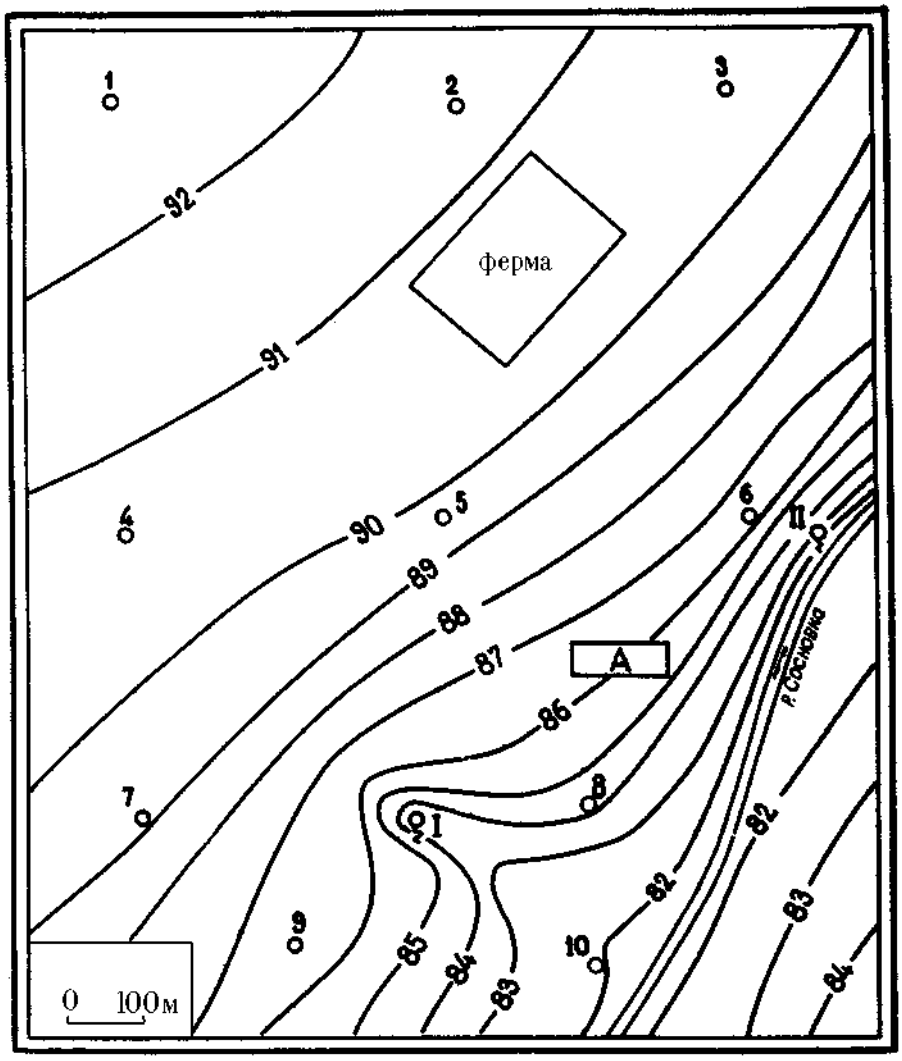
Связь грунтовых вод с поверхностными определяется по характеру сопряжения гидроизогипс с водоемами; если грунтовый поток направлен к реке, то он дренируется ею, если потоку грунтовых вод направлен от реки – река дренируется грунтовыми водами.

По соотношению и характеру изменения гидроизогипс могут быть выделены водоразделы подземных вод, участки их питания и разгрузки.

Участки замкнутых гидроизогипс с высокими отметками указывают на положение водоразделов грунтовых вод, где условия питания наиболее благоприятны.

Зоны с нулевой глубиной до воды указывают на участки выхода подземных вод на поверхность земли.

Задание. Построить карту гидроизогипс на топографической основе заданного масштаба, используя данные таблицы 5.1.



Данные для построения карты гидроизогипс:

№ скважины	Абсолютная отметка устья скважины, м	Глубина залегания грунтовых вод, м	Абсолютная отметка зеркала грунтовых вод, м
1		5,2	
2		4,5	
3		4,3	
4		5,0	
5		4,1	
6		2,0	
7		4,0	
8		1,0	
9		2,6	
10		0,5	

Необходимо:

1. Пользуясь приведенными данными по буровым скважинам, шурфам, колодцам, источникам и водомерному посту на реке – провести на карте гидроизогипсы через 1 м.
2. Определить направление движения подземных вод, показать его стрелками на карте, на характерных участках определить гидравлический уклон потока.
3. Определить по карте, на какой глубине можно встретить подземные воды, выделить зоны с различной глубиной (до 1 м, 1-3 м, 3-6 м, 6 м).
4. Охарактеризовать условия питания и разгрузки подземных вод.
5. Определить характер взаимосвязи реки и подземных вод, выявить влияние оврагов на поверхность подземных вод.

6. Построение и анализ гидрогеологических разрезов

Гидрогеологические разрезы – широко применяемая форма графической обработки и обобщения информации, разрезы характеризуют гидрогеологические условия территории в вертикальном разрезе.

Гидрогеологические разрезы характеризуют условия залегания и приуроченность подземных вод к различным горным породам, их связь с поверхностными водами, положение уровня подземных вод.

Построение разрезов выполняется в следующей последовательности:

1) выбирается наиболее информативный участок, где линия разреза пересекает различные геоморфологические элементы, зоны разломов, долины рек;
2) выбирается горизонтальный и вертикальный масштабы разреза. Горизонтальный масштаб должен соответствовать масштабу карты, вертикальный масштаб должен обеспечить четкое изображение

условий залегания и взаимосвязи водоносных горизонтов и комплексов, рек и т. п.;

3) строится гипсометрический профиль, на котором вертикальными линиями показывается местоположение скважин, отметки их устья и забоя, показывается рельеф поверхности земли. По данным бурения строят геолого-литологические колонки, проводят геологические и литологические границы пород, зоны разломов. Наносят положение уровня подземных вод по замерам в скважинах, колодцах, шурфах, источниках и др. На основании гидрогеологических данных выделяют водоносные горизонты и комплексы, разделяющие их водоупоры, указывают интервалы опробования, количественные показатели изученных свойств.

Для построения разреза необходимы топографическая карта, геологический и геоморфологический профили по выбранному направлению, геолого-литологические колонки скважин, шурфов и других выработок, находящихся на линии разреза или вблизи него, результаты наблюдений за уровнем подземных вод в скважинах, колодцах и др. выработках, результаты наблюдений на гидрометрических постах, специализированные исследования в скважинах и т. п.

Гидрогеологические разрезы анализируют в следующем порядке:

1. Устанавливают водоносные горизонты, условия их залегания, состав пород и данные об уровнях подземных и поверхностных вод.
2. Определяют мощность водоносного пласта как разность отметок его кровли и подошвы, величину напора над кровлей как разность отметок между пьезометрическим уровнем и кровлей пласта. Зоны, где поверхность земли располагается ниже пьезометрической кривой, выделяют как участки возможного самоизлива. Глубина безнапорных подземных вод определяется как разность отметок поверхности земли и уровня подземных вод, мощность - разностью отметок зеркала

подземных вод и водоупорной подошвой водоносного пласта; определяют мощность и строение зоны аэрации, устанавливают наличие относительно водоупорных прослоев в зоне аэрации, т. к. на них может формироваться верховодка, возможно создание и зон местного напора.

3. Характеризуют условия движения подземных вод; направление, уклон потока на разных участках.
4. Выделяют вид, условия питания и разгрузки подземных вод, местоположение областей питания и разгрузки.
5. Устанавливают характер и интенсивность взаимосвязи между водоносными горизонтами из литолого-фациального анализа разреза и соотношений напоров смежных водоносных горизонтов, характера изменения этих соотношений по разрезу.

Задание. Построить гидрогеологический разрез по карте гидроизогипс, используя данные таблицы 6.1.

Таблица 6.1

Данные бурения, необходимые для построения гидрогеологического разреза по линии 1- 11 по карте гидроизогипс

№ слоя (сверху вниз)	Мощность слоя, м	Геолог. индекс	Литологическая характеристика пород	Глубина выработки, м
			скважина 1	20
1	4,8	Q_{IV}	суглинок делювиальный, водонепроницаемый	
2	14,0	Q_{IV}	песок аллювиальный, разнозернистый	
3	1,2	Q_{III}	глина плотная	
			скважина 4	18
1	2,4	Q_{IV}	суглинок делювиальный, водонепроницаемый	
2	12,6	Q_{IV}	песок аллювиальный, разнозернистый	
3	3,0	Q_{III}	глина плотная	
			скважина 9	15
1	1,3	Q_{IV}	суглинок делювиальный, водонепроницаемый	
2	9,6	Q_{IV}	песок аллювиальный, разнозернистый	
3	4,1	Q_{III}	глина плотная	
			Скважина 10	3
1	3,0	Q_{IV}	песок аллювиальный, разнозернистый	
			Скважина 11	10
1	6,8	Q_{IV}	песок аллювиальный, разнозернистый	
2	3,2	Q_{III}	глина плотная	

Примечание: скважина 11 намечается произвольно, на противоположном берегу, в нижнем правом углу карты на 84 горизонтали рельефа.

Список литературы

1. Гавич И. К., Лучшева А. А., Семенова-Ерофеева С. М. Сборник задач по общей гидрогеологии Уч. пос. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985, 412 с.
2. Гореев П. В., Шемелина В. А., Шулякова О. К. Руководство к практическим занятиям по гидрогеологии: Уч. пос. для учащихся гидрогеологических специальностей геологоразведочных техникумов. М., Высш. школа, 1981, 152 с.
3. ГОСТ 25584-90. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации.
4. ГОСТ 9.602-89. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.
5. Кирюхин В. А., Коротков А. И., Павлов А. Н. Общая гидрогеология: Учебник для вузов. Л.: Недра, 1988, 359 с.
6. Методические разработки для лабораторных и практических работ по курсам «Гидрогеология» и «Инженерная геология» для специальностей 0108; 0101; 0105; и «Гидрогеология с основами инженерной геологии» для специальностей 0209; 0202; 0206. Часть 1. Свердловск, изд. СГИ, 1980, 45 с.
7. Основные положения по составлению серийных легенд государственных гидрогеологических карт масштаба 1:200000 и 1:1000000. М.: МПР РФ, 2001, 15 с.
8. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«ФИЗИКА ГОРНЫХ ПОРОД»

специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Земцов Н.С. к.г.-м.н.

Екатеринбург
2020

Петрофизика-это одна из наук о Земле, изучающая физичекие свойства минералов, горных пород и руд. Целью изучения
петрофизических характеристик является установление состава,
структуры и состояния пород, особенностей дифференциации физических свойств горных пород, околорудных зон и полезных ископаемых
при решении задач поисков и разведки МШИ, геологического картирования, геотектоники, геодинамики, инженерной геологии геологии.

Петрофизические исследования позволяют обосновать возможность применения отдельных геофизических методов и комплекса геофизических исследований. Наряду с этим петрофизика позволяет решать широкий класс задач прикладного и теоретического характера,
от изучения состава и генезиса рудных и акцессорных минералов
(магнитная минералогия, петрофизика полупроводниковых минералов)
до опробования полезных ископаемых (скважинная и шахтная геофизика), от стратиграфии осадочных комплексов (палеомагнитология)
до прогнозирования состояния вещества в глубинных частях Земли
(экспериментальная и теоретическая петрофизика).

Современная петрофизика изучает широкий спектр Физических
свойств минералов, горных пород и полезных ископаемых:
коллекторские (пористость, проницаемость, влажность, влагоемкость, нефте - и газонасыщенность), плотностные, магнитные (магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность, температура
Кюри), электрические (Удельное сопротивление, диэлектрическая
проницаемость, вызванная поляризация, диффузионно-адсорбционная
активность, терма—ЭДС), тепловые (теплоемкость, теплопровод—
ность), ядернофизические (естественная радиоактивность, сечения
взаимодействия и параметры переноса излучений), упругие (упругие
модули, скорости распространения упругих волн).

Малый
объем часов (около 40 лекционных) не позволяет подробно изложить
все традиционные разделы петрофизики, обычно рассматриваемые в
учебниках. Поэтому автор рассматривает физические свойства, лежащие в основе гравиразведки, магниторазведки, электроразведки,

сейсморазведки. Главное внимание уделяется факторам, определяющим петрофизические характеристики горных пород, связям физических свойств с петрографическими характеристиками. Петрофизические модели месторождений полезных ископаемых рассмотрены на отдельных примерах, методики и аппаратура петрофизических исследований вынесены на лабораторный практикум и учебно-методическую практику,

1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Когда ставится задача изучения каких—либо физических свойств

(например, плотности или магнитной восприимчивости) массива магматических или определенного горизонта осадочных горных пород, то из этих объектов (обнажении, горных выработок, керна буровых скважин) отбирается некоторое количество образцов, у которых измеряются соответствующие Физические характеристики. При этом оказывается, что измеренные значения у разных образцов различны.

Эти различия не связаны с погрешностями измерений, а есть результат вариаций физических свойств изученных образцов, т.е. следствие неоднородности объекта исследования. Дело в том, что формирование горных пород (и соответственно их физических свойств) происходит под воздействием большого числа факторов внутренних и внешних. Например, при образовании массивов магматических пород состав и структура будет определятся такими главными факторами:

1.Изменением глубины кристаллизации расплава.
2.Неоднородностью распределения давления и температуры в пределах магматического тела.
3.Фракционной и гравитационной дифференциацией.
4.Перемешиванием расплава.
5.Вааимодействием магмы с вмещающими породами различного состава.

Каждый из перечисленных факторов в свою очередь является сложной функцией от координат и времени. Результатом будет неоднородность состава, размера зерен, структуры и текстуры в пределах массива и как следствие, неоднородность физических свойств. Многообразие действующих факторов, их неопределенность во времени и пространстве позволяют рассматривать их как случайные события, а физические свойства — как случайные величины, к которым может быть применен аппарат математической статистики.

При образовании осадочных (например, обломочных) пород главными факторами являются:

1. Вещественный состав пород источника сноса, характер и степень их выветривания

2.Удаленность бассейна осадконакопления, глубина его, гидродинамические характеристики.

3.Химический состав и степень минерализации вод, окислительно-восстановительный потенциал, РН и т.д.

В процессе Формирования породы эти факторы изменяются в связи с изменениями источников сноса, глубин, гидродинамических и гидрохимических условий, что приводит к изменениям состава обломков, размеров и степени отсортированности зерен, количества и типа цемента и т.д. Возникает первичная неоднородность физических свойств.

На первичную неоднородность может накладываться вторичная, связанная с процессами преобразования: выветриванием, трещиноватостью, метаморфизмом, привносом и выносом вещества и т.д.

Учитывая, что студентам будет читаться специальный курс "Теоретические основы обработки результатов геофизических измерений", ниже приводятся только самые элементарные сведения по статистической обработке результатов изучения физических свойств горных пород, необходимые для понимания последующих разделов.

Предположим, что мы имеем М измерений некоторого физического параметра X, среди которых присутствуют максимальное X_{max} и минимальное X_{min} значения. Разобьем весь диапазон измеренных значений на п интервалов с шириной каждого АХ:

$$\Delta X = (X_{max} - X_{min})/n \text{ , } (1.1)$$

Количество интервалов т связано с объемом выборки N и обычно определяется формулой Старджеса:

$$n = 3.3 * lgN + 1$$

где n округляется до целого числа.

Подсчитаем N_i -число измерений, параметр X которых попадает в 1-й интервал (1=1,2...n). Строится график зависимости N_i или $(N_i/N)*100^2$ от X. В каждом интервале рассчитанное значение изображается в виде отрезка горизонтальной линии (гистограмма). На рисунке 1.1 приведен пример гистограммы для N=40, n=5.

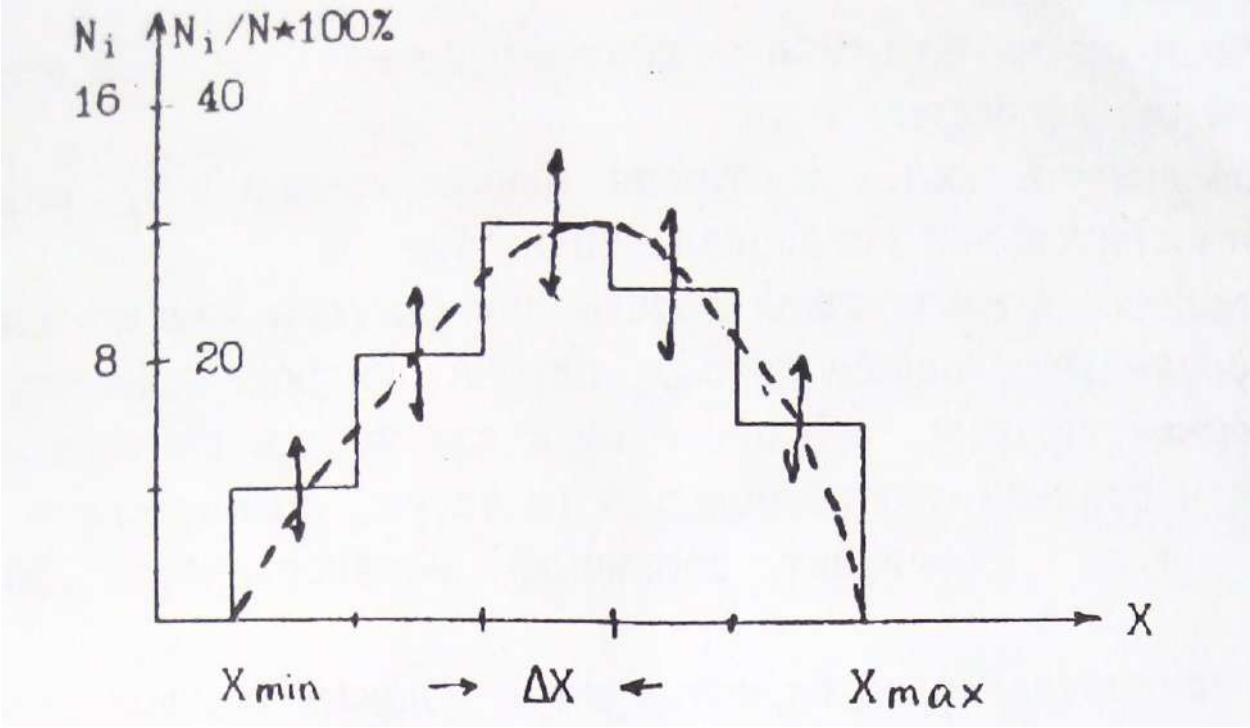


Рис.1.1. Гистограмма распределения параметра X

Гистограмма содержит в себе все статистические характеристики объекта исследования. В частности, величина $(N_i/N)*100\%$
представляет вероятность (в %) для данного объекта существования значении параметра X в пределах 1-го интервала. При построении реальных гистограмм не следует абсолютизировать полученный результат. Дело в том, что мы всегда имеем дело с ограниченными выборками и каждое значение N_i получено с погрешностью, вероятное
значение которой приближенно оценивается как $\pm\sqrt{N_i}$ (на рис. показано стрелками).

При неограниченном возрастании объема выборки ($N \to \sim$), число интервалов (n) также стремится к бесконечности, а ширина интервала (ΔX) к нулю и мы получаем непрерывную кривую распределения,
КОТОРУЮ часто называют вариационной кривой. Приближенно вариационную кривую можно получить путем визуального сглаживания гистограммы таким образом, чтобы площади между осью абсцисс и гистограммой и осью абсцисс и вариационной кривой были равны (изображено пунктирной линией).

Опыт Изучения физических свойств показывает, что часто распределения их подчиняется двум законам: нормальному и логнормальному — ПРИ нормальном законе кривая распределения P(X) описывается выражением:

$$F(X) = \frac{\exp[-\frac{(X_K - MX)^2}{2\sigma^2}]}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (1.2)$$

где MX—мода параметра или значение его в максимуме распределения (для нормального закона совпадает со средним значением параметра: $MX = \bar{X} = \frac{\sum X_k}{N}$ k=(1,2...N).

σ-среднеквадратичное отклонение (σ^2—называют стандартом).
Нормальному закону подчиняется обычно распределение плотности, пористости, скорости продольных волн. На рис.1.2 приведен пример нормального распределения с двумя различными значениями стандарта.

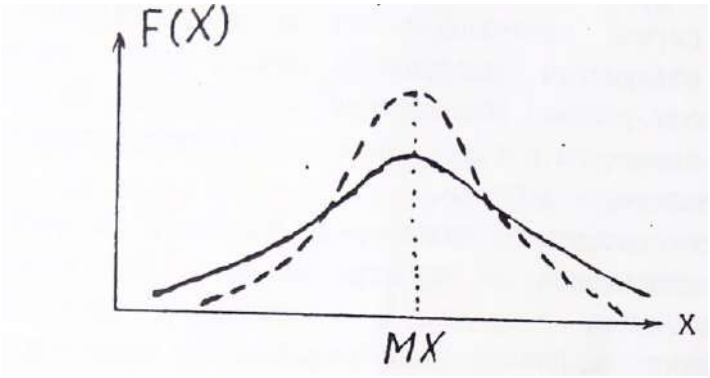


Рис.1.2. Нормальное распределение параметра X

Кривая характеризуется симметрией относительно моды и полностью определяется двумя величинами MX и σ. Логнормальныи закон соответствует случаю, когда нормальному закону подчиняется логарифм параметра (logX). Этому закону обычно подчиняется распределение магнитной восприимчивости, удельного электрического сопротивления, нефтенасыщенности. Для практического построения гистограмм или вариационных кривых в предположении существования лог-нормального закона измеренным значениям $X_к$ вычисляются значения $\log X_к$, которые обрабатываются способом, описанным выше.

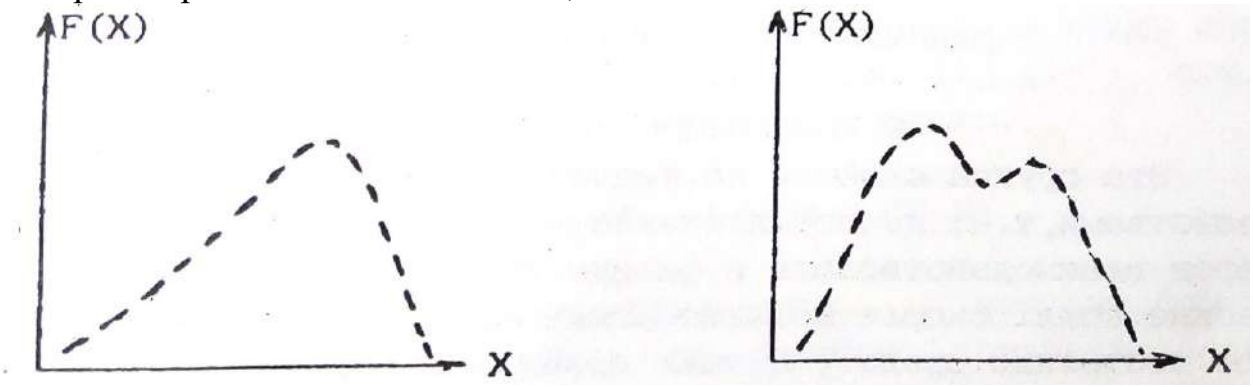


Рис.1.3.Примеры реальных кривых распределения

Реальные кривые распределения часто отличаются от теоретических
Они могут быть асимметричными и даже иметь два и более максимумов (рис. 1.3).

В первому случае появляются новые характеристики распределения (одна или более), например параметр асимметрии. В любом случае выборки считаются статистически одинаковыми если все (!) статистические параметры их одинаковы. Асимметрия обычно связана со
вторичными процессами изменения физических свойств в результате выветривания, регионального или локального метаморфизма и т.д.

Второй случай свидетельствует о неоднородности выборки; в
одну группу объединены различные по каким—либо характеристикам
породы (возраст, условия образования, минеральный состав, структура, степень изменения и т.д.). Необходимы дополнительные исследования для разделения выборки.

Важным следствием из изложенного является то, что все петрофизические зависимости не функциональные, а статистические,
то есть выполняются в среднем с определенной вероятностью отклонения от среднего. Пример такой зависимости приведен на рис.1.4.

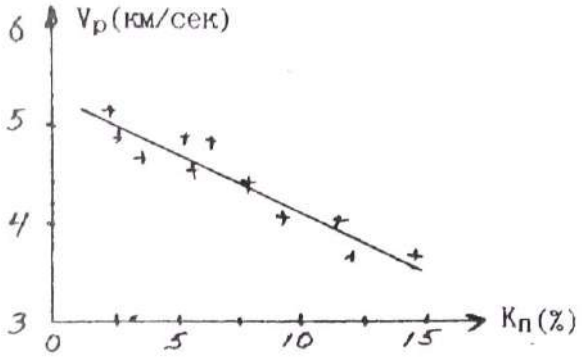


Рис.1.4. Зависимость скорости продольных волн (Vp)
от коэффициента пористости ($К_п$)(+ - экспериментальные значения)
2.КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА
Эта группа свойств не является в строгом смысле физическими
свойствами, т.к. непосредственно не определяет способности горных

пород взаимодействовать с физическими полями или создавать физические поля. Скорее коллекторские свойства характеризуют физическое состояние среды. В тоже время коллекторские свойства влияют
на другие Физические свойства (плотностные, электрические. Упругие) и определяют корреляционные связи между ними. С другой стороны,

коллекторские свойства, такие как пористость, проницаемость.
водо-, нефте- и газонасщенность. это важнейшие характеристики решенных месторождений углеводородов и подземных вод, определяющие запасы и условия эксплуатации этих месторождений сведения 0 коллекторских свойствах могут быть получены через плотностные, электрические и упругие свойства. Поэтому коллекторские
свойства рассматриваются во всех учебниках и курсах петрофизики.

2. 1. ПОРИСТОСТЬ

Пористостью называется совокупность пространства в горной
породе, не занятого твердой фазой. Оно заполнено газами, жидкостями (вода, нефть) или их смесями. Количественно пористость выражают через коэффициенты пористости К: отношение объема пор (Vпор) к
объему горной породы (Vг.п.) в процентах. Общий объем горной породы равен сумме объемов пор и твердой фазы ($V_{\text{г.п.}} = V_{\text{пор}} + V_{\text{т.ф}}$). При всем этом выделяют:

а) Коэффициент общей пористости ($К_{п}$) — отношение объема всех
пор (Vпор) к объему породы:

$$К_{п} = (V_{\text{пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%, \quad (2.1)$$

6) Коэффициент открытой пористости ($К_{п.о}$) .- отношение объема
открытых пор (Vo.пор) к объему породы:

$$К_{\text{п.о.}} = (V_{\text{о.пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%. \quad (2.2)$$

Открытыми порами называются поры, сообщающиеся между собой.
в) Коэффициент динамической пористости ($К_{п.д}$) - отношение

объема динамических пор ($V_{д,пор}$) к объему породы.

$$К_{\text{п.д}} = (V_{\text{д.пор}}/V_{\text{г.п.}}) * 100\%. \quad (2. 3)$$

динамическими порами называются поры, по которым происходит движение жидкостей или газов при наличии градиента-давления. Часть открытых пор может быть представлена тупиковыми порами или водой, прочно связанной с поверхностью твердой фазы, и не участвует в переносе жидкостей или газов. Очевидно, что Кп > Кп.о) Кп.д.

2.1.1. Классификация пор.

1) По происхождению поры подразделяются на первичные и вторичные. Первичные возникают при образовании породы и представлены структурными порами — промежутками между частицами обломочных „о-род (грубообломочных, песчанистых, алевритовых, глинистых), межкристаллическими промежутками магматических и метаморфических пород и т. д. При уплотнении цементации, перекристаллизации, мета-морфизме форма и размеры первичных пор могут меняться. Вторичные поры образуются при последующих воздействиях на породы процессов выветривания, выщелачивания, кристаллизации, тектонических нагрузок и т.д.

2) По форме поры могут быть близкими к **ромбоздальным** (рыхлые отсортированные обломочные осадочные породы), близкими к **тетраэдрическим** (те же, но уплотненные породы), **щелевидным** (порода состоит из пластинчатых минералов: слюды, глины), в виде **канальцев** переменного сечения (плохо отсортированные обломочные породы), **трещеновидные** (магматические, метаморфические, плотные оса-дочные породы, испытавшие воздействие сильных тектонических нагрузок), **каверновидные** (карбонатные породы, подвергшиеся процессам растворения и выщелачивания), **пузырчатые** (магматические породы), **ячеистые** (известковые и кремнистые туфы), **каналовидные** (лёссы).

3) По размерам выделяют а) **сверхкапиллярные** - эффективный (средний) диаметр сечения пор $d_{э.ф.}$ более 0,1 мм. (грубообломочные породы типа галечников и гравия, крупно— и среднезернистые пески, оолитовые известняки, выщелоченные карбонаты). В сверхкапиллярных порах доля воды, связанной с поверхностью твердой фазы, не велика, вода в основном свободная и перемещается по законам гидродинамики. б) Капиллярные - эффективный диаметр пор $d_{э.ф.}$ $1*10^{-4}$-$1*10^{-1}$ мм. (мелкозернистые, менее отсортированные, сцементированные пороли: мелкозернистые пески и песчаники, некоторые карбонатные породы)-

В **Капиллярных** порах более высокое содержание связанной воды И возможен ее подъем в силу поверхностного натяжения. в) **Субкапиллярные** - $d_{э.ф.}$<1*10^{-4} мм. (глины, микрокристаллические известняки, туфы). Практически вся вода перового пространства связана на поверхности твердой фазы, перемещения воды почти нет.

2.1.2. ПОРИСТОСТЬ ОБЛОМОЧНЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Основными факторами определяющими пористость обломочных пород являются: 1) форма и размер обломков, 2) степень отсортированности 3) степень уплотнения и цементации.

1) Влияние Формы и размера частиц иллюстрируется таблицей, в которой приведены значения Кп (%) для искусственных пород:

Таблица 1

Размер частиц (мм.)	Кварц окатанный	Кварц остроуг.	Ортоклаз остроуг.	Слюда
2-1	33	38	45	80
0.5-0.25	33	41	49	72
0.1-0.06	39	45	52	68

Отмечается малое влияние размера частиц и существенно большее формы (пористость возрастает в 2-2.5 раза при переходе от изометричных зерен к пластинчатым).

2) Степень отсортированности характеризует распределение обломков по размерам и количественно выражается через коэффициент отсортированности G_f:

$$G_f = \frac{d_{\text{ср}} - \sum V_i \delta d_i}{d_{\text{ср}}}, \quad (2.4)$$

где $V_i -$ объемное содержание частиц диаметра d_i в породе,

δd_i—отклонение от среднего диаметра 1-й группы, '

$d_{\text{ср}}$- средний диаметр частиц.

Коэффициент отсортированности меняется от 1 (хорошо отсортированная порода, все частицы одного размере) до 0 (плохо отсортированная порода. размеры частиц равномерно распределен от о до d_{max}).
присутствие в породе частиц разного размера приводит к тому, что
мелкие частицы заполняют промежутки между крупными и уменьшение коэффициента G_f (ухудшение отсортированности) ведет к уменьшению коэффициента пористости.

На рис.2.1 приведен пример такой зависимости.

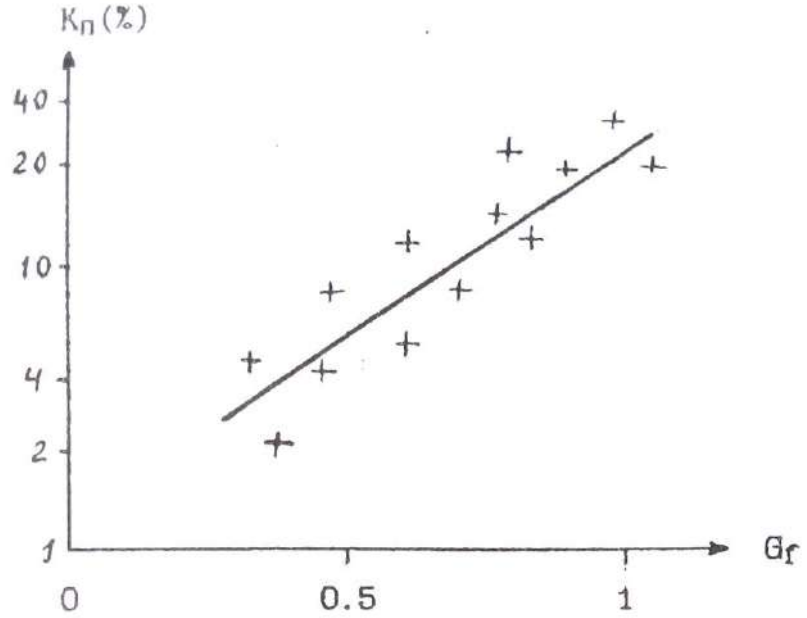


Рис.2.1. Зависимость коэффициента пористости от
коэффициента отсортированности песчаников
и алевролитов Туймазинской площади

Изменение отсортированности может приводить к изменение пористости на порядок. В связи с этим интересно рассмотреть изменение пористости песчано—глинистых образований в зависимости от
состава (рис.2,2). . '

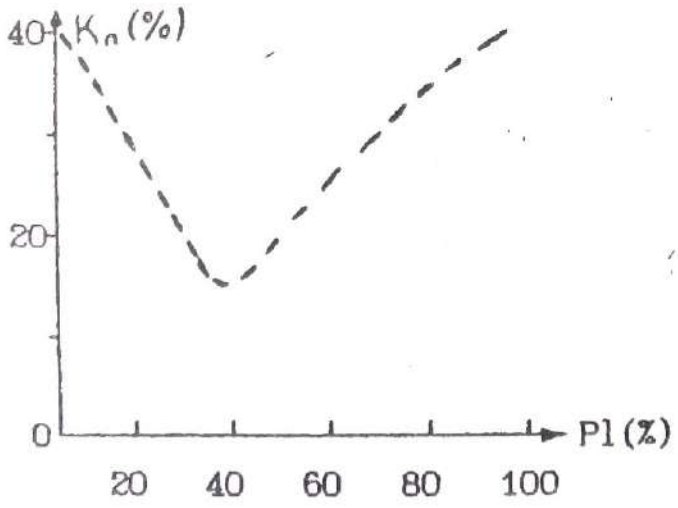


Рис.2.2. Зависимость коэффициента пористости от глинистости (Р1) песчано—глинистых отложении (теоретическая зависимость)

Положим, что песчаная и глинистая фракции представлены однородными по размерам частицами каждая (песчаная крупными, глинистая мелкими). Коэффициенты пористости каждой фракции около
40%. При увеличении глинистости (Р1) в породе будет происходить уменьшение пористости в результате частичного заполнения глинистыми частицами промежутков между крупным песчинками. При достижении 40% глинистости все эти промежутки (поры) будут заполнены
глинистым материалом (минимальная отсортированность), а Кп равен
0.4*0.4=0.16 (16%). При дальнейшем увеличении глинистости отсортированность и коэффициент пористости будут возрастать.

3) Под действием нагрузки вышележащих пород первичные рыхлые осадки уплотняются, что приводит к уменьшению их пористости. В начале уплотнение связано с перемещением отдельных частиц и более компактным их взаимным расположением. Затем происходит частичное разрушение и сшивание обломков (ухудшение отсортированности).
Этот процесс идет при нагрузках, превышающих несколько тысяч кг/см2. Наиболее сильно уплотняются глины, коэффициент пористости которых под нагрузкой может меняться от 50%. до 5%. В результате для многих районов, сложенных обломочными породами, наблюдается корреляционная связь Кп и глубины залегания породы:

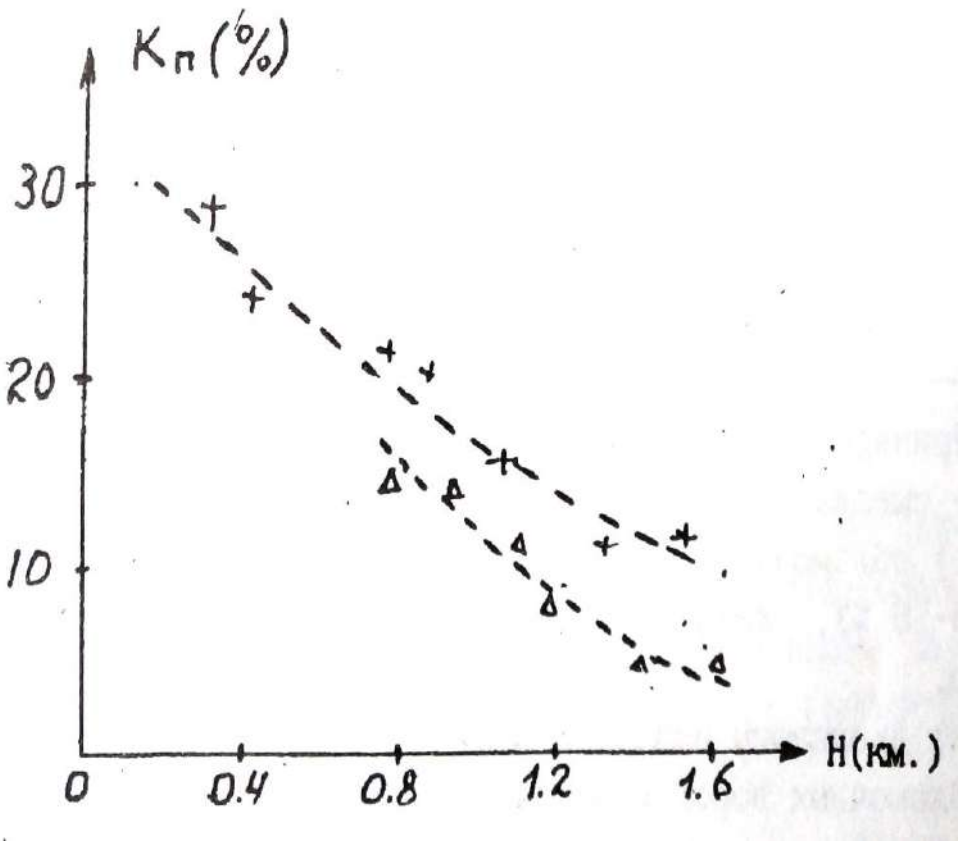


Рис.2,3. Зависимость Кп от глубины залегания Н;
+-глины, Δ- алевролиты

$$К_п(H) = К_п(0) * \exp(-\beta H), \quad (2.5)$$

где $К_п$ (0) — коэффициент пористости вблизи поверхности,
β - константа, зависящая от типа отложений (β=0.05).
Уравнения типа (2.5) позволяют прогнозировать изменения пористости с глубиной, что очень важно при интерпретации результатов геофизических съемок, т.к. величина пористости определяет ряд других
физических свойств: плотность, удельное электрическое сопротивление, скорость упругих волн.

Процесс цементации заключается в выпадении вторичных минера-
лов (карбонаты, опал, глинистые минералы и т.д.) в поровом пространстве из поровых вод. В результате пористость уменьшается
вплоть до нескольких процентов.

В заключение приведем данные по пористости некоторых типов
обломочных пород.

Таблица 2

Порода	Кп(%)	
	Пределы	Наиболее вероятные

Пески	5-55	20-35
Песчаники	0.5-40	5-30
Лессы	40-55	40-55
Алевролиты	1-40	3-25
Глины	1-75	20-50
Аргиллиты	1-30	1.5-15

Приведенные в таблице данные позволяют сделать следующие основные выводы:

1) обломочные породы обычно характеризуются средней (Кп=10-15 %), повышенной (Кп=15-20 %) и высокой (Кп>20 %) пористостью.

2) диапазоны значений коэффициентов пористости различных типов обломочных пород в значительной степени перекрываются. Следует подчеркнуть, что данные таб.2 обобщают сведения о пористости пород всей страны в целом. В конкретных районах, у конкретных пластов диапазон колебания Кп может быть существенно уже. Например,

пласты – коллекторы AB_{2-5} одного из нефтяных районов Тюменской области имеют Кп=20-30 %

2.1.3. ПОРИСТОСТЬ КАРБОНАТНЫХ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

первичные карбонатные осадки (известковые и доломитовые илы) имеют высокую пористость (Кп=60-80 %). По мере их уплотнения пористость резко уменьшается (Кп=0.5—15 %). В дальнейшем появляется вторичная пористость, обусловленная перекристаллизацией, трещиноватостью и выщелачиванием карбонатных пород. Характерная особенность карбонатных пород - неравномерность распределения пористости в пространстве. Поэтому. при изучение карбонатных коллекторов необходимо отбирать - большое количество образцов с различных интервалов по глубине и площади. Значения пористости основных типов карбонатных пород приведены в таблице 3.

Таблица 3

Порода	Кп(%)	
	пределы	Наиболее вероятные
Известковый ил	65-85	-

Известняки	0.5-48	1.5-15
Известковый туф	20-30	-
Мел	10-55	40-50
Доломиты	0.1-37	3-20

2. 1.4 ПОРИСТОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ОСАДОЧННХ ГОРНЫХ ПОРОД.

В отличие от двух предыдущих групп пород, гидрохимические

осадки характеризуются пониженными и низкими значениями коэффициентов пористости. Так у ангидритов Кп=0.2—15 % у гипсов 1-25 %,

У каменной соли 0-5 %.

2.1.5 ПОРИТОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Для этой категории пород характерна низкая пористость. Исключение составляют кайнотипные эффузивы, которые в силу особенности образования (быстрое остывание, не полный отход летучих
компонент), могут иметь повышенную и высокую пористость. Таблица 4 иллюстрирует значения коэффициента общей пористости магматических и метаморфических пород.

Таблица 4

Порода	Кп(%)
	Пределы
Граниты	0.3-4
Габбро	0.3-3
Пироксенит	0.2-2
Базальт	0.5-40
Диабаз	0.2-3
Порфирит	0.4-6
Гнейс	0.2-6

Сланец хлорит.	0.2-1
Амфиболит	0.1-6

данные относятся к невыветрелым породам. В процессе выветривания пористость возрастает (образование вторичной пористости)
и может достигать 20 - 40 %.

Другая особенность данной группы пород состоит в существенном преобладании закрытой пористости над открытой.

2.1.6 ПОРИСТОСТЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНО ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

К гидротермально измененным породам приурочены месторождения
рудных полезных ископаемых. Многочисленные исследования показали.
что зоны развития этих пород характеризуются повышенными значениями пористости по сравнению с неизмененными ,породами. Вероятно
это связано с тем, что гидротермальные растворы могут перемешаться в средах с повышенной пористостью и проницаемостью. Таким образом, зоны повышенной пористости являются своеобразным индикатором

гидротермальных процессов и, косвенно, признаком оруденения.
На рисунке 2.4 приведен пример распределения пористости в районе медноколчеданного оруденения.

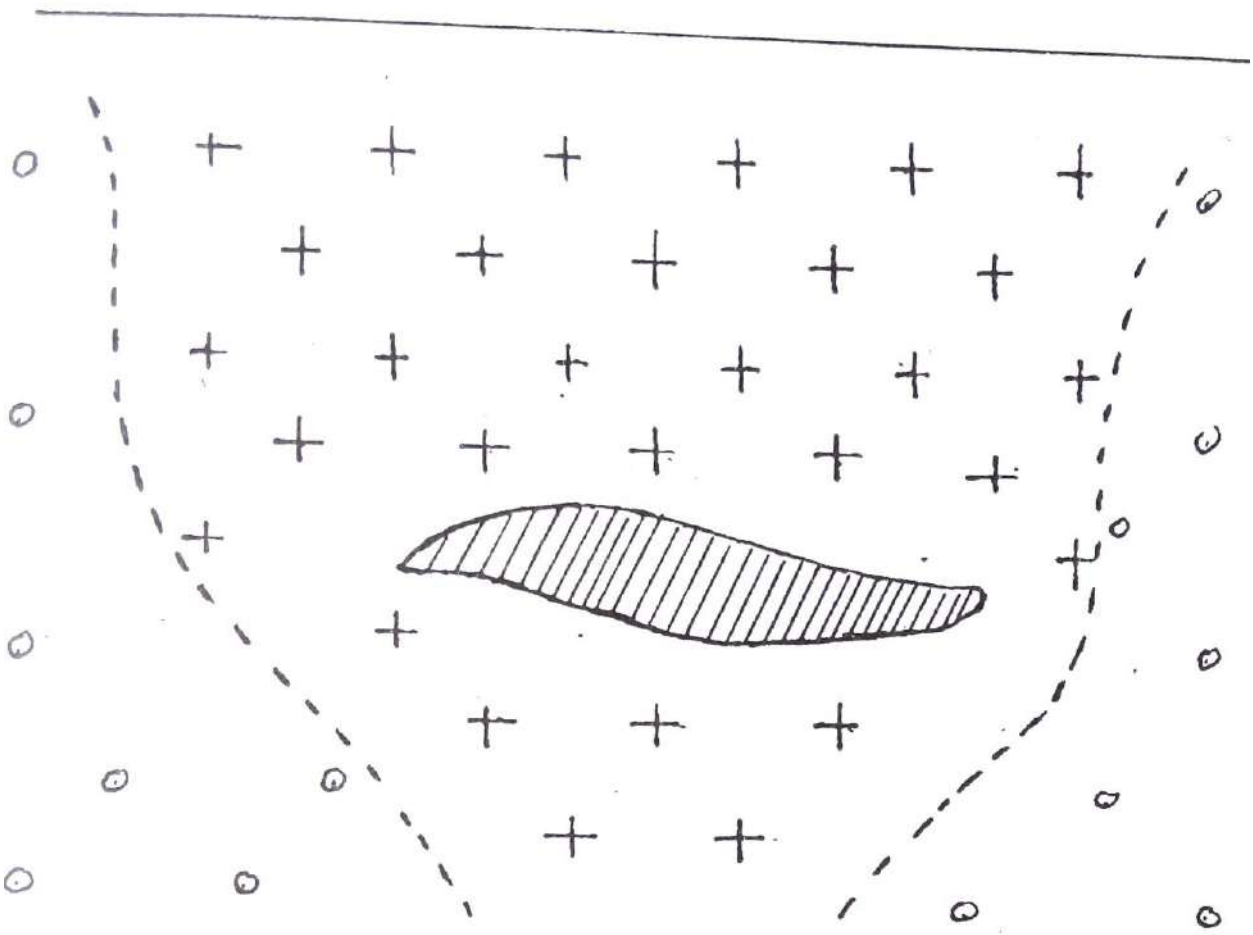


Рис.2.4. Распределение коэффициента открытой пористости
на месторождении Абеи-Саз (Башкирия)
-рудное тело
-Кп.о=0.5-3 %
-Кп.о<0.2%

2.2. ВЛАЖНОСТЬ. ВЛАГОЕМКОСТЬ

Влажность определяется, как количество воды в горной породе, а **влагоемкость**, как способность горной породы удерживать воду. Вода в горных породах может присутствовать в различных видах:

а) **Прочно связанная вода** - слои воды толщиной в несколько молекул. непосредственно примыкающий к стенке перового канала. Эта вода силами Ван-дер—Ваальса прочно связана с твердой фазой породы, Не может перемешаться, обладает аномальными физическими свойствами

(плотность до 2 г/см3, температура замерзания до -78 C^o, повышенная вязкость, плохая растворимость солей).

б) **Рыхло связанная вода** - непосредственно примыкает к слою прочно связанной воды, менее прочно связана с твердой фазой. В частности, образуется в углах пор в силу поверхностного натяжения (стыковая вода). Толщина слоя рыхло связанной воды составляет десятки и более молекул, она имеет повышенную плотность и пониженную температуру замерзания.

в) **Свободная вода** - обычная вода, которая свободно перемещается в поровом пространстве по законам гидродинамики.

Выделяют несколько типов влагоемкости:

а) **Машинальная гигроскопическая влагоемкость** ($W_{мг}$) - максимальное количество парообразной влаги (в процентах к весу абсолютно сухой породы), которое способна поглотить порода из воздуха влажностью 94%. Эта влагоемкость включает в себя прочно связанную и часть рыхло связанной воды.

б) **Капиллярная влагоемкость** — полное количество воды, которое присутствует в породе в силу явления капиллярного подъема.

в) **Полная влагоемкость** - максимальное количество связанной и свободной воды, которое может присутствовать в горной породе.

Соотношение между связанной и свободной водой при полном заполнении перового пространства определяется сечением поровых каналов и составом твердой фазы породы. Относительное количество свободной воды уменьшается с уменьшением сечения пор и увеличением содержания глинистых минералов. В случае чистых глин в норах присутствует только связанная вода, а в грубообломочных породы (галечники, крупнозернистые пески) почти вся вода представлена свободной.
Двойной электрический слой.
Поверхность твердой фазы перового пространства адсорбирует ионы одного знака из поровых растворов. Эти ионы удерживаются на ней силами Ван—дер—Ваальса, создавая слой не компенсированных зарядов (слой потенциал-определяющих ионов). В результате электростатического взаимодействия из перового раствора к нему будут притягиваться ионы противоположного знака (слой противоинов).
что в совокупности создает двойной электрический слой. Противоионы образуют сложную пространственную структуру. На расстоянии порядка размера молекулы противоионы прочно удерживается силами электростатического взаимодействия и не могут перемещаться, образуя плотную часть двойного слоя. Дальше от поверхности твердой

фазы их концентрация убывает и они не столь сильно связаны с потенциал-определяющим слоем. Эта область называется диффузионной частью двойного слоя и может перемещаться при движении жидкости в поровом пространстве примерная структура двойного слоя приведена на рис. 2.5.

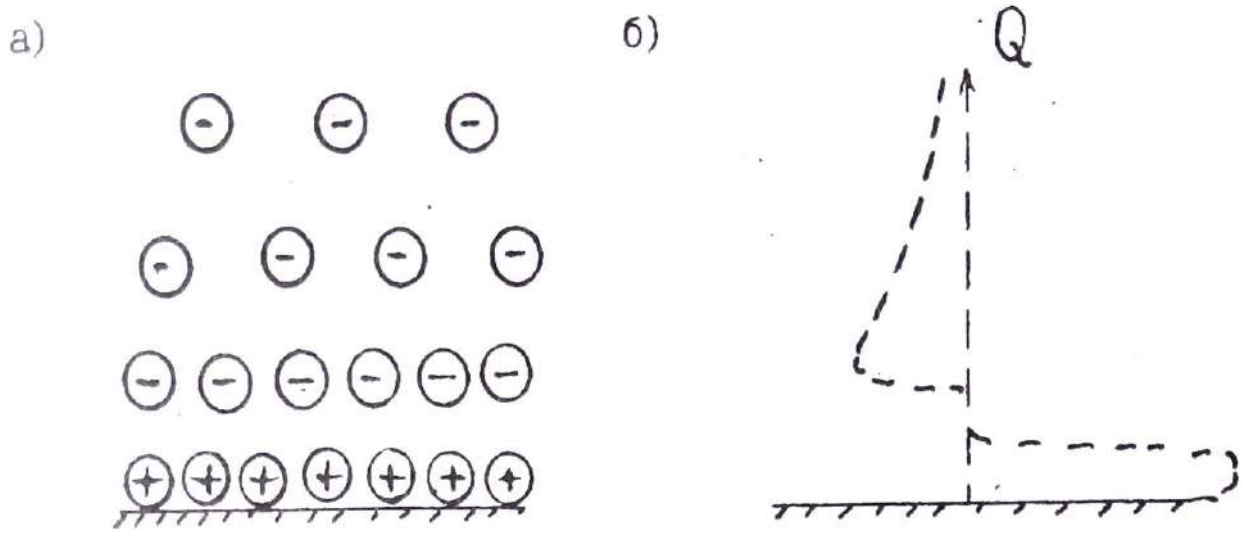


Рис.2.5. Строение двойного электрического слоя (а) и распределение заряда Q в пределах двойного слоя (б)

Область, занятая двойным слоем, примерно соответствует или несколько больше слоя прочно и рыхло связанной воды.

2. 3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Проницаемостью называется способность горной породы пропускать жидкости, газы или их смеси при наличии градиента давления. Выделяют физическую или абсолютную и фазовую проницаемости.

2.3. 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРОНИПАШОСТЬ

Это способность горных пород пропускать **однородные** жидкости или газы. Представим себе трубку, в которую помещен образец цилиндрической формы (Рис.2.б). На верхней грани образца давление P_1 на нижней P_2. Градиент давления равен $\frac{\Delta P}{L}$, где $\Delta = P_1 - P_2$, L-длина образца. Через нижнюю границу будет вытекать жидкость. раскол которой

равен Q ($см^3$/сек). Обозначим площадь поперечного сечения образца через S и введем удельный расход V=Q/S (расход через единицу площади поперечного сечения). Соотношение между этими величинами описываются законом Дарси: V прямо пропорционален градиенту давления и обратно пропорционален вязкости (μ).

$$V = К_{пр} \frac{\frac{P_1 - P_2}{L}}{\mu} (2,6)$$

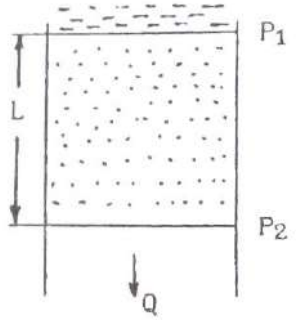


Рис.2.6. К определению коэффициента проницаемости

Коэффициент пропорциональности в этом уравнении (кпд) называется коэффициентом проницаемости, он является количественно характеристикой физической проницаемости. Единицей Кпр в системе СИ служит мг. Существует вне системная единица - Дарси, которая соответствет проницаемости породы, у которой удельный расход води равен 1 смз/сек при градиенте давления 1 атм/см. $1м^2 \approx 1 * 10^{12}$ Д или $1Д \approx 1 * 10^{-12}$ $м^2 = 1$ $мкм^2$.

Дарси крупная единица, обычно для характеристики проницаемости горных пород используют тысячную долю Дарси – 1мД, 1 мД=1 $фм^2$

2.3.2. СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОРИСТОСТИ И СТРУКТУРОЙ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Для простейшей модели строения перового пространства в виде трубчатых капилляров (рис.2.7) выведено простое соотношение -

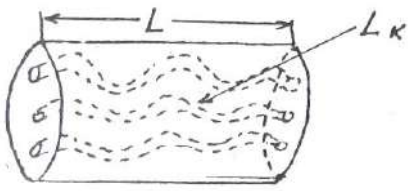


Рис.2.7. К пояснению формулы Козени—Кармана

формула Козени-Кармана

$$К_{пр} = \frac{К_{пд}^3}{S_ф^2 * T^2 * f}$$, (2.7)

Где $К_{пд}$ – коэффициент динамической пористости.
$S_ф$ – удельная поверхность порового пространства (площадь поверхности пор в единице объема горной породы.
$T=L_к/L$ -удельная извилистость поровых каналов (отношение средней длины перового канала Lк в пределах образца, к длине образца L. .
f - некоторый параметр, зависящий от формы сечения порового канала (лежит в пределах от 2 до 3).
(**Предупреждение**. В литературе в формулах типа 2.7 часто используют обозначение Кп или термин пористость вместо динамической пористости необходимо представлять, что движение флюидов возможно только по динамическим порам.)

Из формулы 2.7 следует сильная зависимость коэффициента проницаемости от коэффициента пористости (третья степень) и структуры перового пространства, которая для данной модели определяется величинами T и $S_ф$.
На рис. 2.8 приведены примеры зависимости $К_{пр}$ от $К_{пд}$ (экспериментальные данные)

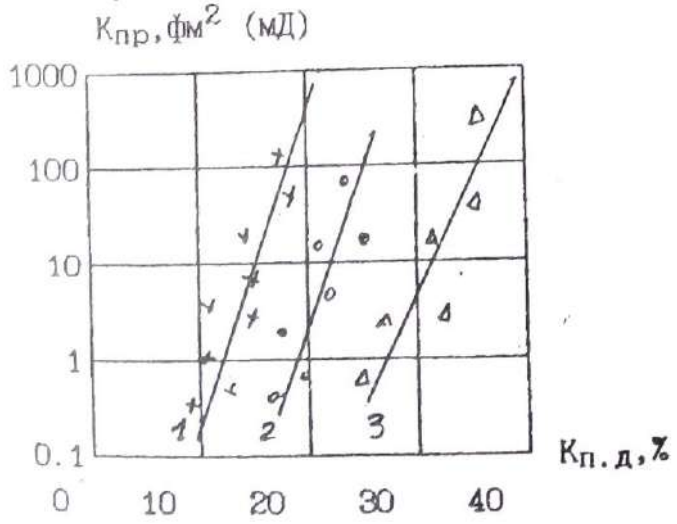


Рис.2.8. Зависимость коэффициента проницаемости от коэффициента динамической пористости 1 - песчаник, нижний вилькокс, 2 – песчаник слабо сцементированный, 3 - песчаник тонкозернистый

Линейный вид зависимостей в полулогарифмическом масштабе и угол наклона подтверждают зависимость $К_{пр}$ от третьей степени $К_{пд}$- Смещение линий в горизонтальном направлении обусловлено влиянием структуры порового пространства. Величина удельной по-

нием поровых каналов, и возрастает с уменьшением сечения. У обломочных пород сечение каналов связано с размером зерен. Например в случае отсортированной породы с изометричными обломками со средним диаметром d:

$$S_{\text{ф}} \approx 3.6/d \quad (2.8)$$

Таким образом, уменьшение размера верен приводит к уменьшению проницаемости. Это объясняет непроницаемость глин (тонкодисперсные породы), хотя коэффициент пористости у них составляет десятки процентов. Рис. 2.9 иллюстрирует подобную зависимость.

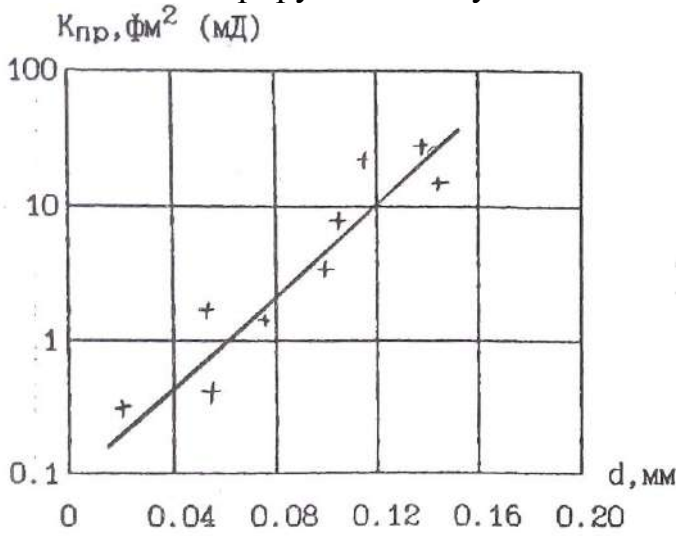


Рис. 2.9, Зависимость коэффициента проницаемости от среднего диаметра и зерен песчано—алевритово—глинистых пород

В случае трещинной пористости проницаемость определяется приближенным выражением:

$$\text{К}_{\text{пр}} \approx 8.45\, b^2 \quad (2.9)$$

где b — средний размер поперечного сечения трещин (раскрытость трещин) в мкм,
Кпт - коэффициент трещиной пористости в %.
По величине коэффициента проницаемости все породы подразделяются на три группы:

1. **Проницаемые** — грубообломочные породы (галечники, гравии), хорошо отсортированные, слабо сцементированные песчано—алевритовые породы, кавернозные и трещиноватые карбонатные породы, трещиноватые магматические породы, Это породы с высоким коэффициентом пористости (20-40%). сверхкапиллярными и капиллярными порами, существенным преобладанием свободной воды в поровом пространстве, Коэффициент проницаемости их лежит в пределах 10 - 10^6 фм^2 (мД).

2.**Полупроницаемые** — менее отсортированные песчано-алевритово-глинистые породы, мелкотрещинные меловидные карбонатные породы. поровое пространство представлено субкапиллярными порами, преобладает связанная вода. Кпр в пределах 0,1-10 фм^2 (мД).

3. **Практически непроницаемые** - глины, аргиллиты, сильно сцементированные песчаники и алевролиты, невыветрелые кристаллические карбонатные и магматические породы. Кпр < 0_1 фм^2 (мД).

2. 3. 3. ФАЗОВАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Это способность горной породы, насыщенной неоднородной жидкостью или смесью жидкостей и газов, пропускать ту или иную фазу при наличии градиента давления. Для обычных в горных породах фаз (вода, нефть, газ) количественно фазовая проницаемость характеризуется коэффициентами Фазовой проницаемости для воды (Кпр.в), нефти (Кпр.н) и газа (Кпр.г), которые являются коэффициентами пропорциональности в аналогах уравнения Дарси:

$$V_B = \text{К}_{\text{пр.в}} \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\mu_{\text{н}}} \qquad V_{\text{Н}} = \text{К}_{\text{пр.н}} \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\mu_{\text{н}}} \qquad V_{\Г} = \text{К}_{\text{пр.г}} \frac{\frac{\Delta P}{L}}{\mu_{\text{н}}}, (2.10)$$

где V_B, $V_{\text{Н}}$, $V_{\Г}$ - удельные расходы воды, нефти и газа соответственно.

Часто используют коэффициенты **относительной** фазовой проницаемости, которые определяют как отношение коэффициента фазовой проницаемости к коэффициенту абсолютной проницаемости в процентах. Например, коэффициент относительной Фазовой проницаемости воды ($\overline{\text{К}}_{\text{пр.в}}$) запишется: $\overline{\text{К}}_{\text{пр.в}} = (\frac{\text{К}_{\text{пр.в}}}{\text{К}_{\text{пр}}})$ 100 %.

Фазовая проницаемость отличается рядом особенностей, которые мы проиллюстрируем примером двухфазной смеси вода-нефть (Рис.2.10). На рис. Представлены зависимости коэффициентов относительной фазовой проницаемости ($\overline{\text{К}}_{\text{пр.в}}, \overline{\text{К}}_{\text{пр.н}}$) от соотношения фаз.
Последнее выражено через коэффициент вод насыщенности порового пространства ($\text{К}_{\text{В}}$) — отношение объема воды в поровом пространстве к объему пор. Полагаем, что все поровое пространство заполнено смесью вода—нефть, следовательно коэффициент нефтенасыщенности $\text{К}_{\text{Н}}$=1 -$\text{К}_{\text{В}}$. Отметим:

1) Графики зависимостей имеют в целом вогнутость вниз, т.е.

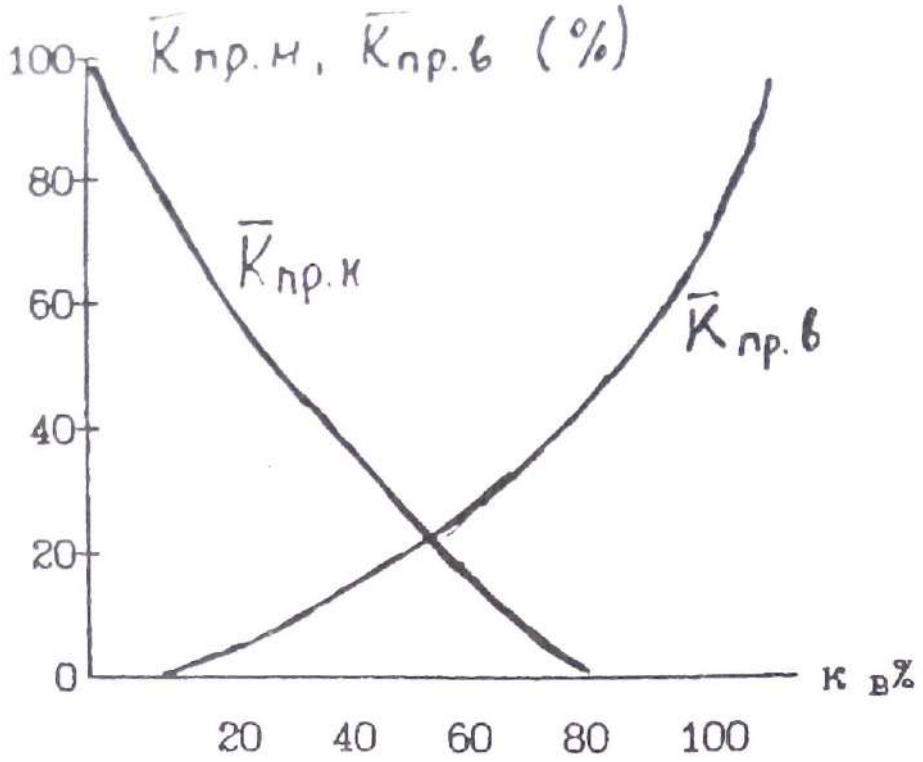


Рис.2.10. Зависимость коэффициентов относительной проницаемости по воде (Кпр.в) и нефти (Кпр.н) от соотношения фаз в смеси вода нефть

сумма Кпр.в+кПр.н<100. Смеси фильтруются хуже, чем однородные жидкости.

2) При определенном соотношении фаз возможен расход какой-либо одной фазы (при $К_В < 20\%$ вода не фильтруется через породу, а при $К_В > 80\%$; не Фильтруется нефть).

3. ПЛОТНОСТНИЕ СВОЙСТВА

Эта группа свойств определяет возможность применения ряда геофизических методов. Например, гравиразведки для изучения геологических структур, поисков и разведки полезных ископаемых, ядерно-геофизическиих методов (гамма—гамма-каротаж) для расчленения разрезов скважин.

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЁДШНИЯ

Плотность - это масса единицы объема вещества. **Удельный вес** - вес единицы объема вещества. По определению плотность (δ):

$$\delta = \frac{m}{V}, (3.1)$$

Удельный вес (Δ):

$$\Delta = \frac{P}{V}, \quad (3.2)$$

где m, P, V - соответственно масса, вес и объем вещества. Так как P=mg (g- ускорение силы тяжести), то плотность это константа а удельный вес зависит от силы тяжести. В системе си единицей плотности является кг/м^3 удельного веса - Н/м^3. В системе СГС единица массы — грамм (г), внесистемная единица веса граммсила (Г) единицы объема - см^3. Плотности в системе СГС (г/см^3) и удельный вес во внесистемных единицах (Г/см^3) численно совпадают на поверхности Земли с точностью до 0.2-0.4% (изменения удельного веса связаны с изменениями ускорения силы тяжести по поверхности Земли).

Понятия плотность и удельный вес, строго говоря, применимы для однородных сред. Для неоднородных сред вводятся усредненные характеристики — объемная плотность (δ) и объемный вес (d), которые определяются также по Формулам (3.1 и 3.2). Следует иметь в виду, что при определении объемных параметров размер изучаемого объекта должен быть много больше размеров неоднородностей. Соотношение между единицами в различных системах:

1г/см^3 =1000 кг/м^3, 1Г/см =9810 Н/м^3.

Используют так же понятие **минеральная плотность** (δ_M) — масса единицы объема твердой фазы минерала или горной породы. Следует отметить, что наряду с системой СИ в литературе при описании плотностных свойств широко используется и система СГС, которую мы будем использовать при дальнейшем изложении материала. Кроме того общепринятым является использование терминов плотность и удельный вес вместо объемная плотность и объемный вес.

3. 2 ПЛОТНОСТЬ МИНЕРАЛОВ

Плотность минералов определяется химическим составом, строением электронных оболочек атомов, составляющих различные минералы. а также условиями их образования. Эти факторы определяют соотношение в минералах атомов с различными атомными массами, характер кристаллической связи, конституцию кристаллов. Большая часть породообразующих минералов имеет ионную или ковалентную

форму кристаллической связи, состоят из атомов с низкими средними атомными массами и имеют плотность порядка 2.2 – 3.5 г/см^3,
Среди рудных минералов преобладает ионно-металлическая и ковалетно-металлическая форма связи, часто присутствуют элементы с высокими атомными массами, ЧТО обуславливает повышение плотности до 3.5 — 7.5г/см^3.

Средняя атомная масса основных породообразующим минералов (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы, карбонаты) почти постоянна и несколько повышается в пироксенах и железистых оливинах. В связи с этим главным фактором определяющим плотность этих минералов является плотность упаковки атомов в кристаллической решетке. Например каркасные структуры силикатов (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы) обуславливают низкую плотность. У цепочечных силикатов (пироксены) плотность выше. Еще выше плотность минералов с островной структурой (оливины). Для породообразующих минералов характерны явления **изоморфизма** и **полиморфизма**. Изоморфизм это изменение состава без изменения структуры кристаллической решетки. Целые группы минералов магматических и метаморфических пород (плагиоклазы, амфиболы, пироксены, оливины, гранаты) образуют непрерывные изоморфные ряды. Например плагиоклазовый ряд начинается с альбита ($NaAl_2Si_3O_8$) с плотностью 2.61г/см^3 и заканчивается анортитом ($CaAlSi_2O_8$) с плотностью 2.76г/см. Соотношение между NA и Ca в ряду может быть любым, при этом образуется непрерывный ряд минералов (олигоклаз, андезин, лабрадор, битовнит) с промежуточными значениями плотности. Увеличение плотности от альбита канортиту связано с более высокой атомной массой Ca (40) по сравнению с Na (23). В тоже время при замещении Na в альбите на K имеем минерал ортоклаз (KA151308) с меньшей плотностью (2.57), хотя атомная масса K (39) выше, чем Na. Это связано с большим ионным радиусом K, что обуславливает менее плотную пространственную епаковку атомов. Полиморфизм - это изменение структуры кристаллической решетки без изменения состава. Классическим примером полиморфизма являются минералы графит (плотность 2.2) И алмаз (плотность 3.52). Оба минерала имеют одинаковый состав (C), но графит имеет рыхлую слоистую структуру кристаллической решетки, а алмаз кубическую центрогранную. Полиморфизм особенно характерен для минералов метаморфических горных пород.

Плотность некоторых минералов приведена в таблице 5.

Таблица 5

Минерал	Состав	$\delta\ (\frac{г}{см^3})$
Кварц	SiO_2	2.65
Альбит	$Na[AlSi_3O_8]$	2.61
Анортит	$Ca[Al_2Si_2O_8]$	2.76
Ортоклаз	$K[AlSi_3O_8]$	2.57
Нефелин	$Na[AlSiO_4]$	2.62
Роговая обманка	$NaCa_2(Mg,Fe)_4(Fe,Al)^*$ $(OH,F)_2Al_2Si_6O_{22}$	3.25
Пироксены:		
Авгит	$Ca(Mg,Fe,Al)[(Si,Al)_2O_6]$	3.4
Геденбергит	$CaFe[Si_2O_6]$	3.55
Эгирин	$NaFe[Si_2O_6]$	3.53
Оливин	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	3.35
Мусковит	$KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$	2.85
Биотит	$K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,F]_2$	3.05
Серпентенит	$Mg_6[Si_4O_{10}][OH]_8$	2.55
Кальцит	$CaCO_3$	2.715
Магнезит	$MgCO_3$	2.96
Доломит	$CaMg[CO3]_2$	2.87
Барит	$BaSO_4$	4.5
Гипс	$CaSO_4*2H_2O$	2.3
Ангидрит	$CaSO_4$	2.96
Магнетит	Fe_3O_4	5.11
Ильменит	$FeTiO_3$	4.79
Хромит	$FeCr_2O_4$	4.2
Пирит	FeS_2	5.1
Халькопирит	$CuFeS_2$	4.2
Сфалерит	ZnS	3.95
Галенит	PbS	7.57
Циркон	$ZrSiO_4$	4.68

Приведены средние значения плотности наиболее чистых разновидностей минералов. Можно сделать следующие выводы:

1)Плотности основных породообразующих минералов ниже плотности рудных.

2) Темноцветные породообразующие минералы (пироксены, оливины. роговые обманки) имеют более высокую плотность по сравнению со светлыми минералами (кварц, полевые шпаты, плагиоклазы)

3.3 ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД

Общее выражение для плотности горной породы можно записать в виде:

$$\delta = \frac{m_T + m_{\text{ж}} + m_{\text{г}}}{V_{\text{Т}} + V_{\text{Ж}} + V_{\text{г}}}, (3.3)$$

где $m_{\text{Т}}$— масса твердой фазы, $m_{\text{Ж}}$— масса жидкой фазы. $m_{\text{Г}}$- масса газовой фазы породы, $V_{\text{Т}}, V_{\text{Ж}}, V_{\text{Г}}$— объемы твердой, жидкой и газовой фаз. Сумма объемов жидкой и газовой фаз равна объему порового пространства. Масса твердой фазы равна сумме масс слагающих породу минералов, а массы жидкой и газовой фаз сосредоточены в поровом пространстве. Тогда выражение (3.3) можно преобразовать к ВИДУ:

$$\delta = (1 - \text{К}_{\text{п}}) \sum \delta_i V_i + \sum \text{К}_{\text{П}} \text{К}_{\text{жк}} \delta_{\text{жк}} + \delta_{\text{г}} \delta_{\text{г}} \qquad (3.4)$$

где $\text{К}_{\text{П}}$ коэффициент пористости, δ_i и V_i - минеральная плотность и объемное содержание в твердой фазе i—го минерала, $\delta_{\text{жк}}$ плотность к—й жидкости. $\text{К}_{\text{ЖК}}$—объемное содержание к—й жидкости в поровом пространстве, δ_{Γ}- плотность газа, К_{Γ}- объемное содержание газа в поровом пространстве. Из 3.4 следует, что плотность горной породы зависит от минерального состава. заполнения порового пространства. Факторов может быть различной.

3.3.1 МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Общим для магматических пород является их образование путем остывания магматического расплава. Классификация этих пород основана на двух основных признаках: а) условия образования, б) состав. По условиям образования выделяют; 1) **интрузивные** -породы, образовавшиеся при медленном остывании расплава на значительной глубине при низком теплообмене с вмещающими породами. При этом

первичный расплав теряет большую часть летучих компонентов (жидкая и газовая фазы). Формируются низкопористые полнокристаллические породы (см. Таб №4). 2) **Эффузивные –** породы, образовавшиеся при быстром остывании расплава в приповерхностных условиях (на поверхности, под водой, на малых глубинах). Расплав не успевает терять значительную часть летучих. Формируются пористые породы со стекловатой или частично кристаллической структурой. Среди эффузивов выделяют **кайнотипные** – сравнительно молодые породы в значительной степени сохранившие свой первичный облик и **палеотипные** – древние породы, подвергшиеся значительным изменениям (широко известно зеленокаменное изменение эффузивов) минерального состава и структуры. В частности типичными является уменьшение пористости с образованием миндалекаменных структур.

Состав определяется содержанием SiO_2 и номером плагиоклазов (соотношение Ca и Na). Нормальный (щелочноземельный) ряд магматических пород представлен всеми разновидностями от кислых (содержание SiO_2 около 70%), до ультраосновных (содержание SiO_2 около 40%). Щелочной ряд представлен ограниченным набором пород типа сионитов с составом, соответствующим средним -основным породам.

Таблица 6

Порода	$\delta\ (\frac{г}{см^3})$	Порода	$\delta\ (\frac{г}{см^3})$
Гранит фанерозоевский	2.57	Сиенит	2.62
Гранит докембрийский	2.59	Сиенит нефелиновый	2.66
Гранодиорит	2.69	Липарит	2.35
Диорит кварцевый	2.75	Кварцевый порфир	2.60
Диорит	2.81	Андезит	2.49
Габбро	2.95	Андезит-й порфирит	2.73
Пироксенит	3.2	Базальт	2.54
Перидотит	3.2	Диабаз	2.79

В таб. 6 приведены средние значения плотности основных типов магматических пород. По этим данным составлена диаграмма (рис. 3.1) зависимости средней плотности от состава магматических пород. Состав выражен через содержание SiO_2. В нижней части диаграммы приведены названия интрузивных, кайнотипных эффузивных и палеотипных эффузивных пород соответствующего состава.

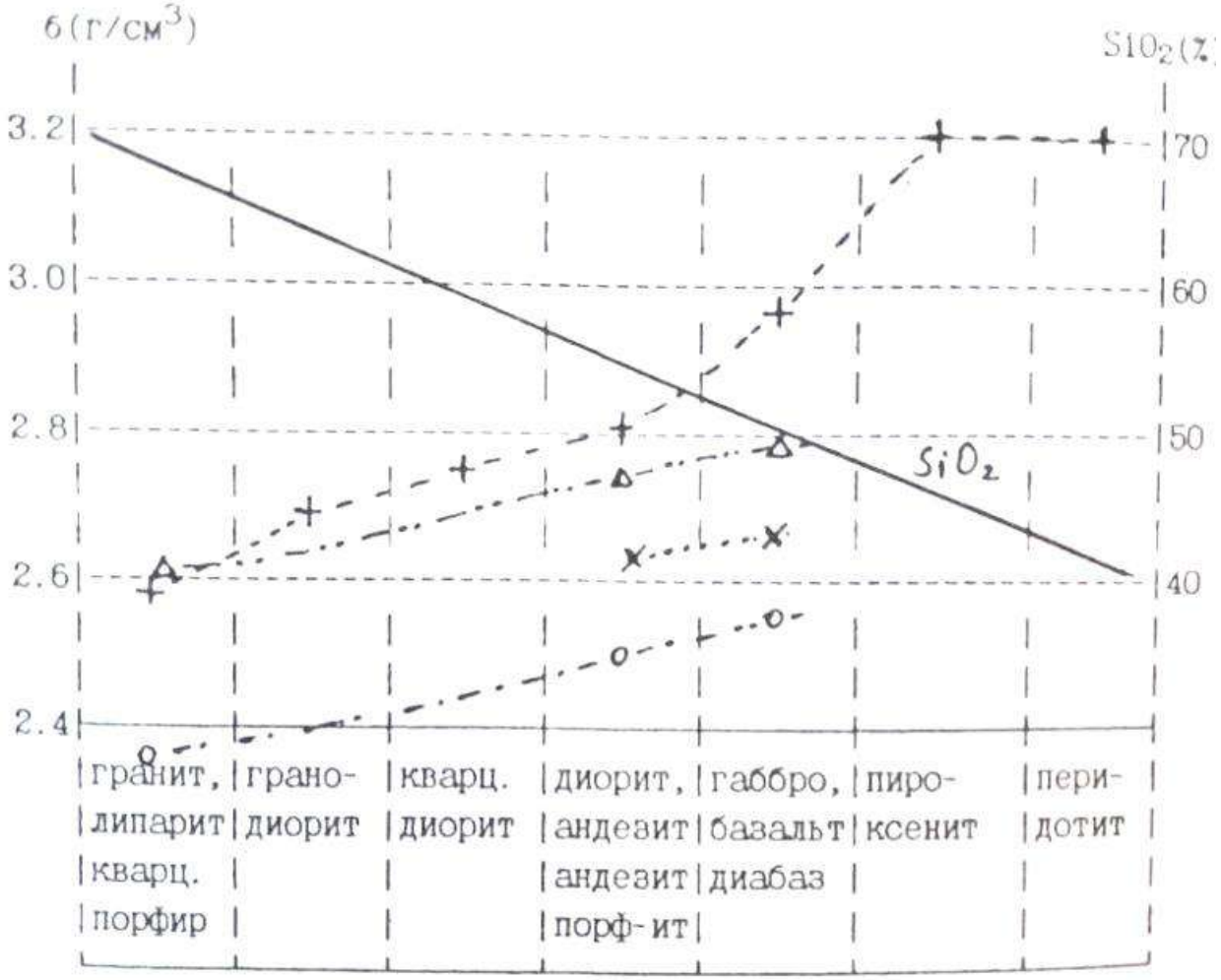


Рис.3.1. Зависимость средней меткости магматических пород от состава. (+ интрузивнне породы щелочноземельного ряда, х интрузивные породы щелочного ряда, о кайнотипные эффузивы, Δ палеотипные эффузивы).

Сделаем основные вывод:

1.Из таблицы и диаграммы следует закономерное возрастание плотности по мере увеличения основности (уменьшения содержания SiO_2), что обусловлено возрастанием количества плотных темноцветных минералов.

2. Разница в средних плотностях между соседними группами по основности составляет около ± 0.1 г/см^3. т.е. является **значимой** (например, позволяет разделять эти породы по уровню гравитационного поля над ними).

3.Графики зависимости плотности от состава интрузивных и палеотиных эффузивных пород практически совпадают. Причина этого – близость составов и пористости. Исключение составляют породы основного

ионного состава. причины этого будут рассмотрены ниже.

4. Бросается в глаза существенно меньшие плотности кайнотипных зффузивов. Причина — высокая пористость.

Вероятные отклонения от средних значений в каждой группе интрузивных и палеотипных зффузивных пород составляют 0.1Г/см^3, у кайнотипных зффузивов 0.15г/см^3. Эти отклонения связаны с влиянием двух основных факторов;

1. В каждой петрографической группе объединены по сути различные породы. Например. среди гранитов выделяют аляскитовые, мусковитовые, двуслюдяные, роговообманковые и т.д. Таким образом, в пределах группы возможны вариации состава породообразующих, минералов и, следовательно, плотности. Так, среди пород типа габбро есть и анортозиты (состоят на 90-95%. из плагиоклаза — лабрадора) с плотностью 2.69 г/см^3, и оливиновое габбро (плагиоклаз и до 20 % оливина) с плотностью 3.07г/см^3.

2.Любая порода, кроме породообразующих, содержит и акцессорные (второстепенные) минералы. В кислых породах это апатит ($\delta = 3.19$), циркон ($\delta = 4.7$), магнетит ($\delta = 5.1$), ильменит ($\delta = 4.79$). В породах основного состава это магнетит, титаномагнетит ($\delta = 4.72$), сульфиды ($\delta = 4.7 - 4.9$). В ультраосновных - магнетит, титаномагнетит. Количество акцессорных минералов может меняться от тысячных долей процента до нескольких процентов, что и приводит к вариациям плотности для ряда районов установлено увеличение содержания акцессорных минералов в рудоносных магматических комплексах, что может служить поисковым признаком.

Процессы автометаморфизма (серпентинизация, амфиболизация) Оказывают существенное влияние на плотность магматических пород. При серпентинизации массивов ультраосновных пород пироксены и оливин преобразуются в серпентин — минерал, содержащий гидроксильную группу. с плотностью 2.55 г/см^3. На рис. 3.2 представлен график зависимости плотности от степени серпентинизации. Нацело серпентинизированные породы имеют плотность, соответствуют кислым магматическим породам, это обстоятельство приходится учитывать при интерпретации данных гравиразведки. дальнейший процесс метаморфизма связан с карбонатизацией, при которой плотность возрастает.

Амфиболизация характерна для пород основного состава и проявляется в преобразовании пироксена в амфиболы и плагиоклазы с выделением хлорита, эпидота, серицита — минералов с меньшей плотностью.

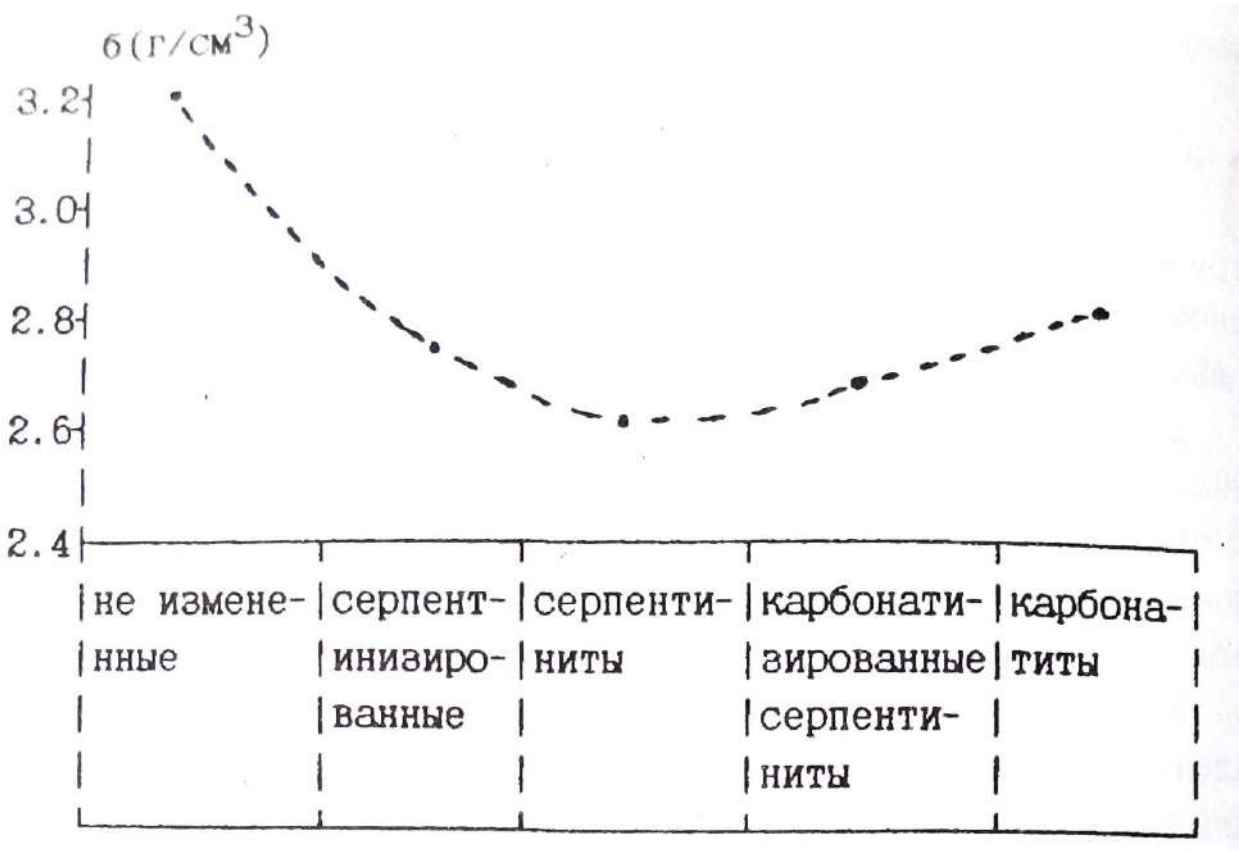


Рис 3.2. Изменение плотности ультраосновных перед
пород в процессе серпентинизации и карбонатизации

Таким образом, амфиболизация сопровождается уменьшением плотности. Обратите внимание, что на рис. 3.1 плотность диапазон меньше плотности их интрузивного аналога — габбро. Диабаз это порода, претерпевшая метаморфические изменения, и её плотность соответствует амфиболизированному габбро. Процессы локального метаморфизма (метасоматоза) могут сопровождаться как уменьшением, так и увеличением плотности. В таблице 7 приведены данные по изменению плотности для типичных процессов.

Таблица 7

Порода	$\delta\left(\frac{г}{см^3}\right)$ измененных	Процесс	$\delta\left(\frac{г}{см^3}\right)$ не измененных
Гранодиорит	2.65	Серицитизация	2.55
Гранодиорит	2.67	Хлоритизация	2.61
Порфирит	2.76	Окварцевание	2.65
Диорит	2.8	Альбитизация	2.63
Гранит	2.6	Грейзенизация	2.77
Порфирит	2.7	Эпидотизация	2.85

Локальные изменения плотности используются как поисковый признак, так как процессы рудообразования сопровождаются локальным метасоматозом.

3.3.2. ОСАДОЧННЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

ОБЛОМОЧНЫЕ ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

В таблице 8 приведены значения минеральной плотности (плотность твердой Фаза) основных типов обломочных пород.

Порода	$\delta_{\text{ср}}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{min}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{max}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$
Песчаник	2.67	2.58	2.76
Алевролит	2.69	2.62	2.76
Аргилит	2.68	2.69	2.78
Глина	2.68	2.58	2.78

Отметим близкие значения бар, из чего следует зависимость плотности в основном от пористости и характера заполнения порового пространства. Для водонасыщенных и газонасыщенных пород плотность ($\delta_{\text{В}}, \delta_{\text{Г}}$) соответственно равна:

$$\delta_{\text{В}} = (1 - \text{К}_{\text{П}})\delta_{\text{Т}} + \text{К}_{\text{П}}\,\delta_{\text{Т}} \quad (3.5)$$

$$\delta_{\text{Г}} = (1 - \text{К}_{\text{П}})\delta_{\text{Т}} \quad (3.6)$$

где $\text{К}_{\text{П}}$ - коэффициент пористости, $\delta_{\text{Т}}$- плотность твердой фазы, плотность воды. Учитывая постоянство минеральной плотности, в Обоих случаях имеем линейную зависимость плотности от пористости. На рис. 3.3 приведены зависимости, рассчитанные для $\delta_{\text{Т}}$=2.68г/см^3 и результаты изучения плотности реальных пород. Расчетные и экспериментальные данные достаточно близки. Изменение пористости на 1% приводит к изменению плотности на на 0.03 и 0.02 г/см^3, соответственно для газонасыщенных и водонасыщенных пород. Эти цифры полезно запомнить поскольку они определяют требования к точности измерения плотности геофизическими методами (гамма—гамма каротаж, акустический каротаж) с целью оценки пористости коллекторов.

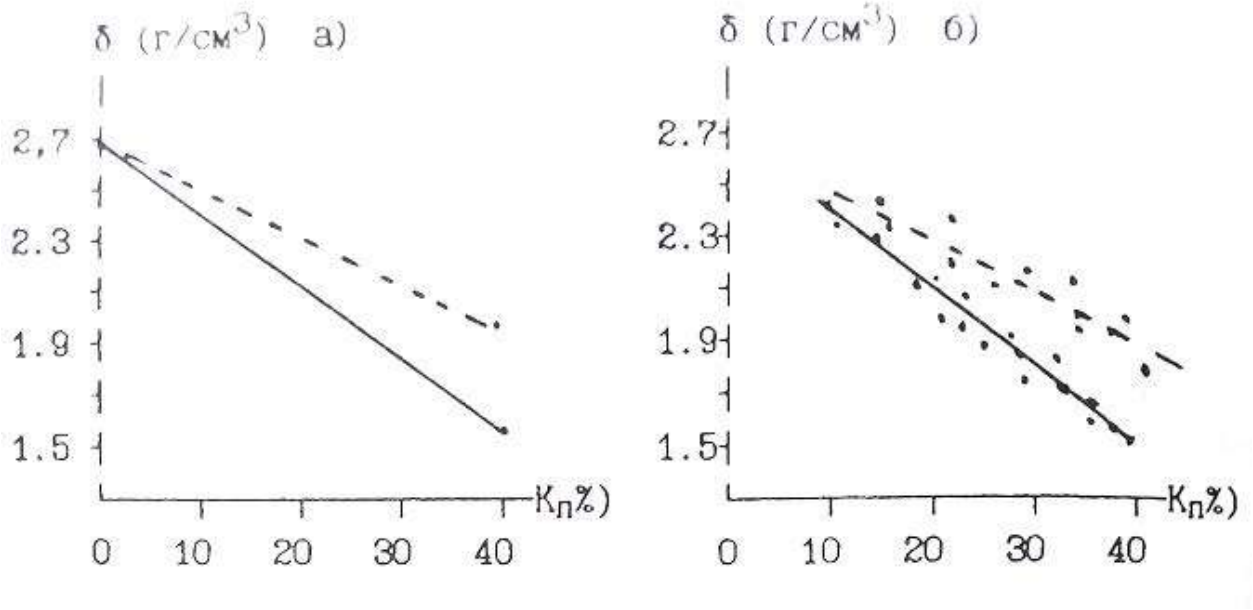


Рис. 3.3. Зависимость плотности обломочных осадочных пород от пористости, а) расчет, б) экспериментальные данные для песчано-глинистых отложении. - водонасыщенные - газонасыщенные

Как отмечалось ранее, в результате уплотнения под нагрузкой вышележащих слоев происходит закономерное уменьшение пористости обломочных пород. Если в выражении 3.5 и 3.6 подставить значения пористости из 2.5, то получим зависимость плотности от глубины залегания:

$$\delta_{\Gamma}(H) = \delta_{\mathrm{T}}(1 - \mathrm{K}_{\mathrm{П}}(0) * \exp(-0.45\,H)) \qquad (3.7)$$

$$\delta_{\mathrm{B}}(H) = \delta_{\mathrm{T}} + \mathrm{K}_{\mathrm{П}}(0) * (1 - \delta_{\mathrm{T}}) * \exp(-0.45\,H) \qquad (3.8)$$

где $\mathrm{K}_{\mathrm{П}}(0)$ - пористость на поверхности, Н — глубина в км.

Таблица 9

Порода	$\delta\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ пределы	$\delta\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ наиб. вероят.
Глины	1.20-2.40	-
Аргилиты	1.70-2.90	2.30-2.40
Пески	1.30-2.00	1.50-1.70
Песчаники	2.00-2.90	2.50-2.65
Алевролиты	1.80-2.80	2.30-2.50
Конгломераты	2.10-3.00	-

В таблице 9 приведены значения плотности обломочных осадочных пород. Основные выводы:

1) Плотность обломочных осадочных горных пород (вероятные значения) ниже плотности магматических пород.
2) Плотность меняется в широких пределах. что связано с широким диапазоном возможных значении пористости.
3) Интервалы плотности основных типов обломочных пород в значительной степени перекрываются.

КАРБОНАТНЫЕ ОСАДОЧННЕ ПОРОДЫ

В таб.10 приведены значения минеральной плотности карбонатных пород.

Таблица 10

Порода	$\delta_{\text{ср}}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{min}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{max}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$
Мел	2.69	2.56	2.80
Известняк	2.72	2.62	2.80
Доломит	2.80	2.76	2.88
Мергель	2.70	2.58	2.80

Отмечаются значимые различия средних плотностей. Поэтому плотность карбонатных пород будет определяться минеральным составом, пористостью и характером заполнения перового пространства. Представления о плотности этих пород иллюстрируются таб. 11.

Таблица. 11

Порода	$\delta\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ пределы	$\delta\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$ наиб. вероят.
Известняки	1.80-2.90	2.60-2.70
Доломиты	1.90-3.00	2.60-2.80
Мергели	1.50-2.80	2.20-2.40

Для этой группы пород остаются справедливым пункты 2 и 3 выводов, которые получены для обломочных пород. Дополнительно отметим более высокую плотность известняков и доломитов, которая близка к плотности кислых и средних магматических пород.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ ,

Для этих пород характерна низкая пористость, и их плотность в основном определяется минеральным составом. Плотность гипсов лежит в пределах 2.10 — 2.50 г/см^3, ангидритов 2.50—2.90 г/см^3, каменной соли 2.15 — 2.30 г/см^3. Приведем пример соотношения плотностей осадочных комплексов с вытекающими из этого особенностями геофизических полей. Среди структур, вмещающих углеводородное сырье. существуют так называемые диапировые структуры или структуры протыкания. Они образуются в результате выжимания ("Всплывания") соляных куполов сквозь толщ обломочных осадочных пород. Соотношение плотностей приведено на рис. 3.4 а).

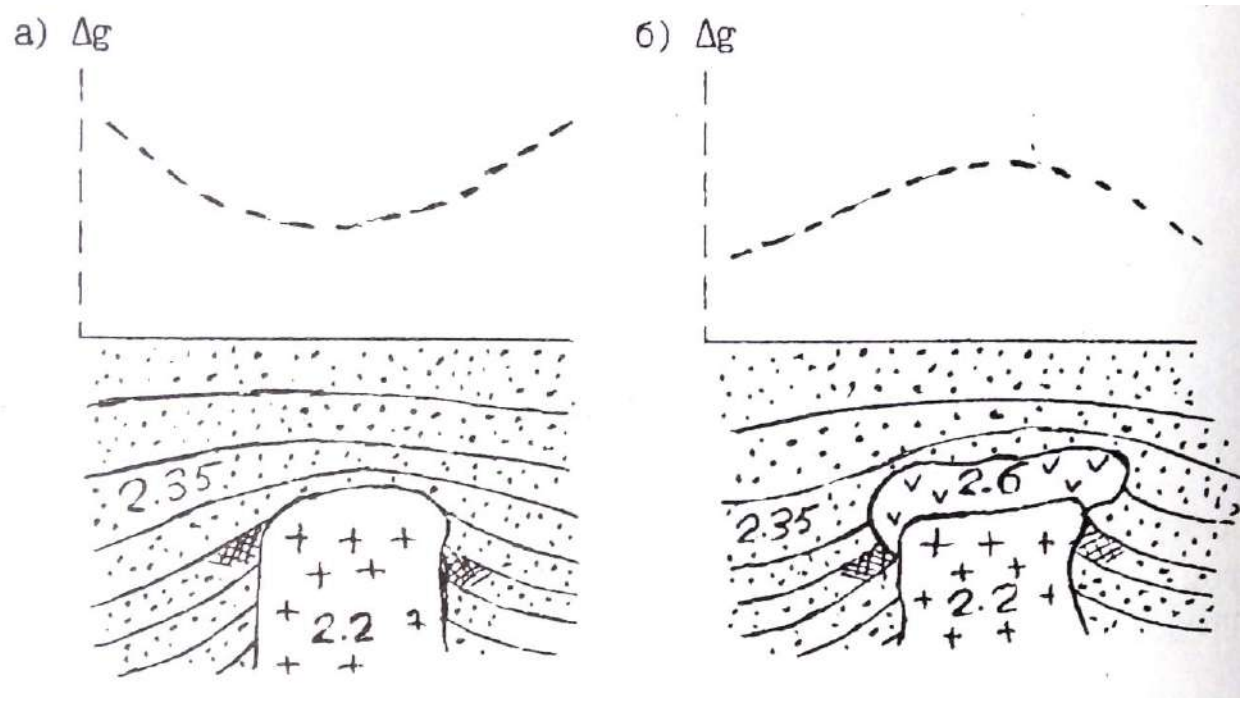


Рис. 3.4. Характер распределения плотности и ускорение силы тяжести над соляно-купольными структурами (песчано-глинистые отложения, + - каменная соль, — ангидритн, - приращениеускорения силы тяжести, - нефтеносность)

Плотность каменной соли (2.20 г/см^3) меньше плотности песчано-глинистых отложении (2.35 г/см^3). Это обуславливает недостаток масс соляного куполам над структурой наблюдается Уменьшение силы тяжести (Кривая Δg,рис.3.4. а)). Однако, возможно и более сложное строение соляных куполов (рис.3.4. б)). В верхней части купола образуется покрышка сложенная ангидритами ("каменная шляпа") с плотностью 2.60 г/см^3.

Избыток масс покрышки может превосходить действие недостатка масс соляного купола, и над структурой наблюдается увеличение силы тяжести. Возможно ситуация баланса этих двух факторов, и над структурой существенного изменения гравитационного поля не будет.

3.3.3. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Метаморфические породы образуются в результате регионального (охватывающего значительные площади и объемы пород) преобразования магматических и осадочных пород под действием высокой температуры и давления. В основу классификации метаморфических пород положены условия (фация) метаморфизма, структурно-текстурные особенности и состав породы. В порядке возрастания термодинамических условии выделяют следующие фации: зеленых сланцев. эпидот-амфиболитовую, амфиболитовую, гранулитовую, эклогитовую. В начальный этап регионального метаморфизма происходит уплотнение первичных осадочных пород в результате уменьшения пористости под действием давления (катагенеза). В фацию зеленых сланцев наблюдается некоторое разуплотнение исходных магматических и подвергнутых катагенезу осадочных пород в результате образования минералов, содержащих кристаллизационную и конституционную воду. Дальнейший метаморфизм сопровождается увеличением плотности за счет полиморфных преобразовании минералов. Образуются новые минералы с уплотненными кристаллическими решетками. данные о плотности метаморфических пород Приведены в таблице 12. При общем закономерном возрастании плотности с увеличением степени метаморфизма, в пределах каждой отмечаются существенные колебания плотности, что отражает влияние минерального состава пород. Интересно отметить, что при так называемом ультраметаморфизме (протекает в условиях относительно пониженного давления и высоких температур, сопровождается полной перекристаллизацией и частичным расплавлением пород) отмечаются существенное уменьшение плотности. Так амфиболиты (3.0 г/см^3) преобразуются в метасоматические граниты (2.6 г/см^3). Процесс гранитизации сопровождается кремний-калиевым метасоматозом с преобразованием плотных минералов (амфиболы, гранаты, биотит) в менее плотные (кварц, микроклин).

Таблица 12

Фация	Порода	$\delta_{\text{ср}}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{min}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$	$\delta_{max}\ \left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right)$
Зеленых сланцев	Филит	2.45	2.40	2.70
	Сланец:			
	Кварцево-серицитовый	2.57	2.50	2.64
	Кремнистый	2.60	2.58	2.62
	Хлоритовый	2.76	2.72	2.80
	Слюдистый	2.65	2.60	2.75
Эпидот-амфиболитовая	Сланец кристаллический:			
	Биотитовый	2.63	2.62	2.63
	Роговообманковый	2.77	2.75	2.80
	Кварцит	2.64	2.62	2.65
	Мрамор	2.70	2.68	2.72
Амфиболитовая	Гнейс:			
	Биотитовый	2.63	2.60	2.68
	Амфиболовый	2.78	2.75	2.82
	Амфиболит:			
	Полевошпатовый	2.87	2.80	2.95
	Гранатовый	3.10	3.00	3.20
Гранулитовая	Гранулит гиперстеновый	2.72	2.60	2.85
	Сланец	3.05	2.90	3.25
Эклогитовая	Эклогит	-	3.20	3.40

3.3.4. ВЛИЯНИЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД.

Процессы гипергенеза в результате химического и механического выветривания приводят к существенному изменению состава и состояния пород. Образуется вторичная пористость в результате растрескивания и выщелачивания, которая достигает 20-30%.

Образующиеся коры выветривания глинисто-слюдистого и хлорито-гюдрослюдистого состава с гидроокислами железа, обломками кварца, микроклина, биотита имеют пониженную плотность порядка 2.1-2.5 г/см^3.

Вопросы для самопроверки:

1. *Какие причины создают неоднородность физический свойств горных пород?*
2. *Как строятся гистограммы распределения физический свойств горных пород?*
3. *Типы пористости.*
4. *Какие факторы определяют пористость обломочных пород?*
5. *Назовите группы пород с низкой и повышенной пористостью.*
6. *Как изменяется пористость с глубиной?*
7. *Что такое влажность и влагоемкость?*
8. *В каком виде присутствует вода в горных породах?*
9. *Какими особенностями обладает связанная вода?*
10. *Что такое проницаемость?*
11. *Отличие физической проницаемости от фазовой?*
12. *Как классифицируются породы по проницаемости?*
13. *Как образуется двойной электрический слой?*
14. *Каким параметром характеризуется нефтенасыщенность?*
15. *Что такое плотность и минеральная плотность?*
16. *От чего зависит плотность минералов?*
17. *Назовите основные факторы, определяющие плотность магматических (инрузивных и эффузивных) и осадочных (обломочных, карбонатных и гидрохимических) пород.*
18. *Рассчитайте плотность водонасыщенного и газонасыщенного печсчаника с коэффициентом пористости 25%.*

Литература:

1. В.М. Добрынин, В.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. Петрофизика: Учебник для вузов. -М: Недра, 1991.
2. В.Н. Кобранова. Петрофизика: Учебник для вузов -М: Недра, 1986.

Оглавление

Введение……..... 3
1. Статистическая природа физических свойств……..... 4
2. Коллекторские свойства……..... 8
2. 1. Пористость..... 9
2.1.1. Классификация пор……..... 10
2.1.2. Пористость обломочных осадочных пород……..11
2.1.3. Пористость карбонатных осадочных пород……....14
2.1.4. Пористость гидрохимических осадочных пород.....15
2.1.5. Пористость магматических и метаморфических пород.....15
2.1.6. Пористость гидротермально измененных пород….....16
2.2. Влажность, влагоемкость…….....17
2. 3. Проницаемость 19
2.3.1. Физическая проницаемость 19
2.3.2. Связь коэффициента проницаемости с коэффициентом пористости и структурой перового пространства……..20
2.3.3. Фазовая проницаемость 23
3. Плотностные свойства 24
3.1. Основные понятия и определения 24
3.2. Плотность минералов 25
3.3. Плотность горных пород 28
3.3.1. Магматические породы 28
3.3.2. Осадочные породы 33
3.3.3. Метаморфические породы 37
3.3.4. Влияние выветривания на плотность пород 38
Вопросы для самопроверки 39
Литература 39

Игорь Иванович Бреднев

ПЕТРОФИЗИКА

Часть 1. Коллекторские и плотностные свойства горных пород

Учебно-методическое пособие по дисциплине «Петрофизика» для студентов профилизации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» (РФ)направления 650200 «Технологии геологической разведки»

Конспект лекций

Корректура кафедры геофизики

Подписано в печать 09.09.2004г.
Бумага писчая. Формат бумаги 60х84 1/16.Печать на ризографе.
Печ.л. 2,8. Уч-изд. л. 2,39. Тираж 100 экз. Заказ №130.

Издательство УГГГА
620144. г. Екатеринбург. УЛ- Куйбышева 30
Уральская государственная горно-геологическая академия
Лаборатория множительной техники

ФГБОУ ВО
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

Кафедра технологии и техники разведки МПИ

Усов Г.А.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ БУРОВЫМ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Учебно-методическое пособие по дисциплине
"Техника разведки"
по самостоятельной работе для студентов
специальности

21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД 4

1.1. Общая характеристика механических способов разрушения горных пород при бурении скважин……4

1.2. Формирование зоны предразрушения при механическом разрушении горных пород……

1.3. Экономическая оценка эффективности разрушения горных пород при бурении……

1.4. Разрушение горных пород буровым инструментом с резцами из твердого сплава…….

1.4.1. Твердые сплавы и их свойства……

1.4.2. Основные типы бурового инструмента, вооруженного твердосплавными резцами……

1.4.3. Разрушение горных пород буровым инструментом с резцами из композиционных алмазосодержащих и поликристаллических алмазов…..

1.4.4. Буровые инструменты с резцами из твердых материалов с поликристаллическими алмазами……..

1.5. Разрушение горных пород алмазным буровым инструментом……

1.5.1. Общие сведения об алмазном буровом инструменте…….

1.5.2. Разработки алмазных инструментов компаний Atlas Copco и Boart Longyear…….

1.5.3.Динамические нагрузки на алмазы в процессе разрушения горных пород……...

1.6. Разрушение горных пород шарошечными долотами…….

1.6.1.Конструкции и вооружение шарошечных долот…….

1.6.2.Системы очистки забоя и интенсификация процесса разрушения при бурении шарошечными долотами……

1.7.Разрушение горных пород при вращательно-ударном, ударно-вращательном и ударном способах бурения…….

1.7.1.Разрушение горных пород при вращательно-ударном способе бурения……

1.7.2.Разрушение горных пород алмазным инструментом в режиме вращательно-ударного бурения……

1.7.3.Разрушение горных пород шарошечными долотами в режиме вращательно-ударного бурения……..

1.7.4.Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения…..

1.7.5.Разрушение горных пород при ударном способе бурения……..

1.8.Взрывное разрушение……..

1.8.1.Понятие о взрыве……..

1.8.2.Механизм разрушения пород взрывом……

2. БУРОВОЙ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ…….

2.1. Классификация породоразрушающих инструментов .....

2.2. Конструкции породоразрушающих инструментов.....

2.2.1. Лопастные породоразрушающие инструменты.....

2.2.2. Шарошечные породоразрушающие инструменты.....

2.2.3. Вооружение шарошечных породоразрушающих инструментов.....

2.2.4. Системы очистки забоя и элементов вооружения шарошечных породоразрушающих инструментов.....
2.2.5. Опоры шарошек шарошечных породоразрушающих инструментов.....
2.2.6. Система герметизации маслонаполненных опор шарошечных породоразрушающих инструментов.....
2.2.7. Типы и основные размеры шарошечных долот по ГОСТ 20692−75.....
2.2.8. Лицензионные шарошечные долота производства ОАО «Волгабурмаш» ...
2.2.9. Одношарошечные долота.....
2.2.10. Система кодирования износа шарошечных долот, принятая в России.....
2.2.11. Кодирование износа шарошечных породоразрушающих инструментов по кодам IADC.....
2.3. Алмазные долота, долота ИСМ и PDC.....
2.3.1 Алмазные долота.....
2.3.2. Кодирование износа алмазных (классических) долот.....
2.3.3. Долота ИСМ.....
2.3.4. Долота PDC.....
2.3.5. Кодирование износа долот PDC.....
2.4. Бурильные головки.....
2.4.1. Шарошечные и лопастные бурильные головки по ГОСТ 21210−75.....
2.4.2. Алмазные бурильные головки и бурильные головки ИСМ и PDC.....
2.5. Фрезерный инструмент…….
2.5.1. Фрезеры забойные и торцевые…….
2.5.2. Фрезеры забойно-кольцевые…….
2.5.3. Фрезеры кольцевые……..
2.5.4. Фрезеры пилотные……
2.5.5. Фрезеры колонные конусные (райберы)……..
2.5.6. Фрезеры-ловители магнитные……..
2.6. Элементы бурильной колонны……..
2.6.1. Калибраторы……...
2.6.2. Калибраторы-расширители……..
2.6.3. Переводники……
Литература.....

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1. Общая характеристика механических способов разрушения горных пород при бурении скважин

Вращательное бурение резцовым твердосплавным инструментом (лопастными долотами, твердосплавными коронками).

Данный способ и инструменты предназначены для бурения мягких и средних по твердости горных пород как при роторном (с вращением бурильной колонны) бурении, так и бурении забойными двигателями – турбо-, электробурами, винтовыми забойными двигателями.

Реализуются резание и скалывание под действием: $P_{ос}$ – осевого усилия и $F_р$ – усилия резания (рис. 1.1).

Параметры резца: α – угол приострения резца; $\gamma_п$ -передний угол резца; $\gamma_з$ – задний угол резца; $\beta_р$ – угол резания.

Основные формы резцов: I – с положительным передним углом; II – с отрицательным передним углом; III – самозатачивающийся резец.

Вращательное бурение буровым инструментом с резцами из композиционных алмазосодержащих материалов и поликристаллических алмазов. Применяется для бурения мягких, горных пород средней твердости с пропластками твердых при роторном бурении и бурении турбо -, электробурами, винтовыми забойными двигателями.

Элементом вооружения являются вставки из композиционного материала славутич или алмазно-твердосплавные пластины *PDC (policristalline diamont cutters) Stratapax* (*General Electric*, США*), Sindit* (*De Beers*, ЮАР), алмазно-твердосплавные пластины – АТП (ИСМ и ВНИИалмаз).

Пластинами *PDC* оснащают резцы бурового инструмента, предназначенные в основном для бурения мягких пород и пород средней твердости. Передний угол резцов с *PDC* $\gamma_п$ изменяется от –5 до –25° (рис.1.2).

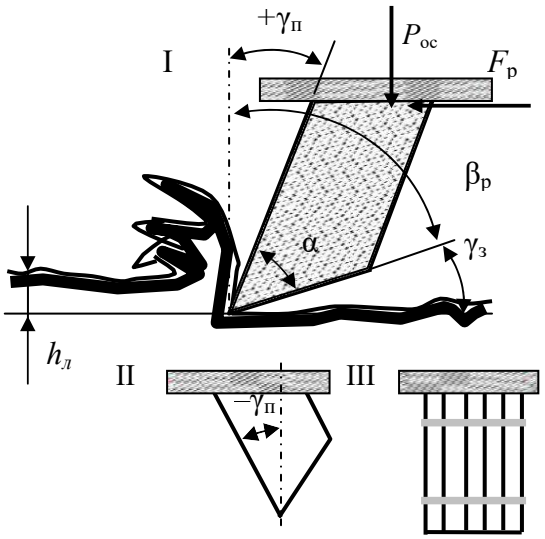


Рис. 1.1. Схема параметров вооружения твердосплавного инструмента

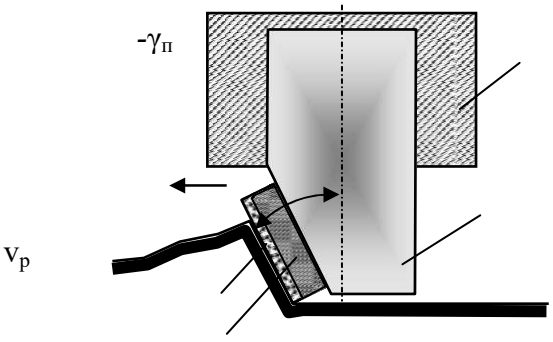


Рис. 1.2. Резец с пластиной PDC: 1 – слой поликристаллических алмазов; 2 – подложка из твердого сплава; 3 – твердосплавная опора; 4 – корпус коронки

При бурении пластично-хрупких пород разрушение осуществляется вдавливанием, резанием и сдвигом. При бурении хрупких пород (твердых) наблюдается раздавливание и скалывание породы алмазными резцами пластинки.

Вращательное бурение алмазным однослойным инструментом (алмазные долота, головки, коронки). Применяется для бурения горных пород средней твердости и твердых.

При бурении алмазным инструментом реализуются смятие, раздавливание, резание, скалывание породы.

Основная форма резцов:

- дробленый (необработанный) алмаз (по мере износа приобретает овальную форму);
- округлый – овализованный алмаз;
- округлый – полированный алмаз.

Размер резцов определяется зернистостью используемых алмазов. Зернистость алмазов изменяется в основном от 5–10 до 150–200 шт. на карат (1 карат = 0,2 г). Соответственно размер зерен от 3–2,5 мм до 0,8 и менее.

Овализованные и полированные алмазы реализуют в основном раздавливание, необработанные алмазы с острыми гранями резание-скалывание. Для повышения эффективности разрушения алмазы в коронках могут устанавливаться ориентированно наиболее твердыми гранями в направлении резания-скалывания.

При повышении размера алмаза процесс разрушения видоизменяется от резания к скалыванию, далее к раздавливанию и к упругому деформированию.

Более крупные и дробленые алмазы применяют для бурения менее твердых горных пород, более мелкие, овализованные и полированные, для бурения твердых и крепких горных пород.

Алмазный резец закреплен в твердосплавной матрице (WC+Co) и для эффективного разрушения может выступать из матрицы на высоту, в основном, не превышающую ⅓ диаметра алмаза.

Алмазный инструмент характеризуется разновысотностью резцов ($h_1 \neq h_2 \neq h_3$ на рис. 1.3), которая максимальна на начальном этапе бурения – приработке инструмента.

Для повышения эффективности разрушения горных пород алмазный инструмент изготавливают с заданным выступанием алмазов из матрицы.

Для эффективного разрушения горной породы необходимы высокие значения частоты вращения инструмента (800–1 000 мин$^{-1}$).

Вращательное бурение алмазными импрегнированными коронками. Бурение твердых и очень твердых горных пород. При бурении реализуется истирание, микрорезание.

Для эффективного разрушения горной породы необходимы высокие значения частоты вращения инструмента (1 000 мин$^{-1}$и более).

Для изготовления инструмента применяют природные и искусственные алмазы минимальных размеров. Размер зерна 0,9–0,5 мм (зернистость 150 и более шт./кар.).

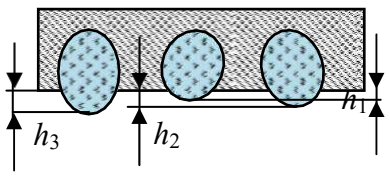


Рис. 1.3. Овализованные алмазы в матрице коронки.

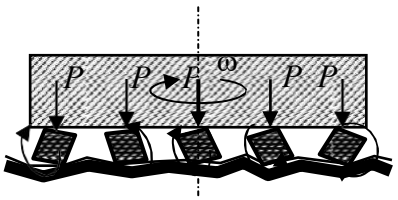


Рис.1.4. Схема работы дробовой коронки

Вращательное бурение дробовыми коронками (дробью). Бурение твердых и очень твердых горных пород (рис. 1.4). Реализуется смятие, раздавливание, скалывание.Дробовое бурение в значительном объеме применялось до периода широкого использования алмазного инструмента.

Вращательное бурение шарошечными долотами. Инструмент дробящее-скалывающего действия показан на рисунке 1.5.

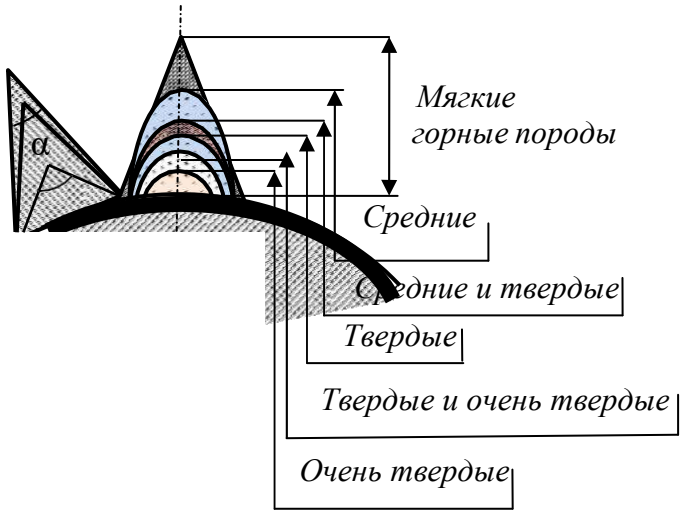


Рис.1.5. Геометрические размеры породоразрушающих элементов шарошечных долот для бурения различных по твердости горных пород

Способ предназначен для бурения горных пород как мягких, так и средней твердости, твердых и самых твердых. При бурении реализуются раздавливание, дробление, скалывание, резание породы при проскальзывании шарошек.

Этапы разрушающего действия:

- косой удар – скалывание породы под действием усилия P_y;
- раздавливание породы иуглубление лунки под действием усилия P_z;
- скалывание и подрезание породы при проскальзывании в направлении вращения шарошки.

По мере увеличения твердости горных пород от мягких до средних угол приострения α клиновидных зубьев увеличивается от 30–40 до 80–90°, а размер породоразрушающих зубьев и вставок уменьшается (рис. 1.5). Для бурения твердых и очень твердых пород используются овальные и шарообразные твердосплавные вставки.

Инструмент безударного раздавливающего действия. При бурении дисковые долота, вращаясь, перекатываются по забою и острыми ребрами шарошек раздавливают породу под действием осевого усилия и развиваемых в породе контактных напряжений.

Инструмент с зубчато-дисковыми шарошками. Реализует разрушение мягких и средней твердости горных пород резанием-скалыванием зубьями дисковых шарошек *1*, установленных в радиальном направлении относительно корпуса долота (рис. 1.6, 1.7). Вращение и перекатывание шарошек по забою происходит за счет зацепления зубьев с образовавшейся криволинейной поверхностью у стенки скважины.

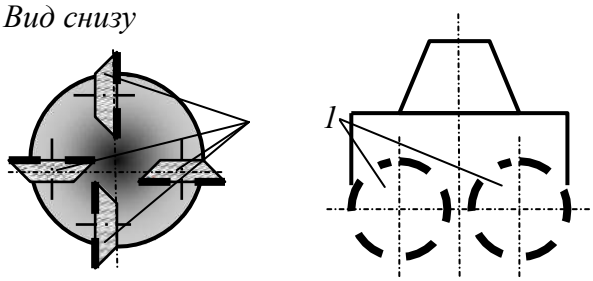


Рис. 1.6. Схема долота с зубчато-дисковыми шарошками

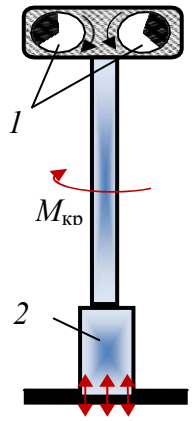


Рис. 1.7. Схема вибрационного бурения

Ударное бурение. Реализуется дробление и скалывание упругохрупких горных пород под действием удара.

Для бурения используются ударные способы разрушения горных пород под действием энергии сбрасываемого с определенной высоты бурового снаряда, например ударно-канатное бурение (способ применялся для бурения нефтяных скважин до 1900 г.) или забивной способ с помощью устройства ударного действия.

Комбинированное (с вращательным) механическое разрушение горных пород. Ударно-вращательный способ бурения. Реализуется разрушение за счет удара высокого уровня энергии, а вращение инструмента носит вспомогательный характер, определяя схему поражения забоя породоразрушающими вставками долота или коронки. Для бурения используются гидро-, пневмоударники и буровой инструмент с резцами в основном клиновидной и шарообразной формы. Способ успешно применяется для бурения горных пород самой различной твердости и при сооружении скважин различного назначения – взрывных, гидрогеологических, инженерно-геологических, геологоразведочных и др., диаметра и глубины.

Вращательно-ударный способ бурения. Способ применяется для бурения твердых горных пород алмазным инструментом при сооружении в основном геологоразведочных скважин.

При бурении реализуется разрушение породы за счет действия осевой силы и усилия резания. Ударное воздействие на породу с высокой частотой, но малой энергией дополняет породоразрушающее воздействие на породу основных факторов, характеризующих врашательное бурение – осевая нагрузка и частота вращения. Для бурения используются алмазный однослойный буровой инструмент или шарошечные долота и высокочастотные гидроударники.

Гидромеханический способ бурения. Реализуется при вращательном способе бурения скважин, при котором горные породы разрушаются под воздействием стационарных высоконапорных тонких струй промывочной жидкости (воды или бурового раствора) и механических породоразрушающих элементов (резец, шарошка).

Струями воды формируются щели в породе, а механическим инструментом производится скалывание ослабленных межщелевых блоков. При гидромеханическом разрушении осуществляется непрерывное динамическое и статическое воздействие на забой. Давление жидкости, необходимое для гидромеханического разрушения рыхлых пород, 20–50 МПа, мягких и средней твердости – 70–100, очень твердых – более 150 МПа. Рациональные окружные скорости перемещения насадок 10–40 см/с.

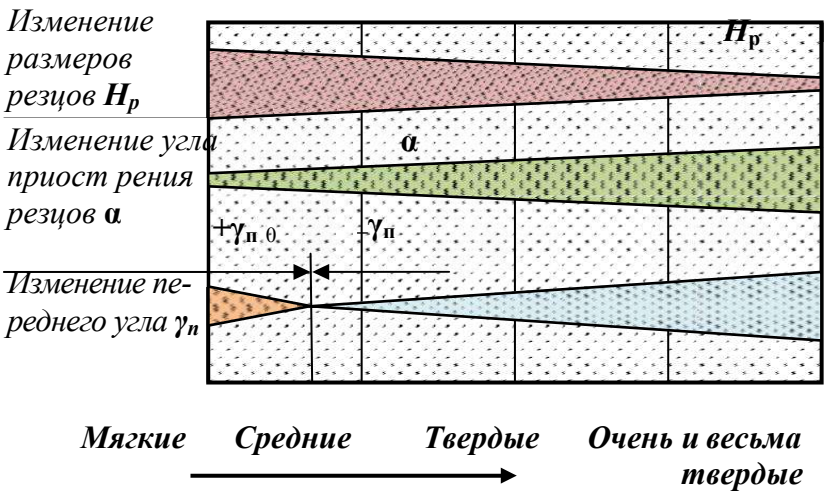
Термомеханический способ бурения. Вращательный способ бурения горных пород твердосплавным или алмазным буровым инструментом с одновременным нагреванием до высокой температуры торца инструмента и горной породы на забое.

Нагревание породы снижает ее твердость и упругость, повышает пластичность.

Вибрационное бурение. При вибрационном бурении используются приостренные наконечники (грунтоносы), которые соединяются через бурильные трубы с вибратором (рис. 1.7). Применяется для бурения преимущественно несвязных горных пород (пески). Углубление скважины происходит практически без разрушения горной породы за счет разуплотнения вследствие уменьшения сил трения между слабосвязанными частицами породы.

Компания *Sonic Samp Drill* разработала технику бурения на основе ударного бурения и высокочастотных вибраций для бурения самых прочных пород. Применение вибрационной установки колонкового бурения (рис. 1.7) позволяет в 1,5–2 раза увеличить производительность по сравнению с традиционными видами бурения. В зависимости от модели буровой установки колонкового бурения вибрационная мощность импульса составляет до 350 кН. В основе системы *Sonic* заключены два эксцентрика *1*, которые приводятся в движение двумя высокоскоростными (12 000 мин$^{-1}$) гидромоторами. Гидромоторы генерируют высокочастотные (до 180 Гц) вибрации, которые непосредственно передаются на буровой башмак *2* и вызывают активное разупрочнение и разрушение горной породы.

На рис. 1.8 приведены схемы, поясняющие связь основных параметров резцов буровых инструментов, таких как размер, угол приострения и передний угол, с твердостью горных пород.



Схема, обозначающая параметры резцов $H_р$, α, $\gamma_п$.

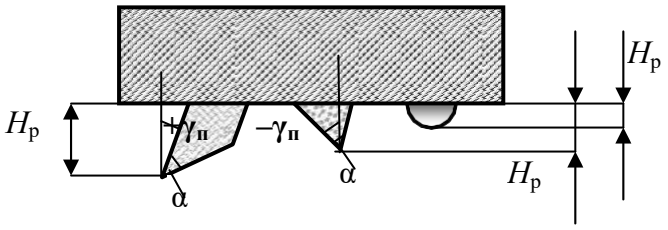


Рис. 1.8. Схемы, показывающие связь размеров резцов H, угла их приострения α и переднего угла $\gamma_п$ с твердостью горных пород.

Как следует из схемы на рис. 1.8, с увеличением твердости горных пород размеры резцов $H_р$ уменьшаются, угол приострения α возрастает, передний угол $\gamma_п$ из положительного становится отрицательным, а его отрицательное значение увеличивается по мере повышения твердости горных пород.

Наиболее производительным из механических способов бурения скважин в твердых породах является процесс бурения забойными пневмоударниками в режиме ударно-вращательного бурения при высоком значении давления подаваемого воздуха (механическая скорость более 20 м/ч по самым твердым породам).

Вращательное и вращательно-ударное бурение алмазным инструментом, шарошечными долотами твердых пород значительно уступают по производительности пневмоударному бурению.

При соударении шаров с твердой горной породой со скоростью порядка нескольких десятков метров в секунду она разрушается. Продукты разрушения частично циркулируют с инжектируемой жидкостью, измельчаются и выносятся из скважины восходящим потоком промывочной жидкости.

При бурении скважин на нефть и газ в настоящее время основными инструментами остаются шарошечные долота, реализующие дробяще-скалывающее воздействие на горную породу и долота режуще- скалывающего действия с резцами типа *PDC*. Если для современных шарошечных долот проходка на долото может составлять 100–200 и даже несколько сотен метров при скорости бурения 10–20 м/ч, то до- лота с резцами *PDC* показывают выдаю щиеся результаты при разрушении мягких и горных пород средней твердости: проходка может достигать 1 000 и более мет- ров, а механическая скорость 20–40 м/ч.

Например, в Эвенкии в июле 2012 г. успешно произведена отработка матричного *PDC* долота 215,9 мм серии *Tornado* производства компании *DDI*, США (рис. 1.9). Бурение осуществлялось ротором и винтовым гидродвигателем. Проходка на долото составила 1 150 м до первой реставрации при средней скорости бурения 20 м/ч, максимальная скорость достигала 40 м/ч.

Рис. 1.9. Долото PDC Tornado после проходки 1150 м.

1.2. Формирование зоны предразрушения при механическом разрушении горных пород

При механических способах бурения одновременно с отделением от массива продуктов разрушения горной породы в призабойном пространстве формируется особый слой породы, который ослаблен развитой системой микротрещин. Академик П. А. Ребиндер назвал этот слой породы зоной предразрушения [22].

Зона предразрушения горной породы имеет распространение по поверхности забоя, ствола скважины и керна. С точки зрения интенсификации процесса бурения и снижения энергоемкости разрушения горной породы наиболее продуктивна зона предразрушения забоя скважины.

Причинами появления зоны предразрушения являются напряжения и деформации горной породы, которые распространяются равномерно во все стороны от точек приложения разрушающих усилий со стороны породоразрушающих резцов и вставок бурового инструмента.

Таким образом, образование зоны предразрушения – закономерность процесса механического разрушения горных пород, проявляющаяся при всех механических

способах бурения.

Закономерности формирования зоны предразрушения исследовались с применением метода люминесцентной дефектоскопии. Зона предразрушения изучалась в призабойных участках пробуренных алмазным импрегнированным инструментом стволов скважин. Бурение осуществляли при различных осевых нагрузках и фиксировали углубление за один оборот инструмента на забое. После бурения производилась обработка призабойной зоны ствола люминесцентными жидкостями, обладающими высокой смачивающей и проникающей способностью. Полученные срезы призабойной зоны в дальнейшем исследовались на люминесцентном дефектоскопе. По свечению люминесцентной жидкости определяли область распространения трещин зоны предразрушения.

Результаты замеров глубины развития зон предразрушения, образовавшихся при бурении гранит-порфира, габбро и кварцито-песчаника, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты исследования зоны предразрушения

Порода	Показатели	Осевая нагрузка, даН				
		250	500	750	1 000	1 250
Гранит-порфир	Глубина зоны предразрушения $h_з$, мм;	1,8	2,5	2,85	3,0	3,1
	Углубление за оборот h, мм;	0,024	0,039	0,051	0,056	
	$h_з/h$	75	64	56	53	
Габбро	Глубина зоны предразрушения $h_з$, мм;	0,18	0,35	0,4	0,51	0,55
	Углубление за оборот h, мм;	0,0175	0,0335	0,039	0,055	0,0645
	$h_з/h$	10,2	10,4	10,2	9,2	8,5
Кварцито-песчаник	Глубина зоны предразрушения $h_з$, мм;	1,2	1,65	1,87	2,1	2,1
	Углубление за оборот h, мм;	0,0075	0,0125	0,0185	0,0215	0,024
	$h_з/h$	160	132	101	97	87

Как следует из полученных данных, зона предразрушения по своей глубине значительно превышает величину проходки за один оборот инструмента на забое (рис. 1.10). Это соотношение особенно велико в хрупких горных породах, а минимально у более пластичного габбро. С ростом осевого усилия в диапазоне 250–750 даН величина зоны предразрушения возрастает, а при дальнейшем повышении осевого усилия глубина развития зоны предразрушения увеличивается незначительно.

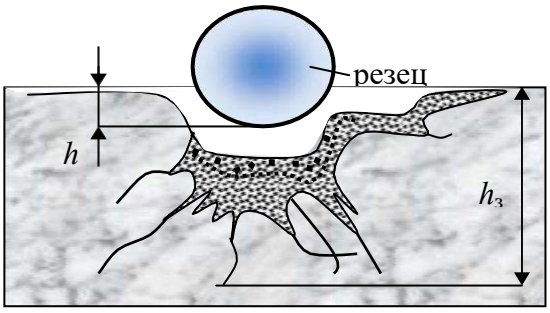


Рис. 1.10. Борозда разрушения и зона предразрушения, образовавшиеся при разрушении гранита резцом.

Исследование зоны предразрушения в тех же горных породах после бурения твердосплавными резцами показало, что наблюдаются выявленные при алмазном бурении закономерности, но глубина развития зоны предразрушения в сравнении с глубиной разрушения породы резцом значительно уменьшилась, особенно у габбро, что связано со значительным увеличением размеров резцов, снижением удельных контактных напряжений на породу и размеров ядра сжатия породы в сравнении с

глубиной внедрения резцов.

Таким образом, в результате экспериментов удалось установить:

- при взаимодействии бурового инструмента с породой помимо зоны разрушения формируется образованная системой микротрещин зона предразрушения;
- зона предразрушения образуется при всех рассмотренных видах взаимодействия инструмента с породой – резании, резании-скалывании, раздавливании и смятии;
- зона предразрушения способствует разрушению горной породы при дальнейших циклах нагружения;
- глубина развития зоны предразрушения при разных способах бурения и применяемых инструментах различна, но при этом сохраняются общие закономерности развития образующих зону предразрушения трещин;
- в пластичных горных породах и мягких минералах зона предразрушения не образуется.

Зона предразрушения в упруго-хрупком долерите и упругопластичном анизотропном спекшемся туфе изучалась визуально в процессе экспериментальных работ.

Из образцов забоев скважин, полученных после разбуривания блоков пород, были изготовлены шлифы для изучения в отраженном свете под микроскопом *Polam C-111*.

Для изготовления шлифов использованы штуфы забойных зон долерита и спекшегося туфа, полученные при бурении алмазным однослойным инструментом с водой и водным раствором 0,3 % сульфонола.

В процессе изучения шлифов под микроскопом сделаны фотографические снимки зон предразрушения горных пород.

С учетом вычисленных значений увеличения микроскопом и фотографическим аппаратом рассчитаны приближенные значения мощностей зон предразрушения горных пород.

На рис. 1.11 представлен фотографический снимок зоны предразрушения в образце долерита. На снимке показано, что зона предразрушения в твердой породе, в данном случае долерите, состоит из двух областей (границы областей на рис. 1.11 обозначены пунктирными линиями): чрезвычайно разрушенной и ослабленной трещинами. При этом мощность первой составляет 0,17 мм, а мощность второй 1,7 мм (см. рис. 1.11). Можно отметить, что форма зоны предразрушения практически повторяет форму забоя.

В спекшемся туфе, упругопластичной анизотропной породе зона предразрушения представлена также двумя областями (рис. 1.12): чрезвычайно разрушенной и пластических деформаций. Область чрезвычайно разрушенной (смятой, разрыхленной) породы расположена на глубине 0,12 мм от забоя породы. Область пластических деформаций охватывает призабойную область и область стенки скважины. Примерная мощность данной области – 0,42 мм.

Образец, фотографический снимок которого приведен на рис. 1.12, получен при бурении с осевым усилием – 600 даН, частотой вращения – 150 мин$^{-1}$ с применением эмульсионного промывочного агента.

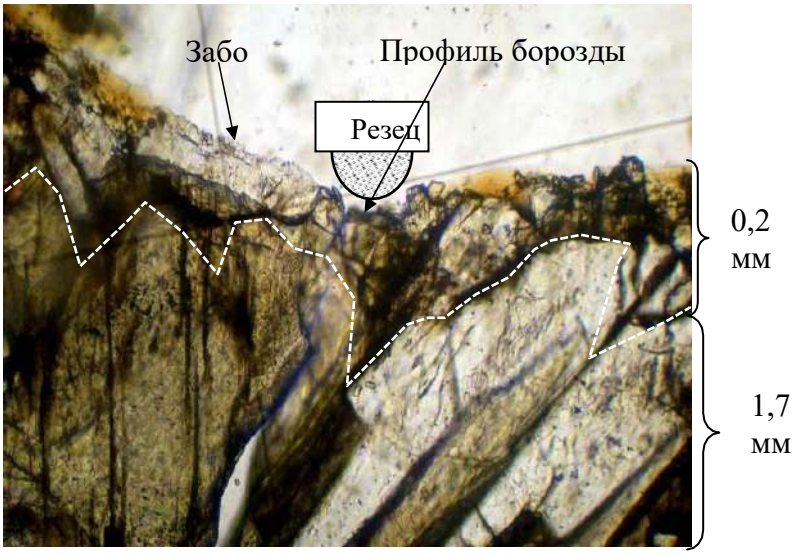


Рис. 1.11. Фотографический снимок зоны предразрушения в образце долерита с указанием областей, составляющих зону предразрушения: 0,2 мм – чрезвычайно разрушенной породы; 1,7 мм – ослабленной трещинами

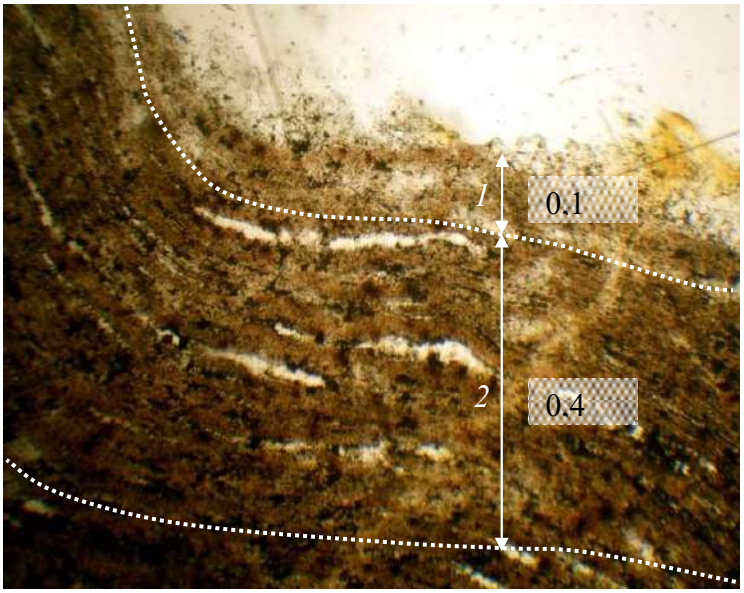


Рис. 1.12. Фотографический снимок зоны предразрушения в образце спекшегося туфа с указанием размеров областей, составляющих зону предразрушения: *1* – разрушенной породы; *2* – пластических деформаций.

По результатам проведенного исследования на данной стадии работ можно сделать следующие выводы:

- размеры зоны предразрушения увеличиваются при повышении осевого усилия и несколько снижаются с ростом частоты вращения бурового инструмента;
- зона предразрушения в упруго-хрупком долерите представлена чрезвычайно разбитой трещинами породы, при этом трещины развиваются, как правило, между минеральными зернами, разрушению также подвергаются более хрупкие кристаллы;
- в породах более пластичных (спекшийся туф) зона предразрушения развивается в виде «разрыхленной», смятой породы без образования явных трещин;
- трещины зоны предразрушения анизотропных пород развиваются преимущественно вдоль плоскостей слоистости, сланцеватости или флюидальности.

Зона предразрушения горной породы при бурении является объектом

технологического воздействия с целью интенсификации процессов разрушения, например за счет адсорбционного понижения прочности.

Цель подобного воздействия – развитие зоны предразрушения, ослабление поверхностного слоя забоя скважины и снижение энергоемкости разрушения горных пород при бурении.

1.3. Экономическая оценка эффективности разрушения горных пород при бурении

Экономическая оценка эффективности бурения оценивается стоимостью метра пробуренной скважины. Зависимость для расчета стоимости метра имеет следующий вид:

$$C_{м} = \frac{C_{ст}}{T \cdot v_{м}} \left(1 + \frac{T - T_{б}}{l_{р}} \right) + \frac{Ц}{L}, \qquad (1.1)$$

где: $C_{т}$ - стоимость станко-смены, руб.; T – длительность станко-смены, ч;

$T_{б}$ - время, затраченное непосредственно на углубление ствола скважины, ч;

Ц – стоимость бурового инструмента, руб.;

$v_{м}$ – механическая скорость бурения, м/ч;

$l_{р}$ – длина рейсовой проходки, м; L – проходка буровым инструментом (ресурс инструмента), м.

При бескерновом бурении длина рейсовой проходки равняется проходке буровым инструментом.

При колонковом бурении длина рейса ограничивается длиной керноприемной трубы, что при бурении снарядом со съемным керноприемником требует прекращения углубки ствола, подъема и последующего спуска керноприемника, что несколько снижает время, затрачиваемое непосредственно на углубление ствола скважины. Бурение снарядом без съемного керноприемника требует подъема всей бурильной колонны из скважины для извлечения керна, что еще более снижает долю времени $T_{б}$.

Из зависимости (1.1) следует, что стоимость метра бурения определяется такими параметрами, как механическая скорость бурения, стоимость бурового инструмента и его ресурс.

Анализ зависимости показывает, что на стоимость метра пробуренной скважины наиболее значительно влияет ресурс инструмента, а повышение механической скорости бурения будет оправдано при условии сохранения эффективного ресурса бурового инструмента.

На рис. 1.13 приведена кривая, равная стоимости 1 м проходки скважины, в координатах проходки на буровой инструмент и механической скорости бурения, по данным И. Ф. Вовчановского, для долот типа ИСМ. Из приведенных зависимостей следует, что одинаковую стоимость 1 м бурения скважины можно получить как путем увеличения механической скорости бурения, уменьшив при этом стойкость бурового инструмента, так и в результате повышения стойкости инструмента, но снижения механической скорости бурения. Выбор оптимального варианта сочетания стойкости бурового инструмента и механической скорости бурения следует производить с учетом глубины скважины.

При возрастающей глубине скважины более важной характеристикой будет большая стойкость инструмента, что позволит повысить время, затраченное на углубление скважины в балансе общих затрат времени на производство работ.

При бурении неглубоких скважин, когда спуско-подъемные операции занимают сравнительно малую долю в общем балансе производительного времени, можно допустить вариант форсированного бурения на высоких механических скоростях, но с несколько ограниченным ресурсом инструмента.

Поиск оптимальных условий производства буровых работ, параметров режима бурения, ориентированных на минимальную стоимость метра пробуренной скважины, является типичной задачей оптимизации.

При решении этой задачи опытным путем можно получить зависимости, отражающие влияние параметров режима бурения на ресурс бурового инструмента и значения механической скорости бурения при определенных постоянных значениях глубины скважины, горно-геологических условиях бурения и применяемых типах бурового инструмента. Полученные данные позволяют рассчитать стоимость метра проходки для каждого варианта сочетания параметров режима бурения и выбрать, таким образом, оптимальные параметры режима бурения для определенных условий производства работ.

На рис. 1.14 приведены подобные кривые, отражающие многосложную связь условий и параметров, определяющих себестоимость бурения шарошечными долотами большого диаметра. Как следует из графиков, по минимуму стоимость метра проходки следует выбрать из следующих параметров режима бурения: частота вращения долота 400 мин$^{-1}$, осевая нагрузка около 180 кН, так как повышение частоты вращения долота приводит к снижению проходки на долото и повышению стоимости метра бурения.

Оптимальные параметры режима бурения, выбор которых осуществляется по минимуму стоимости метра проходки, как правило, соответствуют наиболее эффективному процессу разрушения горных пород, характери- зующимуся минимальными затратами энергии на разрушение, высокими значениями механических скоростей бурения и эффективным ресурсом бурового инструмента.

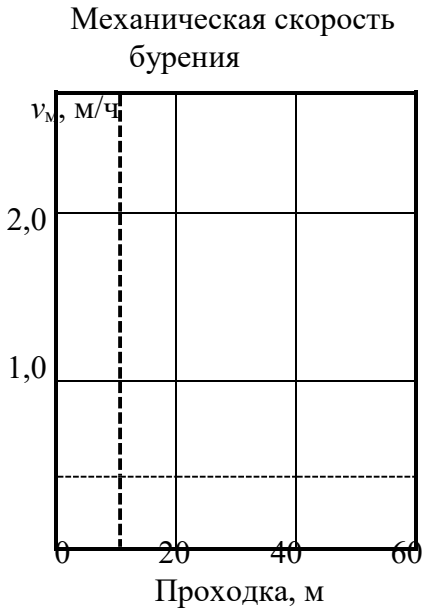


Рис. 1.13. Зависимость стоимости 1 м бурения от проходки и механической скорости бурения

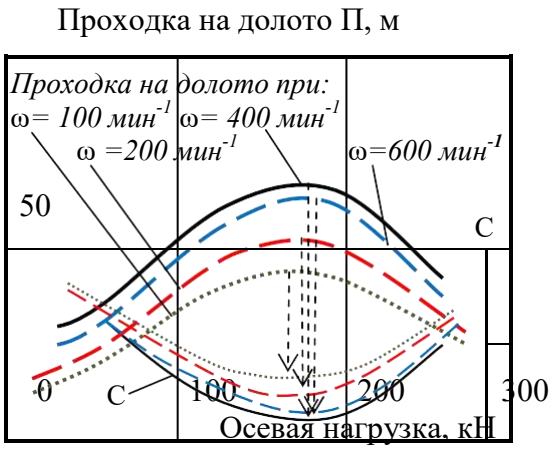


Рис. 1.14. Зависимости проходки на долото П и стоимости метра проходки на долото С от параметров режима бурения

Пример 1. При бурении на месторождении используются двухшарошечные долота типа ДДА-59 и трехшарошечные долота типа 3Ш-59К- ЦА. При равной стоимости – 3 000 рублей за долото, эти долота показывают различную механическую скорость – 12 и 9 метров в час и ресурс – 9 и 12 м соответственно. Стоимость станкосмены продолжительностью 8 ч – 32 000 руб. Время бурения в общем балансе затрат времени на производство работ – 50 %.

Рассчитаем стоимость метра бурения долотом ДДА-59:

$$C = \frac{32\,000 \cdot 1}{8 - 4 \cdot \left(+ \frac{3\,000}{+} \right) = 2\,52}$$

Аналогично рассчитаем стоимость метра бурения трехшарошечными долотами. В этом случае стоимость метра бурения составит 2 010 руб.

Для повышения эффективности бурения долотами ДДА произведена их модернизация путем размещения двух гидромониторных насадок (работы выполнены Иркутским отделением ВИТР). Стоимость долот, получив- ших обозначение ДДА-С, повысилась до 3 500 руб. Испытания показали, что достигнут рост механической скорости на 20 % – (14 м/ч) и проходки на долото на 40 % – (12 м).

Стоимость метра бурения долотом ДДА-С составила 1 897 руб., что подтвердило эффективность модернизации долот в сравнении со стандартным инструментом.

Пример 2. При бурении на месторождении применяют снаряд со съемным керноприемником (КССК). Длина керноприемника 4,5 м, что задает значение рейсовой проходки $l_р$ = 4,5 м. Ресурс буровой коронки 50 м, её стоимость 5 000 руб. Механическая скорость бурения 4,5 м/ч. При стоимости станко-смены 32 000 руб., длительности смены 8 ч и затратах времени непосредственно на бурение 6 часов стоимость метра скважины будет равна:

$$C = \frac{32\,000 \cdot 1}{8 - 6 \cdot \left(+ \frac{5\,000}{+} \right) = 2\,740 \text{ руб.}} \qquad \frac{\text{м}}{8 \quad 4{,}5 \quad 4{,}5 \quad 50}$$

Ограничение длины рейсовой проходки до 2,5 м в связи с заклиниванием и истиранием керна при бурении трещиноватых пород привело к повышению непроизводительных затрат и снижению времени, затрачиваемого на бурение до 5 ч, ресурса инструмента до 40 м и механической скорости бурения до 4 м/ч, что следующим образом отразилось на повышении стоимости метра:

$$C_м = \frac{32\,000 \cdot 1}{8} \cdot \left(+ \frac{8 - 5 \cdot \left(+ \frac{5\,000}{+} \right)}{4} \right) = 5\,925 \text{ руб.}$$

Таким образом, влияние рейсовой проходки и ресурса бурового ин- струмента наиболее значительно при формировании затрат на бурение.

При бурении скважины буровым снарядом без съемного керноприемника произойдет рост затрат времени на проведение спуско-подъемных операций (СПО) и

снижение доли времени $T_б$.

При бурении неглубоких скважин (до 200–250 м) при прочих равных условиях в сравнении с КССК или ССК это не приведет к значительному росту стоимости метра бурения, но может отразиться на качестве керна и, соответственно, на стоимости бурения, если, например, для повышения сохранности керна при бурении потребуется несколько ограничить длину рейсовой проходки.

При проходке более глубоких скважин (250–300 м) затраты на бурение снарядом со съемным керноприемником будут значительно ниже, даже при большей длине керноприемной части колонкового набора. Например, если время бурения $T_б$ будет равно 3 ч, при длине колонковой трубы 6 м, то при сохранении значений всех остальных данных, использованных в первом расчете, стоимость метра бурения

$$C_м = \frac{32\,000 \cdot 1}{8 \cdot 4{,}5} + \frac{8-3}{6} \cdot 5\,000 + \frac{5\,000}{50} = 4\,300 \text{ руб.}$$

Если для повышения сохранности керна в колонковой трубе потребуется ограничить длину рейсовой проходки, это приведет к еще более значительному росту стоимости метра бурения. Например, если длина рейсовой проходки будет равна рейсу при бурении КССК – 4,5 м, то стоимость метра бурения составит

$$C_м = \frac{32\,000 \cdot 1}{8 \cdot 4{,}5} + \frac{8-3}{4{,}5} \cdot 5\,000 + \frac{5\,000}{50} = 5\,0$$

руб.

При последних расчетах не учтено, то обстоятельство, что при проведении СПО, особенно в наклонных и искривленных скважинах, снижается ресурс как бурового снаряда, так и дорогостоящего бурового инструмента вследствие изнашивания о стенки скважины при подъеме и спуске. Опыт буровых работ показывает, что изнашивание буровых коронок и долот, расширителей, калибраторов в процессе спускаподъема может быть очень велик. Другой эффект от применения снарядов со съемным керноприемником состоит в том, что при спуско-подъемных операциях перепады давления промывочной жидкости, вызванные перемещением снаряда вызывают разрушение стенок скважины и их обваливание, соответственно сокращение операций СПО способствует сохранению ствола скважины без каких-либо дополнительных технологических операций. По этим причинам расчетная стоимость метра бурения снарядом без съемного керноприемника может быть еще выше. Соответственно, будут еще более значительны аргументы в пользу выбора для производства работ снарядов со съемным керноприемником, особенно если учесть, что в настоящее время отечественными и зарубежными производителями предлагаются буровые коронки, ресурс которых может составлять не десятки, а сотни метров.

1.4. Разрушение горных пород буровым инструментом с резцами из твердого сплава

При вращательном бурении разрушение рыхлых, мягких и горных пород средней твердости, пластичных и упругопластичных успешно осуществляется резанием или резанием-скалыванием буровыми коронками или долотами, вооруженными твердосплавными резцами.

При разрушении горных пород реализуются:

- резание, т. е. непрерывное отделение пластичной породы или стружки кромкой прижатого к забою резца;
- скалывание, т.е. периодическое отделение осколков породы от забоя прижатым к породе с достаточным осевым усилием резцом или путем приложения ударного импульса к резцу;
- резание-скалывание, т. е. отделение крупных частей породы скалыванием или отрывом передней гранью резца с последующим срезанием мелких выступов до нового акта скалывания.

1.4.1. Твердые сплавы и их свойства

Твердосплавный породоразрушающий инструмент армируют главным образом спеченными твердыми сплавами различной формы и размеров.

Наплавочные твердые сплавы используют для повышения износостойкости лопастных долот режущего типа, шарошечных долот для бурения мягких горных пород и средней твердости, специальных коронок для вращательного бурения и башмаков обсадных колонн. Преимуществом наплавочных материалов является возможность многократного восстановления бурового инструмента. Основной материал для наплавок – релит, который характеризуется невысокой, в сравнении со спеченными твердыми сплавами, твердостью и износостойкостью.

Для армирования бурового инструмента используют в основном спеченные вольфрамокобальтовые твердые сплавы типа ВК, которые имеют большую твердость, сочетающуюся с высокой износостойкостью при нагреве до 1000°. Сплавы ВК почти не подвергаются заметной деформации, имеют большую прочность на сжатие, но в то же время обладают невысокой прочностью на изгиб и растяжение, небольшой ударной вязкостью.

Спеченные твердые сплавы состоят из карбида вольфрама WC и кобальта Co в различных процентных отношениях. Карбид вольфрама придает сплаву значительную твердость и износостойкость. Он не магнитен, имеет высокую теплопроводность и весьма хрупок.

Кобальт – ковкий и вязкий металл, в расплавленном состоянии он хорошо смачивает зерна карбида вольфрама и при затвердении прочно связывает их.

Спеченный сплав типа ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15, ВК20, ВК25 изготавливают из порошковой смеси карбида вольфрама и кобальта путем прессовки в специальных графитовых пресс-формах и спекания при температуре ниже температуры плавления карбидов.

Цифры в марке сплава соответствуют процентному содержанию кобальта, в зависимости от которого сплавы отличаются прежде всего прочностью на изгиб, плотностью и твердостью.

Прочность на изгиб у сплава ВК3 составляет 1 100 МПа (минимальная), у сплава ВК25 – 2 000 МПа (максимальная). При этом более твердым является сплав ВК6 – 90 МПа. Твердость сплава ВК25 – 82 МПа.

Твердость сплава возрастает с увеличением содержания карбида вольфрама и уменьшением размеров его зерен. По структуре сплавы разделяются на мелко-, средне- и крупнозернистые. Мелкозернистые сплавы с размером зерен 1 мкм имеют индекс «М», крупнозернистые с размером зерен до 3–5 мкм индекс «В», среднезернистые – зерно 1–2 мкм не имеют индекса.

При увеличении содержания кобальта и зернистости возрастает ударная вязкость сплава. Предел прочности резцов из твердых сплавов может быть существенно повышен упрочнением, например охлаждением в азоте или алмазным шлифованием. Алмазное шлифование удаляет с поверхности резцов дефектный слой, что существенно повышает предел прочности сплава на изгиб и ударную вязкость на 20–50 %, ударную дол-

говечность в 10 раз.

С учетом основных физико-механических свойств среднезернистые и крупнозернистые сплавы с малым содержанием кобальта применяют для армирования инструмента, работающего в условиях безударных нагрузок, т. е. бурового инструмента для вращательного бурения. Сплавы со средним и высоким содержанием кобальта используют для армирования инструмента, работающего в условиях ударных нагрузок, т. е. инструмента для ударно-вращательного бурения и шарошечных долот, предназначенных для бурения пород высокой твердости. Эти сплавы обладают наибольшей прочностью, но они менее износостойки.

Более высокие и сбалансированные характеристики имеют сплавы *DP* компании *Sandvik*. Они за счет слоистой структуры, при которой максимальной твердостью вставка обладает на поверхности и в центре, а средний слой характеризуется высокой вязкостью, сочетают высокую прочность, ударную вязкость и твердость поверхности.

Основной проблемой нанесения наплавочных твердых вольфрамкобальновых сплавов является так называемая *температурная деградация*, которая заключается в значительном снижении твердости покрытия вследствие действия высоких температур.

Решение данной проблемы связано с применением тонких электродов, расплавляющихся при меньшей температуре и за меньший временной интервал, что в результате снижает температуру и время наплавления твердого сплава на поверхность бурового инструмента. В результате применения такой технологии уменьшается отрицательное влияние высокой температуры на качество и прочность твердого сплава.

Другим направлением повышения качества упрочнения поверхностей буровых инструментов твердыми сплавами является применение технологии порошковой металлургии. В этом случае достигается качество покрытия, соответствующее прочностным характеристикам твердосплавных вставок.

1.4.2. Основные типы бурового инструмента, вооруженного твердосплавными резцами

Твердосплавные коронки предназначены для колонкового вращательного бурения скважин в мягких и средней твердости горных породах подразделяются на три типа:

- для бурения мягких пород (ребристые, крупнорезцовые) – тип М;
- малоабразивных пород средней твердости (гладкостенные резцовые) – тип СМ;
- абразивных пород средней твердости (гладкостенные, микрорезцовые или самозатачивающиеся) – тип СА.

Эффективность работы коронки во многом зависит от угла заточки α переднего угла $\gamma_п$, угла поворота резцов, их числа и расположения резцов относительно друг друга.

Угол α выбирают в зависимости от характера проходимых пород: чем тверже порода, тем этот угол больше (см. рис. 1.15). Для пород средней твердости рациональным является прямой угол резания α, для мягких – 75–80о. Выход резцов за пределы наружного f2 и внутреннего f1 контура корпуса зависит от твердости пород: 0,75–1,0 мм – при бурении пород средней твердости и твердых и 3–6 мм для бурения мягких пород.

Размер резца (выступание резца над торцом коронки) также зависит от твердости горных пород и для горных пород средней твердости и твердых составляет 1,5–2,5 мм и 3–7 мм – мягких пород.

Разворот резцов относительно радиуса коронки на угол $\varphi_р$ = 10–15^o повышает их сопротивляемость сколу вследствие динамических нагрузок, характерных для бурения трещиноватых, твердых горных пород и пород с включением обломков – брекчий и конгломератов. При этом внутренние резцы размещают с поворотом внутрь коронки, а наружные в направлении внешнего диаметра (рис. 1.15, *б*).

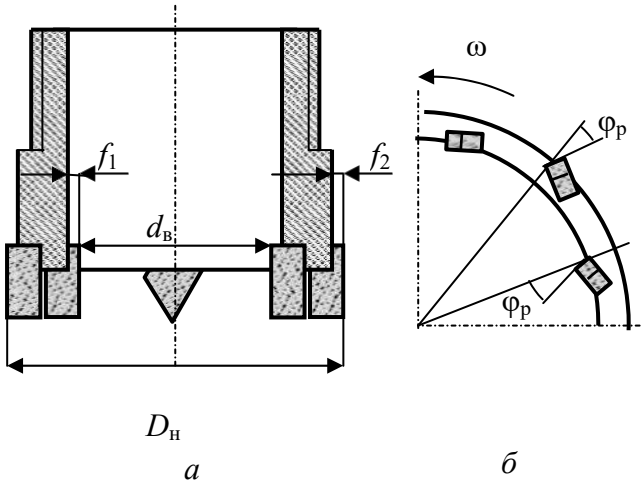


Рис. 1.15. Схема вооружения твердосплавной коронки: *а* – вид сбоку в разрезе; *б* – размещение резцов на торце коронки с поворотом на угол $\varphi_р$ в фронтальной плоскости резания-скалывания

Для бурения твердых и абразивных пород средней твердости применяют резцы с небольшой площадью сечения, которые в процессе работы самозатачиваются.

Эффективно работают резцы в коронке, конструкция которой обеспечивает ступенчатую форму разрушения забоя, так как наличие дополнительных обнаженных поверхностей забоя способствует более эффективному разрушению породы. Как следует из опытных данных, механическая скорость бурения при ступенчатом забое может быть в 1,9 раза выше, чем при плоском.

Коронка с плоскими поверхностями (рис. 1.16, *а*) используется с буровыми снарядами типа *GEOBOR S* для бурения в рыхлых породах. При бурении такими коронками разрушенная порода гранями резцов направляется в стороны, что, в свою очередь, приводит к снижению заклинивания керна.

Коронки с восьмигранными вставками (рис. 1.16, *б*) имеют угол наклона режущих поверхностей 10º. Вставки выполнены из износостойкого сплава ВК. В процессе эксплуатации они могут многократно затачиваться.

Коронка *Corborit* (рис. 1.16, *в*) имеет чрезвычайно шершавую многогранную рабочую поверхность, полученную при спекании матрицы, состоящей из зерен карбида вольфрама и специального сплава, который, расплавляясь, связывает зерна карбида W. Матрица коронки разделена промывочными каналами. Размер зерен карбида вольфрама от 2 до 5 мм. Матрица коронки разделена промывочными каналами. Размер зерен карбида вольфрама от 2 до 5 мм. Коронка предназначена для бурения мягких, средней твердости и твердых горных пород.

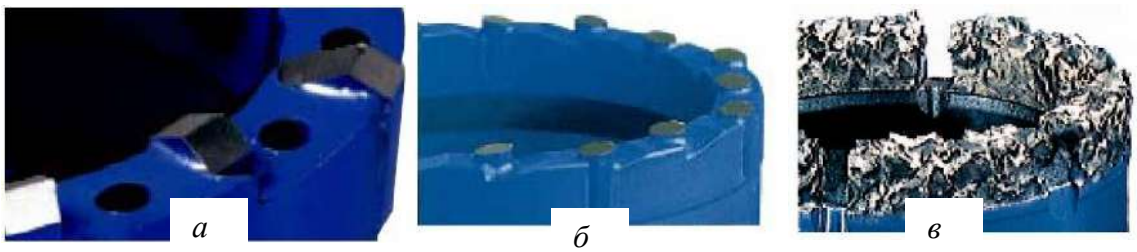


Рис. 1.16. Твердосплавные коронки компании *Atlas Copco*

В процессе бурения коронка с подобным вооружением обладает большим количеством режущих кромок, вступающих в контакт с породой, что позволяет снизить вибрирование в процессе резания-скалывания. Она может применяться для бурения горных пород средней твердости с пропластками твердых горных пород.

Лопастные долота предназначены для бурения в основном мягких и пластичных

горных пород. Лопастные долота подразделяются по количеству рабочих органов в виде лопастей: на одно-, двух-, трех-, четырех-, шести- и многолопастные.

Достоинствами лопастных долот является простота конструкции, отсутствие подшипниковых узлов, крайне уязвимых для абразива, сравнительно низкая стоимость долот при достаточно высоком ресурсе (в мягких породах сотни и тысячи метров).

Недостатки лопастных долот – это интенсивная потеря диаметра долота и износ режущих элементов, работающих при высокой температуре, а также необходимость приложения большого крутящего момента, что особенно сложно обеспечить при бурении забойными двигателями и большом диаметре долот.

Однолопастные долота подразделяются на долота типа Ц, Р и пикобуры.

Долота типа Ц предназначены для разбуривания цементных пробок после цементирования обсадных колонн.

Долота типа Р используют для расширения ствола скважины и его проработки.

Пикобуры для бурения неглубоких скважин в песчано-глинистых породах.

Двухлопастные долота – для бурения преимущественно пластичных и мягких горных пород при относительно небольшой мощности привода.

Долота этой разновидности изготавливаются обычно в малых размерах, диаметром от 93 до 165,1 мм.

Двухлопастные долота выпускают двух типов: М и МС.

Долото трехлопастной конструкции (рис. 1.17) наиболее широко используются при бурении и представлены в самом широком ассортименте.

Их применяют в скважинах различного назначения и с разными типами привода, как забойного, так и роторного (верхний привод). Трехлопастные долота могут выпускаться с обычными промывочными каналами (обычно тремя) и тремя каналами с гидромониторными насадками.

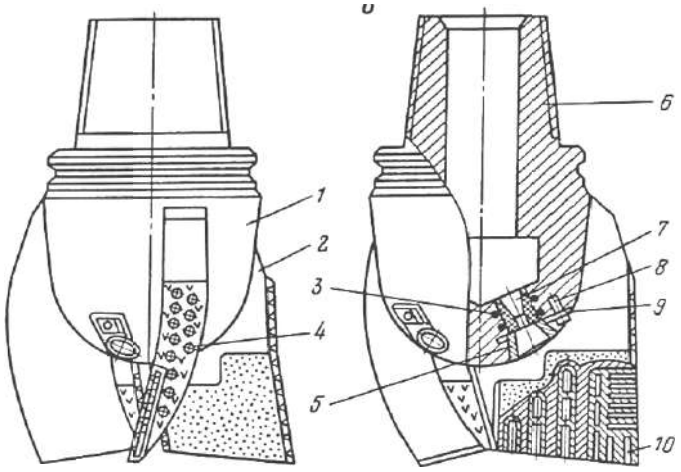


Рис. 1.17. Трехлопастное долото

Долото (рис. 1.17) имеет корпус *1*, лопасти *2*. Боковые поверхности лопастей *2* армируются твердосплавными штырями *3* и релитом, в проме

жутках между штырями. Сопло *7* гидромониторной насадки изготавливают из керамики и устанавливают, герметизируя уплотнительными резиновыми кольцами *4*. Сопло *7* удерживается в гнезде шайбой *5*, которая закрепляется стопорной шайбой *9* при помощи винта *8*. Для соединения с колонной у долота выполняется ниппельная резьба 6. В лезвиях лопастей *2* имеются пазы *10*, в которые укрепляются основные режущие элементы: твердосплавные пластины (долото типа М) или дробленые осколки (долото типа МС).

Долота типа М и МС в модификации с обычным промывочным каналом (пример обозначения 3Л-215,9 МС) выпускаются размером от 120,6 до 444,5 мм, а долота со струйной промывкой (пример обозначения 3ЛГ-244,5М) – диаметром от 190,5 до 444,5 мм.

1.4.3. Разрушение горных пород буровым инструментом с резцами из композиционных алмазосодержащих и поликристаллических алмазов

Для создания бурового инструмента резцового типа могут использоваться композиционные материалы, содержащие отдельные алмазные зерна в металлической и металлокерамической матрицах, к ним относится созданный в 1967 г. материал славутич.

Результаты испытаний показали, что с увеличением размеров алмазных зерен разрушающая нагрузка на них при бурении растет, а предел прочности резко снижается (рис. 1.18). Поэтому применение крупных алмазов, диаметр которых более 1,5 мм, может приводить к интенсивному разрушению резцов. Славутич представляет собой крупный алмазосодержащий резец, который обладает более высокой прочностью, чем крупный алмаз, так как состоит из мелких фракций алмаза, соединенных при спекании с порошковой шихтой твердосплавной основы.

Породоразрушающие вставки изготавливают формованием с последующим спеканием. На рис. 1.19, *а* показана отформованная композиция перед спеканием. Наружная оболочка вставки *1*, окружающая алмазосодержащую композицию *2*, не содержит алмазов. Спекание производится при температуре 1 400–1 460 °С.

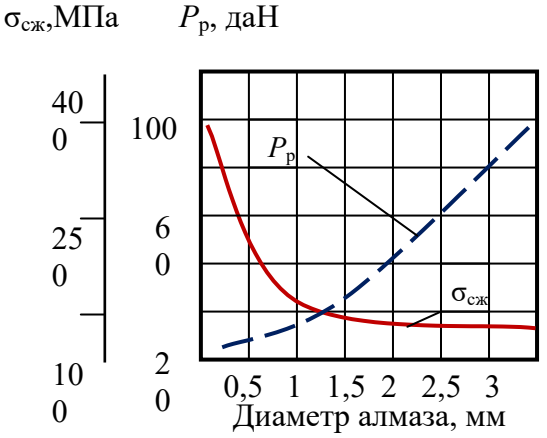


Рис. 1.18. Зависимости предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ и разрушающей нагрузки $P_р$ от размера алмазов

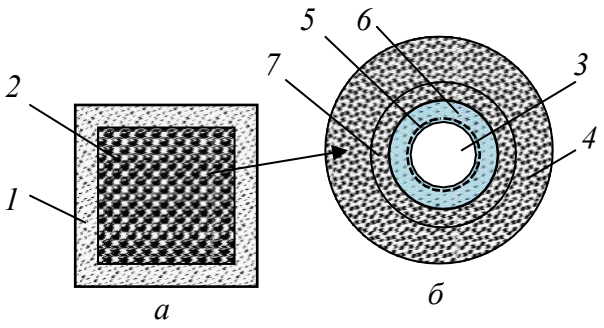


Рис. 1.19. Отформованная вставка славутича (*а*) и структура материала (*б*): *1* – твердо- сплавная оболочка; 2 – алмазосодержащая твердосплавная композиция; *3* – алмаз; *4* – твердый сплав; *5* – зона пластичного материала; *6* – зона контактного взаимодействия алмаза и твердого сплава; *7* – зона твердого сплава повышенной прочности

Выполненные исследования показали, что с увеличением температуры нагрева алмазы активно взаимодействуют с окружающими их металлами, образуя твердые растворы или карбиды. Поэтому при температуре спекания порошка твердого сплава *1*, в котором равномерно распределены алмазы *3*, образуется новая композиционная структура *2*. Алмаз при спекании частично растворяется по контакту с порошком твердого сплава, что приводит к образованию зон контактного взаимодействия 6, пластичного материала *5* и твердого сплава повышенной прочности *7* (рис. 1.19, *б*). Благодаря этому достигается прочное соединение алмаза с твердым сплавом и, таким образом, образуется новый сверхтвердый материал. Данные микроанализа позволили установить, что толщина зоны контактного взаимодействия составляет 4–5 мкм.

Внедрению славутича в промышленность способствовали его высокие эксплуатационные качества, в сравнении с крупными природными алмазами. Не уступая крупным природным алмазам в износостойкости, славутич значительно превосходит их по прочности. Стоимость славутича значительно ниже, чем стоимость крупных природных алмазов. При этом, если применение крупных алмазов для создания бурового инструмента имеет свои ограничения, ввиду их прочности (рис.1.18) и стоимости, то изделия из славутича могут быть изготовлены любых форм и размеров.

Для оснащения бурового инструмента изготавливаются вставки цилиндрической формы с плоским, сферическим и клиновидным рабочими торцами (рис. 1.20). С целью более рационального использования славутича породоразрушающие вставки выполняются с подложкой из твердого сплава. К корпусу бурового инструмента вставки славутича крепятся припаиванием специально подобранным припоем, включающим цинк, фосфор, железо и медь. Пайка осуществляется путем высокочастотного нагрева аппаратом СВЧ.

Для бурения скважин на нефть и газ выпускается различный буровой инструмент типа ИСМ. Это долота режущего (для мягких пород) и микрорежущего типа (для твердых пород), колонковые долота, калибраторы-стабилизаторы, долота для направленного бурения.

На рис. 1.21 показано долото ИСМ для бурения скважин большого диаметра, предназначенное для зарезания нового направления ствола скважины с искусственного (цементного) забоя при многоствольном бурении. На рис. 1.21 обозначено: *1* – корпус долота; *2* – вставки типа «славутич»; *3*, *4*, *5* – промывочные отверстия и каналы.

Для бурения геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые вставки из славутича могут использоваться в коронках для бурения твердых пород и средней твердости.

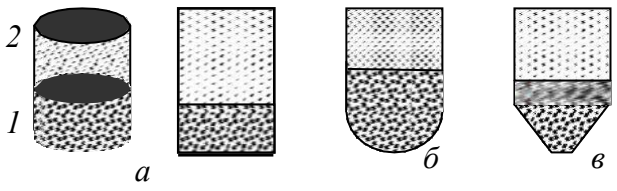


Рис. 1.20. Вставки из славутича:
а – цилиндрическая плоская,
б – сферическая и *в* – клиновидная;
1 – слой славутича;
2 – слой твердого сплава ВК.

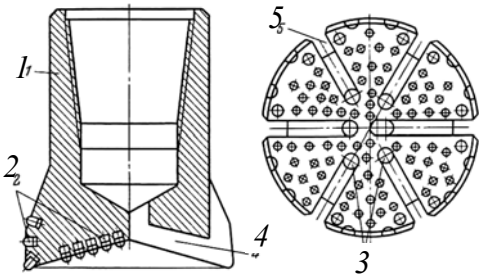


Рис. 1.21. Долото ИСМ с резцами из твердосплавноалмазного композита типа «Славутич».

Коронки типа БСС и БСИ оснащены вставками славутича в подрезном слое на торце коронки, а коронки БС как в торцевом, так и подрезном слое.

Коронки БС различных типов применяются для бурения горных пород средней твердости и твердых.

Кроме коронок с использованием славутича изготавливают также долота и расширители.

При бурении горных пород средней твердости и мягких резцы внедряются в горную породу на глубину, существенно превышающую величину выпуска алмазов из вставки, и единичным резцом следует считать вставку из материала славутич в целом.

Параметры режима бурения буровыми инструментами с резцами славутич выбирают аналогично методикам выбора параметров режима бурения резцовым инструментом при бурении мягких и средней твердости горных пород и определения параметров бурения твердых горных пород алмазным инструментом. Основными данными при выборе параметров режима бурения в данном случае будут физико-механические свойства горных пород и их состояние, а именно: твердость, трещиноватость, слоистость, абразивность и другие признаки, несколько ограничивающие значения частот вращения и осевых нагрузок на инструмент.

1.4.4. Буровые инструменты с резцами из твердых материалов с поликристаллическими алмазами

Другой вариант изготовления алмазосодержащих твердых материалов состоит в создании спеканием либо прессованием поликристаллических алмазов, которые отличаются от композиционных алмазосодержащих материалов типа славутич наличием жесткого каркаса из сросшихся алмазных зерен. К таким материалам, получившим название *PDC (poli- cristalline diamont cutters)*, относится созданный в 1976 г. компанией *Gen- eral Electric* (США) материал *Stratapax*. Компания *De Beers* (ЮАР) выпускает его под названием *Sindet*.

Эти материалы, как показали исследования, не уступают по эксплуатационным качествам крупным природным алмазам и получили широкое распространение. С применением сверхтвердых материалов изготавливаются долота, коронки, расширители, которые успешно заменяют шарошечные долота, твердосплавные коронки, традиционный алмазный инструмент с резцами из природных алмазов, обеспечивая высокий ресурс бурового инструмента. Резцы с пластинами *Stratapax* способны бурить как мягкие породы с высокой механической скоростью, так и твердые с удовлетворительными механической скоростью и стойкостью бурового инструмента. Именно поэтому буровые инструменты, армированные пластинами *Stratapax*, наиболее эффективны при бурении в разрезах, представленных породами перемежающейся твердости и при наличии высокоабразивных горных пород. Таким образом, с появлением резцов с пластинами *Stratapax* удалось получить универсальный буровой инструмент, удовлетворяющий достаточно противоречивым требованиям процесса разрушения мягких пород резанием и твердых пород резанием-скалыванием и раздавливанием. В бурении используются твердосплавные пластины *Stratapax* толщиной 3,5 мм с поликристаллическим покрытием алмазов 0,5 мм. Алмазный слой состоит из спеченных между собой кристаллов размером 60–150 мкм. Твердость пластин, измеренная на приборе ПМТ-3, составляет 50–80 ГПа. Твердосплавная подложка пластины состоит из твердосплавной шихты, содержащей 95 % карбида вольфрама и 5 % кобальта. Формование пластин осуществляется либо спеканием, либо прессованием.

Пластина *Stratapax* получается при совместной обработке отдельных заготовок поликристаллических алмазов и твердого сплава при температуре 1 500^{o}, давлении 5 ГПа и выдержке 5–10 мин. В результате алмазный слой синтезируется в виде однородной поликристаллической массы, образующей целое с твердосплавной подложкой и

обладающей очень высокой твердостью, износостойкостью и ударной прочностью.

Фирма *De Beers* выпускает материал *Sindit* в виде двухслойных пластин, состоящих из алмазного слоя толщиной 1–1,5 мм и твердосплавной подложки. Специалисты ВНИИалмаз (Россия) разработали несколько марок поликристаллических алмазов на подложке. Материал АТП (алмазные твердосплавные пластины) применяется преимущественно для оснащения бурового инструмента.

Сравнение эксплуатационных свойств *PDC*, природных алмазов и твердого сплава с содержанием кобальта 6 % свидетельствует о том, что основные свойства поликристаллических алмазов сопоставимы с природными.

Существенное колебание твердости природных алмазов объясняется анизотропией их структуры, тогда как кристаллы искусственных поликристаллических алмазов изотропны, т. е. физико-механические свойства кристаллов одинаковы во всех направлениях. Это способствует повышению прочности и износостойкости синтетических алмазов. По сравнению с твердым сплавом прочность синтетических поликристаллических алмазов на сжатие выше на 70 %, а твердость на 250 %. Износостойкость пластин *Stratapax* выше, чем природных алмазов, и в 100–150 раз превышает износостойкость твердого сплава. Основные характеристики пластин типа *Stratapax*, природных алмазов и твердого сплава ВК6 приведены в табл.1.2.

Таблица 1.2

Сравнительные данные физико-механических
и эксплуатационных свойств сверхтвердых материалов

Свойства материалов	Поликристал-лический алмаз	Природный алмаз среднего размера	Твердый сплав ВК6
Модуль упругости, ГПа	841	964	630
Модуль жесткости, ГПа	345	400	250
Коэффициент Пуассона	0,32	0,2	0,2
Прочность на растяжение, ГПа	1,29	2,6	1,8
Прочность на сжатие, ГПа	7,61	8,68	4,5
Прочность на изгиб, ГПа	1,1	–	4,9
Твердость HRC, ГПа	50	30–80	20
Коэффициент относительной износостойкости	200–300	100–245	2

Резцы из поликристаллических алмазов состоят из слоя алмазов *1*, твердосплавной подложки *2* и корпуса резца *3* (рис. 1.22). Для повышения прочности соединения алмазного слоя *1* с твердосплавной основой *2* последняя выполняется не плоской, а рифленой, с насечками, а для снижения скалывания края пластин, кромки выполняются скошенными.

При изготовлении резцов пластины *PDC* крепятся диффузионной сваркой при высоких температуре и давлении. Перед соединением поверхность пластинок покрывают тонким слоем никеля.

В буровом инструменте резцы с поликристаллическими пластинами устанавливают с отрицательным передним углом $\gamma_п$ в пределах от –5 до –25° в зависимости от твердости горных пород. В инструментах, предназначенных для бурения более твердых горных пород, передний отрицательный угол задается бо̀льшим, что позволяет снизить динамическую составляющую разрушения горной породы, возрастающую при резании-скалывании твердых горных пород.

В настоящее время долота со вставками *PDC* очень широко применяются при бурении скважин на нефтяных и газовых месторождениях всего мира, особенно при проходке вертикально-горизонтальных стволов по продуктивным горизонтам, бурении мягких и средней твердости горных пород с прослоями твердых.

Рис. 1.22. Виды пластинок и резцов PDC и возможные формы:
1 – поликристаллические алмазы; *2* – подложка из твердого сплава; *3* – корпус резца

Примером наиболее современных среди созданных в настоящее время инструментов, являются долота компании *Tough-Drill™ Varel PDC.* Диаметр долот варьирует от 88,9 до 469,9 мм и они изготавливаются как в матричном исполнении, так и со стальным торцом (диаметр от 215,9 до 660,4 мм). Данные долота разработаны для бурения различных по твердости горных пород, в том числе и твердых. Они обеспечивают высокую скорость бурения и высокий ресурс в абразивных и твердых породах из-за высокоэффективных вставок *PDC*, улучшенной гидравлики очистки и охлаждения резцов долота. Улучшенные качества долот обеспечивают так же снижение износа, устраняется повторное перемалывание разрушенной породы, устраняются возможные зоны скопления шлама.

Для проектирования резцов и долот разработчиками используются современные компьютерные технологии инженерного проектирования на основе метода конечных элементов типа *Nastran*, *Patran*, *Ansys*.

Подразделение *Smith Bits* компании *SMITH* разработало интегрированную инженерно-аналитическую систему *IDEAS*, в которой рассматривается работа резца в динамической среде бурения с учетом влияния всех компонент буровой компоновки. Основной задачей *IDEAS* является производство оптимальных по эффективности конструкций долот и значительное сокращение времени цикла разработки инструмента.

Моделирование в системе *IDEAS* начинается с анализа показателей работы долота, геологических условий, условий бурения и износа долота. На основании этой информации разрабатываются и выполняются лабораторные испытания взаимодействия резцов с различными породами. По сравнению с другими системами проектирования долот, позволяющими оценить лишь взаимодействие резцов с породой, лабораторные данные из системы *IDEAS* представляют количественные параметры по фактическим усилиям на резцах и скоростям бурения. Информация используется для анализа конструкций долота с учетом литологических особенностей, аналогичных тем, для которых проектируется долото.

В результате получается буровое долото, обладающее динамической стабильностью при рабочих параметрах и условиях эксплуатации, для которых оно предназначено, что способствует увеличению срока службы и повышению скорости проходки. Оптимизированные параметры могут поддерживаться для обеспечения более быстрой и продолжительной работы долота при снижении нагрузки на компоновку и оборудование буровой установки.

Программа четырехмерного моделирования *i-Drill* как составная часть системы *IDEAS* при помощи метода конечных элементов и данных, полученных в ходе лабораторных исследований свойств горных пород с использованием сверхмощных вычислительных машин, позволяет прогнозировать поведение долота в скважине с учетом работы буровой компоновки.

Модель, построенная с помощью синхронизированного по времени моделирования с шестью степенями свободы, достаточно точно прогнозирует силы и вибрации, которые часто оказывают решающие воздействие на отклоняющее усилие на долоте, срок службы

забойных датчиков, целостность бурильной колонны и эффективность процесса бурения в целом.

Возможность выявления источника крутильных, осевых и поперечных колебаний позволяет специалистам по бурению и искривлению ствола скважины определить необходимые изменения в компоновке снаряда и оптимизировать режимы бурения. Программа *i-Drill* обеспечивает пометровую оценку прочности бурильной колонны, получаемую измерением момента на изгиб в двух осях. Направление отклоняющих усилий на долоте определяется силами, возникающими на долоте при взаимодействии с породой с учетом динамики всей бурильной колонны.

Компания *Smith Technologies* разработала программу моделирования гидравлики бурения и очистки ствола *Yield Point* с целью оптимизации выбора типа и свойств бурового раствора в соответствии с условиями бурения. После ввода исходных данных программа *Yield Point* выполняет графическое моделирование свойств бурового раствора, скорости движения промывочной жидкости, механической скорости проходки, а также площади сечения гидромониторных насадок, а затем позволяет оценить влияние соответствующих параметров на гидравлические характеристики долота и очистку ствола скважины.

База данных *Smith Bits* (*DRS*) содержит информацию о трех миллионах отработанных буровых долот практически со всех нефтяных и газовых месторождений мира. Помимо того что база данных используется для проектирования, она также позволяет системе оптимизации выбора буровых долот *DBOS* обеспечить правильный выбор долот для эффективного бурения конкретной породы.

Компанией *Varel* разработан собственный программный продукт под названием *SPOT*™ для проектирования инструмента. Компьютерное моделирование позволяет оценивать качества долот, их ресурс и производительность в процессе компьютерного тестирования. Улучшенная система очистки забоя обеспечивается установкой направляющих насадок долота, ориентирующих поток жидкости в радиальном направлении горизонтально забою вдоль линии расположения резцов (рис. 1.23). Горизонтальную струю жидкости создают насадки, установленные у центра долота, остальные насадки размещены ближе к периферии торца, направляя поток в направлении забоя. Такая комбинированная система размещения насадок на торце долота обеспечивает качественную очистку забоя и охлаждение резцов.

Рис. 1.23 . Долото компании *Varel* со вставками *PDC*

В компании *Smith bits* используют вычислительную гидродинамику (*CFD*) для моделирования взаимодействия бурового раствора с долотом и стволом скважины (рис. 1.24). Сложные алгоритмы дают возможность воспроизводить широкий диапазон забойных условий, а также позволяют осуществлять оценку влияния конфигурации лопастей и положения насадок на структуру потока с целью оптимизации работы долота и повышения эффективности бурения за счет максимально эффективного использования

имеющейся гидравлической энергии.

Одна из самых больших проблем применения долот *PDC* – это их недостаточно эффективное использование при бурении твердых пород. При бурении твердых пород возникают повреждения от ударного характера разрушения породы, перегрев и повышенный абразивный износ резцов, поэтому для проходки в твердых породах в основном используются шарошечные и алмазные долота.

Долота *Security DBS* серии *FM*3000 ™ компании *Varel* включают новый вариант износостойкого *PDC*. Эти долота успешно расширяют использование *PDC*-вооружения для бурения кристаллических пород, позволяют получить высокие результаты, как по скорости бурения, так и по ресурсу инструмента (рис. 1.25). Вооружение долота отличается тем, что часть резцов *PDC* выполнены эллипсовидными, а часть – круглыми. Эллипсовидные вставки располагаются на лопастях, занимая значительную часть размера лопасти, но на периферии лопасти резцы имеют круглую форму. Вставка в форме эллипса имеет более высокие значения контактных напряжений в породе по сравнению с круглым резцом и более значительное заглубление в породу. Удлиненная форма резца увеличивает ресурс вставки. В результате долота с эллипсовидными вставками *PDC* обеспечивают эффективное бурение более твердых горных пород при сравнительно более низких значениях осевого усилия.

а

б

Рис. 1.24. Визуализация образа в системе анализа гидродинамики долот при компьютерном проектировании: *а* – вид с торца долота; *б* – вид сбоку

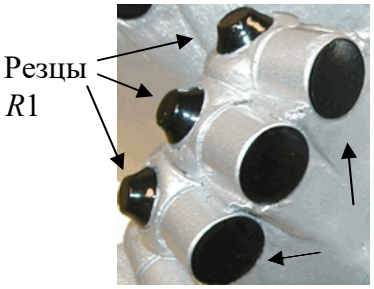


Рис.1.25. Вооружение долота *Security DBS* серии *FM*3000 ™

Долота *PDC* для бурения твердых пород разработаны с учетом динамики долота. Долота *FM*3000 оснащены в качестве основного резца резцом типа *Z*3™. Резцы Z3 опираются на вторичные *PDC* резцы *R*1, которые оптимизируют глубину резания основными резцами, ограничивая их чрезмерное заглубление в породу при переходе долота из более твердых пород к мягким породам, когда действующие осевые нагрузки оказываются чрезмерными.

Компания *Smiht Bits*, учитывая особенности износа пластин *PDC*, разработала долота с резцами *ONYX 360 и ONYX II*, которые установлены в наиболее нагруженных частях торца долота с возможностью вращения в процессе бурения на 360^{o} (рис. 1. 26). Бурение абразивного песчаника долотами *ONYX 360* показало рост ресурса долота на 57 %, а скорости бурения на 26 %.

Рис. 1.26. Резцы ONYX 360

Компанией Волгабурмаш (ВБМ) разработано и освоено производство долот *PDC* диаметром от 83 до 444,5 мм для бурения мягких, мягких с пропластками средних по твердости; средних и средних по твердости с пропластками твердых горных пород.

По области применения долота *PDC* компании ВБМ подразделяются на две линии:

FD – долота для бурения сплошным забоем вертикальных и наклонно-направленных скважин (рис. 1.27, *а*, *б*, *в*); *BD* – бицентричные долота для бурения с одновременным расширением ствола скважины (рис. 1.28).

Долота *PDC* обладают высокой износостойкостью, что по сравнению с трехшарошечными долотами обеспечивает кратное увеличение проходки при более высокой механической скорости бурения. Долота *PDC* компании ВБМ оснащены твердосплавными или комбинированными насадками, ориентированными так, чтобы максимально обеспечить баланс потоков бурового раствора для очистки долота и забоя.

а *б*

Рис. 1.27. Долота *PDC* («Волгабурмаш») марки *FD* – конструктивные особенности – спиральная форма лопастей и установка зубков *PDC* на калибрующей части долота:
а – долота диаметром 214,3 мм – оснащены резцами обратной проработки; *б* –долото диаметром 215,9 мм – оснащены антивибрационной защитой долота

Рис. 1.28. Долото компании ВБМ марки *BD* для бурения с одновременным расширением ствола нефтяных и газовых вертикальных и наклонно- направленных скважин

Конструктивные особенности долот типа *FD* компании «Волгабурмаш» заключаются в следующих решениях (рис. 1.29):

- спиральная лопасть долота, что обеспечивает более высокую их прочность, большее число вставок на лопасти и позволяет обеспечивать более плавный режим работы долота и высокую управляемость при на правленном бурении (рис. 1.29, *а*);

- установка зубков *PDC* на калибрующей части лопастей, что обеспечивает более высокую износостойкость долот, сохранение диаметра скважины (рис. 1.29, *б*);

- антивибрационная защита долота обеспечивает плавный режим работы, повышение его ресурса (рис. 1.29, *в*);

- оснащение долот резцами обратной проработки обеспечивает при подъеме долота активную проработку и ствола скважины (рис. 1.29, *г*);

- устранение затяжек при сужении

- долото оснащается опорными вставками внутреннего конуса профиля долота, что снижает эффект «врезания» его в породу, дискретный рост крутящего момента и, как следствие, возникновение крутильных колебаний, повышается плавность хода при разрушении породы и управляемость при направленном бурении (рис. 1.29, *д*);

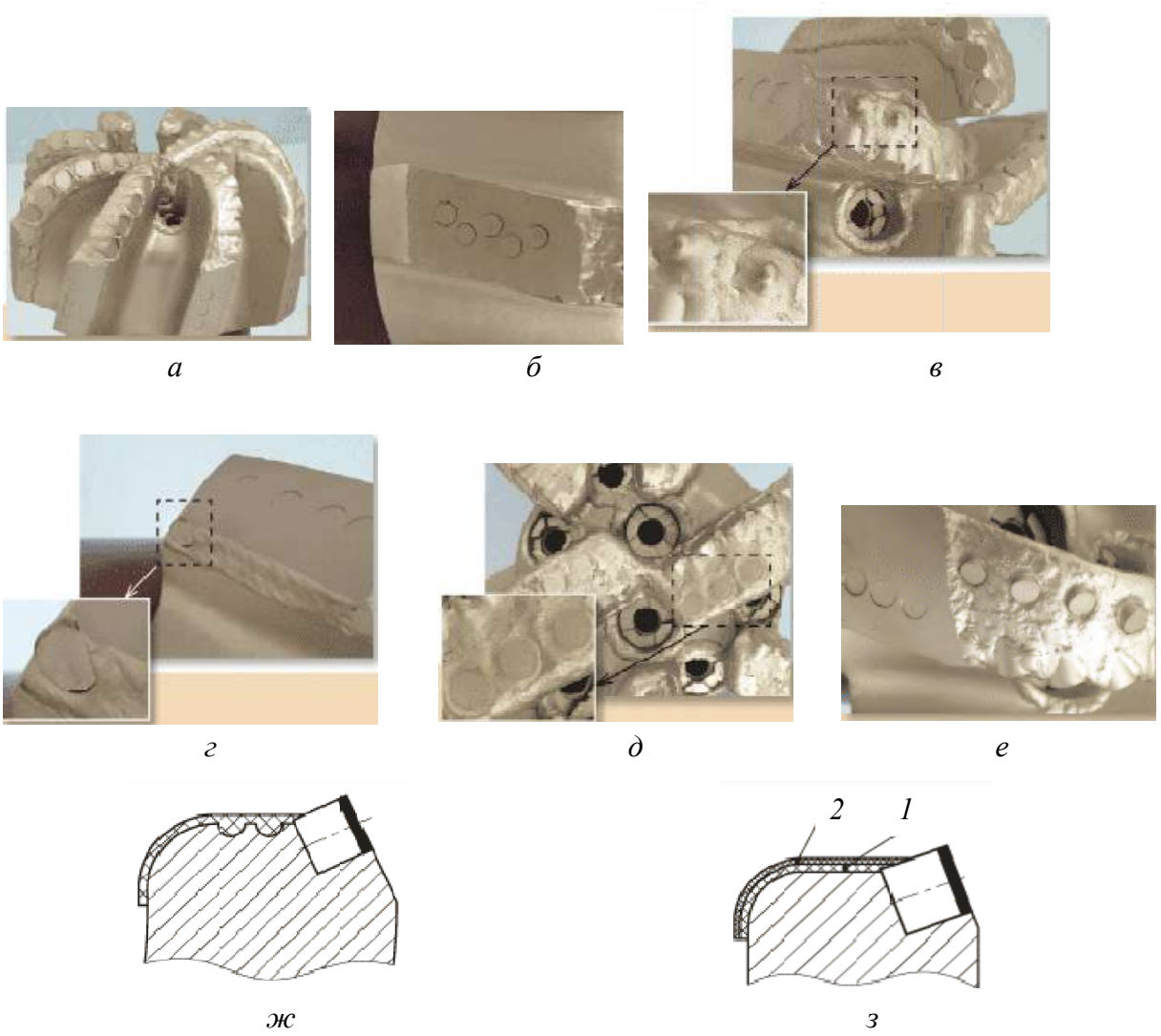


Рис. 1.29. Конструктивные оосбенности долот *PDC* конструкции компании «Волгабурмаш» (ВБМ)

- долото оснащается зубками предварительной деформации породы, которые устанавливаются позади основных резцов и ограничивают врезание этих резцов в породу, одновременно обеспечивают активное деформирование породы, ослабляют ее, что повышает плавность работы долота, его ресурс и управляемость при направленном бурении (рис. 1.98, *е*);

- усиленная наплавка на лопастях долота обеспечивает его высокий ресурс при бурении абразивных пород (рис. 1.29, *ж*);

- двухслойное покрытие корпуса долота дано на рис. 1.29, *з*, где *1* – защитное покрытие из плотной массы ультратвердых вольфрамовых карбидов; *2* – порошковое покрытие, имеющее гетерогенную смесь металлических порошков из пылеобразных матричных компонентов (карбидов вольфрама), выполненное методом газопламенного напыления с одновременным проплавлением, выполняет роль антивибрационного покрытия, обеспечивает сопротивление ударным нагрузкам (покрытие *1*) и защищает долота от изнашивания и эрозии, в том числе и при высокой температуре (покрытие *2*);

- упрочненный корпус долота за счет покрытия сплавом ВК;

- антисальниковое покрытие корпуса долота специальным сплавом снижает налипание породы на корпус и лопасти долота, что положительно сказывается на производительности бурения.

Для бурения мягких пород с целью снижения крутящего момента и улучшения их очистки на торцевой поверхности между основными резцами выполняются концентрические проточки. Такие долота с резцами *PDC* получили название *канавчатые.*

Долота с резцами *PDC* применяют для бурения и с отбором керна (рис. 1.30).

Рис. 1.30. Колонковое
долото с резцами *PDC*

Показатели работы инструмента с пластинами PDC могут составлять в различных горногеологических условиях по механической скорости от 2,3 до 30 м/ч, а по стойкости от 200 до 1 000 м.

Таким образом, при бурении осадочных пород в сравнении с твердосплавным инструментом использование *PDC* позволяет повысить скорость бурения в 1,5–5 раз и стойкость в 5–15 раз. При использовании коронок, оснащенных пластинами *PDC*, при бурении песчаников получена скорость бурения 16 м/ч при стойкости 120–260 м против 3,6 м/ч и 30–60 м у твердосплавных коронок.

При бурении с отбором керна механическая скорость бурения увеличивается по сравнению с однослойными алмазными коронками в 4–5 раз, твердосплавными – до 10 раз.

Коронки с резцами *PDC* способствуют повышению выхода керна. При бурении геологоразведочных скважин на твердые полезные ископаемые коронки, армированные пластинами с поликристаллическими алмазами, особенно перспективны в сочетании со снарядами со съемным керноприемником.

Компания *Atlas Copco* выпускает резцовые коронки, вооруженные поликристаллическими алмазными вставками *Diapax* и *Tripax*.

Элемент *Diapax* выполнен в виде пластины с нанесенным слоем алмазов толщиной 0,5 мм, а *Tripax* в виде треугольных или квадратных блоков-резцов.

Коронки с пластинами *Diapax* (рис. 1.31) предназначены для бурения мягких, вязких глинистых, мерзлых грунтов, горных пород средней твердости. В подобных горных породах коронки с пластинами *Diapax* имеют очень высокий ресурс (до 1 000 м) и производительность. Недостатком таких коронок является низкая стойкость к ударным нагрузкам, что делает их непригодными для бурения массива с прослоями твердых горных пород.

При бурении пластины *PDC* изнашиваются по внешней режущей кромке, контактирующей с породой. Получившие односторонний износ пластины *Diapax* могут извлекаться из коронки и вновь устанавливаться с поворотом на некоторый угол, что позволяет восстанавливать инструмент 3–4 раза до полного изнашивания режущих кромок пластин. Суммарный объем бурения пластинами *Diapax* с учетом восстановления инструмента может, таким образом, составлять более 1 000 м.

Режим бурения коронками с пластинами *Diapax* предусматривает частоту вращения 50–80 мин$^{-1}$ и осевую нагрузку 10–20 кН.

Пластины *PDC* для бурения нефтяных и газовых скважин обеспечивают ресурс долот более 1000 м до первой реставрации.

Коронки с режущими вставками *Tripax* компании *Atlas Copco* состоят из поликристаллических алмазных компонентов, имеющих треугольную или квадратную форму (рис. 1.32, *а*, *б*). Масса вставки *Tripax* составляет 0,3–1,0 карат. Треугольная или квадратная форма создают хорошую режущую кромку и достаточно высокую прочность резца. Коронки со вставками *Tripax* применяются для бурения горных пород средней твердости и твердых. Их ресурс составляет от 50 до 250 м. В породах невысокой прочности ресурс коронок может составить около 1 000 м.

Коронками *Tripax* рекомендуется буритьс частотой вращения 200–300 мин$^{-1}$ и осевым усилием 10–20 кН.

Механизм работы коронок с пластинами *Diapax* и вставками *Tripax* при бурении мягких и пластичных горных пород аналогичен механизму работы твердосплавных резцов с отрицательными передними углами. Отличие может определяться формой резцов, которые чаще всего изготавливаются в виде круглых пластин.

Коронки со вставками *Tripax*, в случае бурения твердых горных пород, разрушают их отдельными алмазами. При этом механизм разрушения близок к процессу разрушения горных пород мелкими резцами алмазного бурового инструмента.

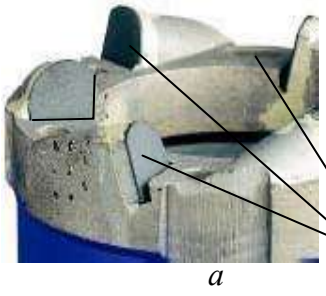


Рис. 1.31. Коронка с поликристаллическими вставками *Diapax* (*а*) и схема вставки (*б* – вид сбоку): *1* – вставка; *2* – отверстия для промывочной жидкости

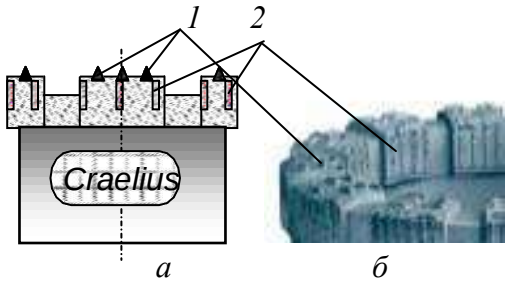


Рис. 1.32. Схема (*а*) и фото (*б*) коронок с элементами *Tripax*: *1* – вставки *Tripax*; *2* – подрезные вставки

Механизм работы резца, оснащенного *PDC* осуществляет разрушение пластичной породы путем резания с большим съемом породы. При этом механизм работы резцов *PDC* при бурении твердых горных пород отличается от механизма работы импрегнированного бурового инструмента, так как существенно зависит от формы и схемы расстановки резцов с пластинами *PDC* в коронке.

Например, исследования по оценке влияния угла поворота резцов *PDC* в фронтальной по отношению к торцу инструмента плоскости показали, что наиболее оптимальным углом поворота $\varphi_р$ будет значение 5–10°. Причем поворот резцов, расположенных по наружной кромке торца, осуществляется в направлении наружного диаметра торца, а резцы, размещаемые по внутреннему периметру торца, поворачиваются внутрь торца коронки (рис. 1.33). При размещении резцов в инструменте с углом $\varphi_р = 0°$ наблюдались заклинка керна и прижог пластин *PDC*. Это свидетельствует о накоплении разрушенной породы перед резцами и недостаточном их охлаждении, поскольку жидкость не попадает в зону контакта пластины *PDC* с горной породой. С целью удаления породы и более интенсивного охлаждения резцов коронки компании *Atlas Copco* (рис. 1.31) имеют фронтальные отверстия для подвода промывочного раствора непосредственно к резцам.

Установка резцов с углами поворота $\varphi_р$ обеспечивает отвод разрушенной породы из забоя в направлении керна и стенки ствола скважины при бурении коронками и стенки скважины при бурении долотами.

С увеличением значений угла $\varphi_р$ наблюдается повышение механиче- ской скорости бурения с одновременным снижением затрат мощности и вибрации инструмента (рис. 1.34).

При использовании бурового инструмента с резцами *PDC* особое значение имеет схема их размещения, которая существенно влияет на эффективность разрушения породы. Для повышения эффективности разрушения породы расстановка резцов должна максимально соответствовать условиям образования свободных поверхностей забоя скважины.

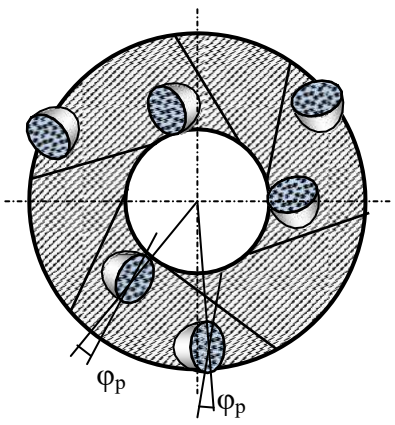


Рис. 1.33. Схема установки резцов с *PDC* на торце инструмента для обеспечения отрицательного угла резания со скважинно- и керно-образующими боковыми поверхностями

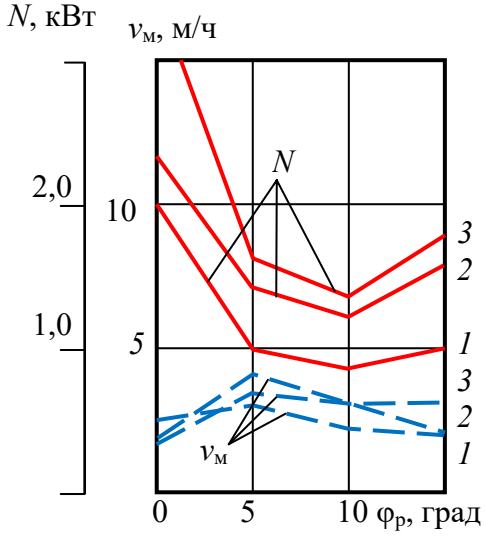


Рис. 1.34. Зависимость механической скорости бурения ($v_м$) и мощности на бурение (N) от величины угла $\varphi_р$: *1* – осевая нагрузка 500 даН; *2* – 750 даН; *3* – 1 000 даН

В работе приведены данные о стендовом бурении опытными долотами с тремя алмазными поликристаллическими пластинами *Stratapax*, установленными с передними углами –15 и –25° (угол $\varphi_р$), импрегнированной коронкой, вооруженной искусственными алмазами зернистостью 200–250 шт./карат и твердосплавной трехрезцовой коронкой, с передним отрицательным углом установки резцов –25°. Все коронки имели наружный диаметр 26 мм, внутренний – 14 мм.

В процессе эксперимента разбуривались три разновидности горных пород: гранит, известняк и доломит. Твердость гранита – $p_ш$ = 4,18 ГПа, коэффициент пластичности $К_п$ = 1; твердость известняка – 1,94 ГПа, $К_п$ = 1,8; твердость доломита – 1 ГПа, $К_п$ = 4,3.

Результаты бурения гранита тремя типами буровых инструментов приведены на графиках (рис. 1.35). Из полученных данных следует, что при более высоких и равных параметрах режима бурения механическая скорость бурения выше при бурении коронкой с *PDC* в сравнении с импрегнированной алмазной коронкой. Это объясняется тем, что контактные давления со стороны алмазов *PDC* существенно выше, чем со стороны алмазов импрегнированной коронки, так как последние равномерно распределены по всей поверхности матрицы, а у *PDC* расположены в пределах узких кромок боковых поверхностей пластин *PDC* (рис. 1.36).

В данном случае алмазы *PDC* работают в режиме эффективного объемного разрушения, при котором происходит скалывание, раздавливание и резание породы, тогда как алмазные резцы импрегнированной коронки могут работать при разрушении твердой породы в режиме поверхностного микроскалывания и истирания.

Подтверждением реализуемого механизма разрушения являются размеры борозд разрушения, оставленные на забое *PDC* и импрегнированной коронкой.

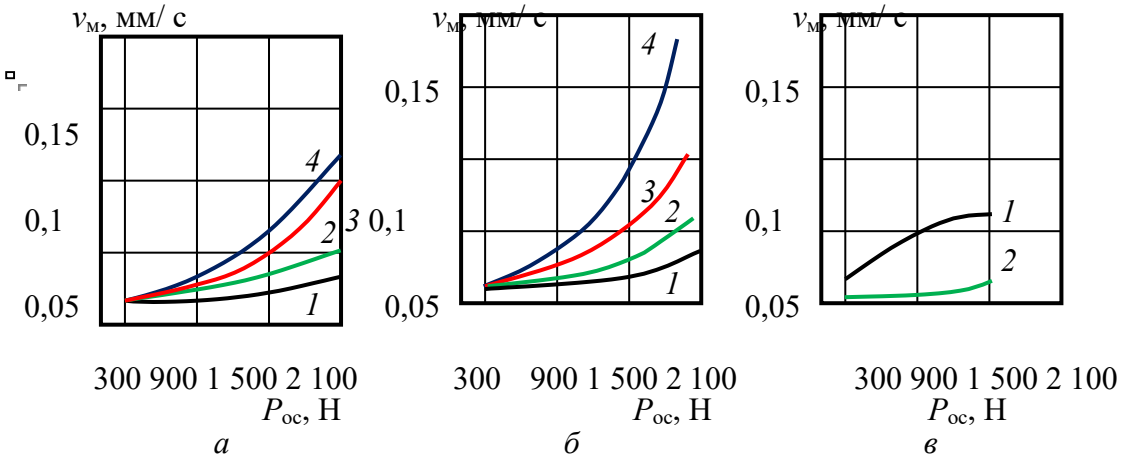


Рис. 1.35. Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения гранита импрегнированной коронкой (*а*), коронкой с *PDC* (*б*) и твердосплавной коронкой (*в*): *1* – частота вращения ω – 170 мин$^{-1}$; *2* – 425 мин$^{-1}$; *3* – 685 мин$^{-1}$; *4* – 960 мин$^{-1}$

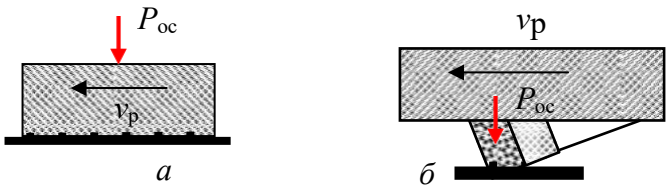


Рис. 1.36. Схема работы алмазных резцов импрегнированной коронки (*а*) и резца *PDC* (*б*)

При бурении импрегнированной коронкой ширина борозд разрушения 0,08 мм, глубина 0,02 мм, шлам существенно более мелкий 5 мкм в сравнении со шламом, который образуется при бурении коронкой с пластинами *PDC*.

При бурении гранита твердосплавными коронками видимых борозд на забое не образовывалось, шлам получен очень мелкий (не более 2 мкм). Эти признаки указывают на режим усталостно-поверхностного разрушения, при котором активно изнашиваются резцы коронки.

Данные, полученные при бурении гранита, известняка и доломита коронками с *PDC*, приведены в виде графиков на рис. 1.37.

Результаты эксперимента показали, что механическая скорость бурения доломитов в 6–8, а известняков в 7–14 раз превышает механическую скорость бурения гранита. При бурении доломита и известняков получены очень крупные частицы шлама.

Представленные данные позволяют установить [31], что при бурении известняков и доломитов резцы с *PDC* глубоко внедряются в породу, снимая слой разрушенной породы много больше размера алмазных зерен. Следует отметить, что буримость доломита оказалась ниже, чем у известняков, несмотря на то, что твердость известняка несколько выше. Очевидно, более значительные затраты энергии на разрушение доломита определены их повышенной пластичностью. Так, например, оказалось, что глубина борозд разрушения в доломите (0,04 мм) меньше в 3 раза глубины борозд разрушения в известняке (0,12 мм) при равной их ширине.

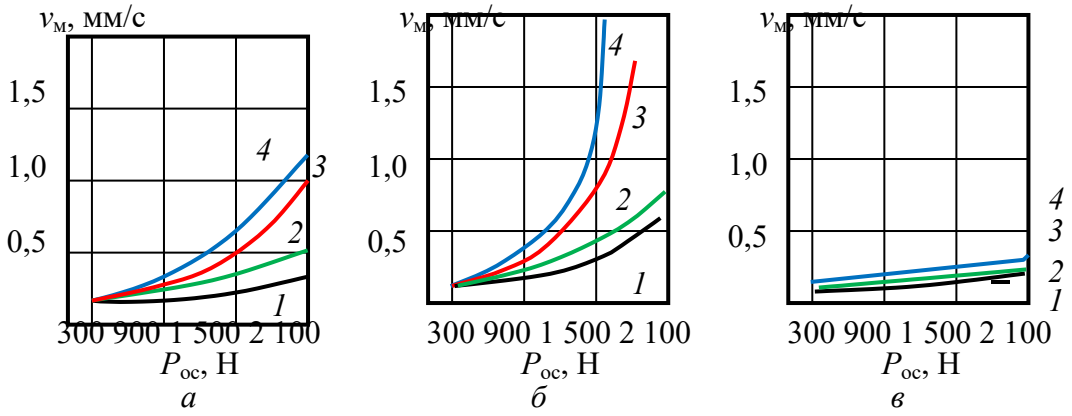


Рис. 1.37. Зависимость механической скорости бурения от параметров режима бурения коронкой с PDC доломита (*а*), известняка (*б*) и гранита (*в*): *1* – частота вращения ω – 170 мин$^{-1}$; *2* – 425 мин$^{-1}$; *3* – 685 мин$^{-1}$; *4* – 960 мин$^{-1}$

Таким образом, при бурении упругохрупких и хрупких твердых горных пород разрушение обнаженными алмазами резцов с *PDC* идет, главным образом, путем раздавливания и скалывания.

При бурении пластичных и пластично-хрупких пород разрушение происходит всем объемом алмазосодержащей пластины вдавливанием, пластическим резанием и скалыванием породы.

1.5. Разрушение горных пород алмазным буровым инструментом

1.5.1. Общие сведения об алмазном буровом инструменте

Производительность и работоспособность алмазного бурового инструмента во многом зависят от крупности, схемы размещения алмазов в матрице инструмента, ориентации их в направлениях к плоскости забоя и резания-скалывания по твердому вектору.

В 1939 г. в США ученые Краус и Лоусон установили для кристаллов алмаза грани и направления максимальной твердости, что позволило впоследствии изготавливать алмазный инструмент для бурения с ориентиро- ванной установкой алмазов. Производство алмазных коронок с ориентированной установкой алмазов в направлении разрушения горной породы впервые осуществлено в США в 1949 г. Опытное бурение показало, что достигается значительное снижение стоимости алмазного бурения (в 1,6 раза) и повышение проходки на коронку (в 1,37 раза).

Алмаз по шкале твердости минералов Мооса занимает максимальную 10 позицию (по шкале твердости М. М. Хрущова, микротвердость алмаза около 100000 МПа), а его твердость в 1000 раз превышает микротвердость кварца (7 позиция) и в 150 раз микротвердость корунда (9 позиция). Разница в твердости между алмазом и корундом значительно больше, чем между корундом и тальком, имеющим наименьшую твердость.

Величина алмаза с 1914 г. измеряется в каратах (0,2 грамма). Кристаллы алмаза крупнее 1 карата встречаются редко. Обычно вес их 0,2–0,4 карата.

Карат – мера веса драгоценных камней. Принята на Ближнем Востоке в средние века как вес зерна рожкового дерева.

Цвет алмазов определяется составом примесей и может быть от прозрачного до черного. Примеси в алмазах, например, металлы, являются причиной разрушения алмазного резца при бурении, поскольку примеси, имеют более значительный коэффициент теплового расширения по сравнению с алмазом, что может приводить при нагревании алмаза в процессе работы к его растрескиванию.

Для изготовления алмазного бурового инструмента применяют природные и искусственные алмазы.

Природные алмазы отличаются прочностью и износостойкостью, цветом и формой кристаллов (рис. 1.38).

а *б* *в* *г*

Рис. 1.38. Природные алмазы для изготовления алмазных долот: *а* – Конго кубической формы обладают средней износостойкостью и ударной прочностью; *б* – Конго сферические – стандартные монокристаллические алмазы сферической формы с шероховатой поверхностью обладают средней изно- состойкостью и хорошей ударной прочностью; *в* – Премиум двенадцатигранной формы обладают хорошей ударной прочностью и высокой износо- стойкостью; *г* – поликристаллические различной формы обладают высокой ударной прочностью и хорошей износостойкостью.

Широкое применение алмазный инструмент в практике бурения получил после открытия крупных месторождений в коренных горных породах – кимберлитах (от названия места – г. Кимберли, получила название алмазоносная площадь в ЮАР (Африка), которая открыта в 1871 г.).

В СССР первая кимберлитовая трубка «Зарница» открыта в 1954 г. в Якутии. С этих пор, после получения отечественного алмазного сырья, в стране начато производство алмазного инструмента и широкое развитие алмазного бурения взамен дробового.

Искусственные алмазы были получены в 1954 г. в США в лаборатории компании *General Electric* Г. Холлом и несколько позже одновременно в научно-исследовательских центрах Швеции, Японии, Бельгии и др. стран.

В СССР решением проблемы синтеза алмазов и организации их выпуска занимались Институт физики высоких давлений АН и Институт сверхтвердых материалов АН Украины, которыми промышленный выпуск алмазов осуществлен в 1960–1985 гг.

Буровой инструмент оснащается алмазами различной *зернистости*, измеряемой в количестве алмазов в карате (шт./кар.).

Основные размеры алмазов, применяемых в буровых инструментах, равны: 2–5 шт./кар. – диаметр зерна 3–4 мм; 10 шт./кар. – 2,5 мм; 15 шт./кар. – 2,0 мм; 20 шт./кар. – 1,8 мм; 50 шт./ кар. – 1,3 мм; 90 шт./кар. –1,1 мм; 150 шт./кар. – 0,9 мм.; 200–400 шт./кар. – 0,7–0,5 мм; менее 400 шт./кар. – менее 0,5 мм.

Рис. 1.39. Алмазные долота компании *Smith bits*.

В породах средней твердости наилучшие результаты показывают коронки, армированные алмазами зернистостью от 20 до 2 шт./кар., в твердых породах целесообразно использовать коронки с алмазами зернистостью от 200 – 20 шт./кар.) и в очень твердых породах – 600–150 шт./кар.

Для изготовления алмазных долот применяют алмазы зернистостью от 1 до 20 шт./кар. Конструкции алмазных долот показаны на рис. 1.39.

Долота, армированные природными алмазами, предлагаемые компанией *Smith Bits* (рис. 1.39), предназначены для бурения в различных породах – от средне-мягких до твердых. Долота отличаются профилями режущей структуры, системами промывки с зонами высокого и низкого давления жидкости или с радиальным потоком, а также имеют широкий выбор конфигурации алмазных вставок, что позволяет подобрать оптимальный тип долота для конкретных условий бурения.

При оснащении буровых инструментов, как правило, боковые – подрезные резцы изготавливают из более крупных алмазов, чем торцевые. Места перехода от торцевой к боковой части матрицы армируются также более крупными алмазами.

В связи с появлением таких сверхтвердых материалов, как *Stratapax*, крупные природные алмазы зернистостью 2–10 шт./кар. в буровом инструменте заменяются резцами *PDC*, потому что они отличаются большей прочностью и износостойкостью.

Величина выпуска алмазов из матрицы зависит от твердости буримых пород и размера алмазов. При бурении пород средней твердости она может быть до 30 % размера алмазов, твердых пород – до 20 %, а максимально твердых – до 10 %.

Различают коронки и долота без заданного выпуска алмазов, в которых он составляет 5–10 % размера алмаза, и с заданным выпуском алмазов, в котором выпуск резцов составляет 20–30 % их линейного размера.

Матрицы современного алмазного бурового инструмента изготавливают методом порошковой металлургии путём пропитки или горячего прессования. В первом случае матрица состоит из частиц тугоплавких металлов: карбида вольфрама, кобальта и пластичного связующего металла или сплава, например меди. Связующее вещество образует при спекании жидкую фазу, объединяющую при остывании все компоненты матрицы, в том числе и алмазы. Порошковые матрицы более износостойки, чем литые, и позволяют использовать очень мелкие алмазные зерна.

В каркас матриц, изготовляемых методом пропитки, могут входить в различных соотношениях вольфрам, карбид вольфрама, кобальт, железо, никель. Пропитывающий состав делают обычно из меди, никеля, алюминия. Кроме того, в составе матрицы могут быть наполнители (до 30 %): зерна релита, гранулы твердого сплава типа ВК и др.

В матрицы, изготавливаемые способом горячего прессования, могут входить: бор, гидрид титана, медь, карбид вольфрама, кобальт, никель, олово, титан, железо, цезий, фосфор, цинк.

Матрицы отличаются твердостью – важнейшей характеристикой, определяющей во многом эффективность алмазного бурового инструмента. Твердость матрицы вычисляют по методу Роквелла. Она может быть: HRc 10–20 – очень мягкая; HRc 15–20 – мягкая; HRc 25–30 – средней твердости; HRc 30–35 – твердая; HRc 50–55 – очень твердая.

Твердые матрицы предназначены для бурения абразивных и менее твердых горных пород, мягкие для бурения более твердых и менее абразивных горных пород. Правильный выбор твердости матрицы задает темп её изнашивания и, соответственно, обнажение алмазных резцов при бурении, что в результате определяет эффективность бурового процесса. Чрезмерный темп изнашивания матрицы приводит к потере алмазных резцов, а замедленный износ – к изнашиванию самих алмазов – их заполированию (рис. 1.40, *а*, *б*).

Заполирование алмазов – образование на их поверхности площадок износа, ориентированных параллельно забою скважины и имеющих гладкую полированную поверхность.

В идеальном случае при бурении импрегнированным буровым инструментом износ матрицы и алмазов происходит с одинаковой скоростью.

Вооружение алмазного бурового инструмента во многом определяется насыщенностью матрицы алмазами – отношением объема алмазов к объему матрицы инструмента в процентах. Опыт бурения показывает, что этот показатель должен составлять в среднем 5–10 %. В ряде случаев ведущие фирмы выпускают инструмент с насыщенностью алмазами 15–25%.

Насыщенность алмазами, ровно как и качество алмазов, определяют ресурс бурового инструмента, его стойкость.

Расход алмазов без рекуперации для организаций Министерства Геологии СССР обычно составлял 0,6–0,9 карат/м в зависимости от твердости горных пород и совершенства применяемой технологии бурения.

Рекуперация (лат. *recupertion – возвращение, получение обратно*) – *извлечение сохранившихся алмазов из отработанного алмазного инструмента с целью их повторного использования.*

По расположению алмазных резцов в матрице буровые инструменты подразделяются на однослойные и импрегнированные (рис. 1.41, *а*, *б*).

Для бурения применяют однослойные алмазные буровые инструменты с зернистостью резцов в основном от 10 до 150 шт./кар., в которых алмазы располагаются

на торце в один наружный слой, и импрегнированные алмазные коронки с более мелкими алмазами, которые располагаются в несколько слоев (5–9). Число слоев алмазов в импрегнированных буровых инструментах определяется зернистостью алмазов: чем более мелкие алмазы, тем больше число алмазных слоев имеет коронка.

В однослойных буровых инструментах алмазы могут располагаться по следующим основным схемам (рис. 1.42): *а* – в шахматном порядке; *б* – по радиальным направлениям; *в* – по косым радиусам; *г* – по концентрически окружностям.

Возможны, естественно, и иные схемы размещения алмазов, в том числе ориентированная их установка с учетом направлений максимальной твердости алмазного зерна. Критериями эффективного расположения алмазов в матрице являются равномерное распределение на торце и перекрытие движущимися резцами всего забоя буримой скважины тем количеством алмазов, которое необходимо разместить в коронке.

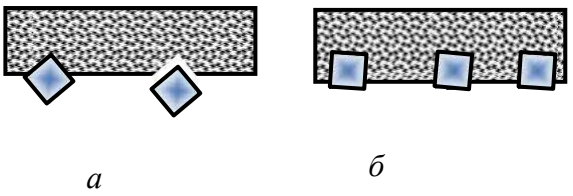


Рис. 1.40. Варианты аномального изнашив- ния матриц алмазных буровых инструмен- тов: *а* – интенсивный износ матрицы – потеря алмазных резцов; *б* – недостаточный износ матрицы – заполирование алмазных резцов

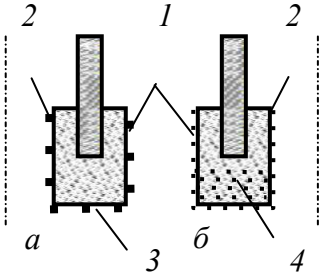


Рис. 1.41. Вооружение алмазных коронок и долот – однослойных (*а*) и импрегнированных (*б*): *1* – наружные подрезные резцы; *2* – внутренние подрезные резцы; *3* – торцевые резцы; *4* – слои алмазов

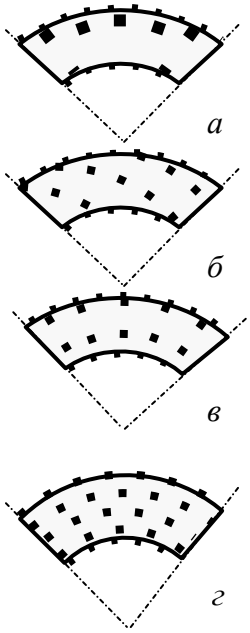


Рис. 1.42. Схема раскладки алмазов в коронках

Для повышения прочности соединения алмазов с матрицей применяют грануляцию алмазных зерен, которая состоит в покрытии алмаза металлом. Наиболее интересен вариант «металлизации» алмаза пористым хромом. В этом случае достигается не просто высокая адгезия зерна с матрицей, но и соединение за счет проникновения материала матрицы в поры оболочки из хрома.

Для бурения в основном применяют алмазы необработанные с острыми режущими гранями, овализованные и полированные.

Овализованные алмазы получают механической обработкой для приданияим им округлой формы.

Полирование овализованных алмазов производят для уменьшения силы их трения о породу при бурении. При овализации и последующем полировании алмазов удаляются их выступающие части, в результате образуется гладкая поверхностей камней и округлая форма. Овализация и особенно полирование убирают с поверхности алмаза трещины и дефекты, что повышает прочность алмазного зерна.

Таким образом, алмазные резцы геометрически могут соответствовать форме многогранника (пирамида, пирамида с площадкой износа) или округлого резца, форма которого близка к шару.

Импрегнированные алмазные долота. Для бурения самых твердых и абразивных пород при реализации высоких значений частот вращения винтовыми забойными двигателями и турбобурами в настоящее время успешно используются импрегнированные алмазные долота с различной формой торцевой породоразрушающей части.

На рис. 1.43 показано долото *Kinetic* компании *Smith Bits* с удлиненной калибрующей поверхностью и развитой комбинированной системой импрегнированного алмазного вооружения.

В буровых долот3х *Kinetic* компании *Smith Bits* используются комбинированные породоразршающие элементы с алмазными резцами в виде импрегнированных лопастей 1, отдельных цилиндрических вставок *GHI* 2 и резцов из поликристаллических алмазов типа *TSP* 3 (рис. 1.44).

Рис. 1.43. Импрегнированные алмазные долота *Kinetic*

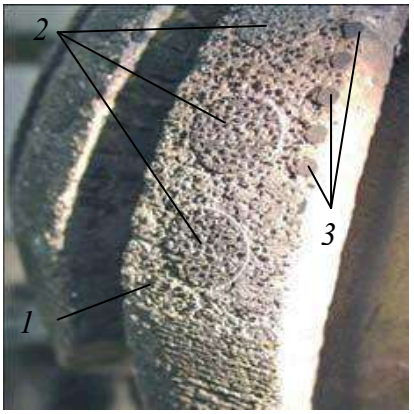


Рис. 1.44. Вооружение долота *Kinetic* с термостабильными по-ликристаллическими алмазны- ми резцами (*TSP*) на режущей кромке лопастей: *1* – импрегни- рорванная лопасть; *2* – вставки *GHI*; *3* – резцы *TSP*

Вставки *TSP* расположены на калибрующей поверхности с целью поддержания номинального диаметра скважины. При использовании в крайне абразивных породах они устанавливаются на периферийную часть профиля долота для увеличения прочности и износоустойчивости на данном участке лопасти, испытывающей при бурении максимальные усилия и изнашивание. Конструкции буровых долот имеют увеличенные по высоте лопасти, что позволяет распределить больший объем алмазного материала и обеспечивает большую проходку, чем при использовании традиционных импрегнированных буровых долот. Буровые долота *Kinetic* также характеризуются индивидуальным подходом при конструировании для конкретного типа забойного двигателя, применяемого в данных условиях. Профиль долота подбирается в зависимости от того, используется ли оно с винтовым забойным двигателем или турбобуром. Долото *Kinetic* демонстрирует высокую производительность бурения в комплексе с турбобурами за счет высокой частоты вращения, реализуемой данными забойными двигателями. Увеличенная калибрующая поверхность в сочетании со стабильностью турбобура обеспечивает высокое качество ствола скважины, исключая его винтообразное искривление, характерное для долот с резцами *PDC*.

В долоте используется комбинация распределения центрального потока жидкости и точечно размещенных промывочных отверстий для улучшения его охлаждения и обеспечения эффективной очистки. Конструкция бурового долота *Kinetic* позволяет производить эффективное бурение переслаивающихся пород при поддержании оптимальной механической скорости проходки, что исключает необходимость замены долота для бурения различных пород.

Долота *Kinetic* конструируют с использованием точно спроектированных горячепрессованных вставок *GHI* (рис. 1.45), алмазных резцов высшего качества, термостабильных поликристаллических алмазов (*TSP*) и матриц с импрегнированными алмазами. Компоненты *GHI* состоят из комбинации алмазных кристал лов и порошка карбидо-вольфрамовой матрицы, подобранной для обеспечения специальных свойств материалов, применяемых в конкретных условиях.

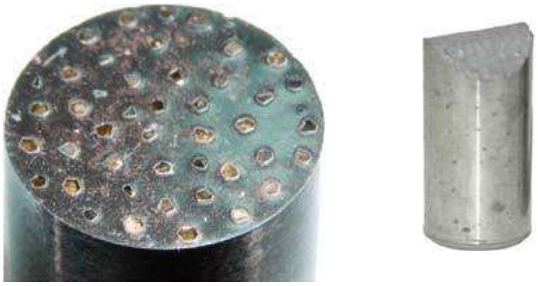


Рис. 1.45. Внешний вид горяче- прессованных вставок (*GHI*).

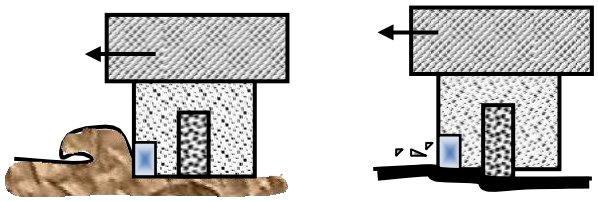
Для вставок *GHI* применяется гранулирование, обеспечивающее более равномерное распределение алмазного материала. Получаемый равномерный состав обладает большей прочностью, сохраняет форму и имеет высокую скорость бурения в течение более длительного периода.

При бурении вставки постоянно самозатачиваются путем стирания связующего материала и открытия новых алмазных резцов. Благодаря тому, что вставки *GHI* выступают над поверхностью лопастей, они обеспечивают высокий уровень контактных давлений на горную породу и режим эффективного разрушения самых твердых горных пород. В то же время импрегнированные долота *Kinetic* используются для бурения пород самой различной твердости за счет комбирированной системы вооружения,

которая позволяет реализовать резание лопастями мягких горных пород и резание-скалывание горных пород средней твердости, а также микрорезание и истирание алмазными резцами горных пород высокой твердости (рис. 1.46, *а*, *б*). Гибридные долота *Kinetic*, обозначаемые буквой *H*, имеют комбинированное вооружение из *PDC*-резцов, природных алмазов и термостабильных поликристаллических алмазов. Долота *Kinetic* могут модифицироваться за счет использования разных связующих материалов и различных по размеру кристаллов в соответствии со свойствами буримой породы и типом забойного двигателя для идеальной эксплуатации при высоких частотах вращения, возникающих при использовании турбобуров. Выступ вставок *GHI* из корпуса долота повышает объем потока жидкости перед долотом, что позволяет использовать его для разбуривания оснастки обсадной колонны, увеличить механическую скорость и применять их при бурении на регрессии, когда работа шарошечных долот и долот *PDC* приводит к снижению механической скорости и проходки на долото.

На рис. 1.47 представлено импрегнированное алмазное долото компании *UniDrill* (ОАО «Универсальное бурение», Россия). Данные долота имеют матричный корпус, в режущую структуру которых входят сегменты различной формы с импрегнированными в них мелкозернистыми искусственными алмазами.

Состав матрицы подбирается в зависимости от породы с таким расчетом, чтобы её износ происходил немного быстрее, чем износ алмазов. Долота предназначены для бурения с помощью ротора или забойных двигателей в твердых и сильно абразивных породах.



а *б*

Рис. 1.46. Схемы, поясняющие принцип работы импрегнированных долот *Kinetic*: *а* – в мягких горных породах и породах средней твердости; *б* – в твердых горных породах

Рис. 1.47. Импрегнированное алмазного долото компании *UniDrill* типа *UI*

1.5.2. Разработки алмазных инструментов компаний Atlas Copco и Boart Longyear

В настоящее время значительный объем геологоразведочного бурения выполняется на оборудовании и инструментом таких ведущих мировых производителей, как компании *Atlas Copco* и *Boart Longyear*.

В соответствии с рекомендациями компании *Atlas Copco* выбор инструмента и технологии бурения производят на основании оценки абразивности, трещиноватости и твердости горных пород, которые сгруппированы и разбиты на пять категорий.

К первой группе относятся крупнозернистые, сильнотрещиноватые и сверхабразивные породы (сланец, аргиллит и известняк). Для их бурения рекомендуются импрегнированные коронки типа *Craelius* и *Hobic* с максимально твердыми матрицами.

Вторая группа пород характеризуется как трещиноватые и абразивные (песчаник, доломит, туф, кремнистый сланец). Для бурения этих пород рекомендуются коронки с менее твердыми матрицами.

Третья группа пород характеризуется как среднеабразивная (андезит, базальт, пегматит, диабаз, габбро, диорит). Коронки, рекомендуемые компанией, имеют еще менее твердые матрицы.

Четвертая группа пород – это крепкие слабоабразивные породы

(гнейс, диорит, гранит, кварцит, порфир).

Пятая группа пород – очень крепкие и неабразивные породы (кварц, риолит, кремнистый известняк, таконит, лимонит, яшма). Для таких горных пород предлагается инструмент с наиболее мягкой матрицей.

Для изготовления импрегнированных коронок используют искусственные алмазы, однослойных коронок – природные алмазы зернистостью 30/50 или 20/25 шт./карат. Более крупные камни используются в коронках для бурения менее твердых, а более мелкие – более твердых горных пород. Алмазы в однослойных коронках применяются только группы *S*, в которую попадают обработанные и полированные алмазы повышенного качества.

Создаваемый буровой алмазный импрегнированный инструмент отличается не только формой торцевой части и промывочных каналов, но и высотой матриц. Например, коронки типа *Craelius* могут иметь матрицу высотой 6,5; 9,5; 12 и 16 мм. Коронки типа *Hobic* 6,5; 8; 10 мм. У коронок компании *Boart Longyear* типа *Alpha* высота матрицы может быть 9,5; 12 и даже более 25 мм.

Последняя из коронок имеет маркировку *Alpha Stage* 3 (рис. 1.48). Её уникальность в наличии трех рабочих «этажей», располагаемых по вертикали, при этом каждый из них оснащен тремя промывочными каналами.

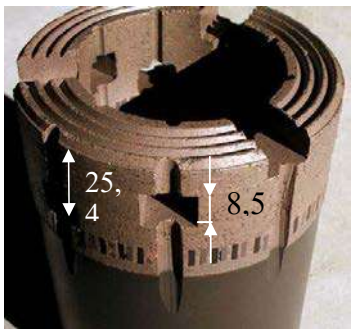


Рис. 1.48. Импрегнированная коронка компании *Boart Longyear* типа *Alpha Stage*3

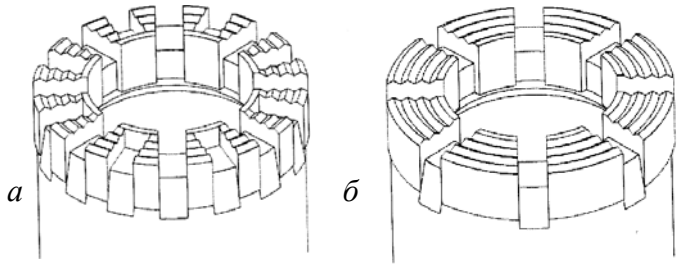


Рис. 1.49. Геометрия торца импрегнированных алмазных коронок *Alpha Bit* компании *Boart Longyear* типа *Express* с дополнительными каналами на торце (*а*) и стандартного типа (*б*)

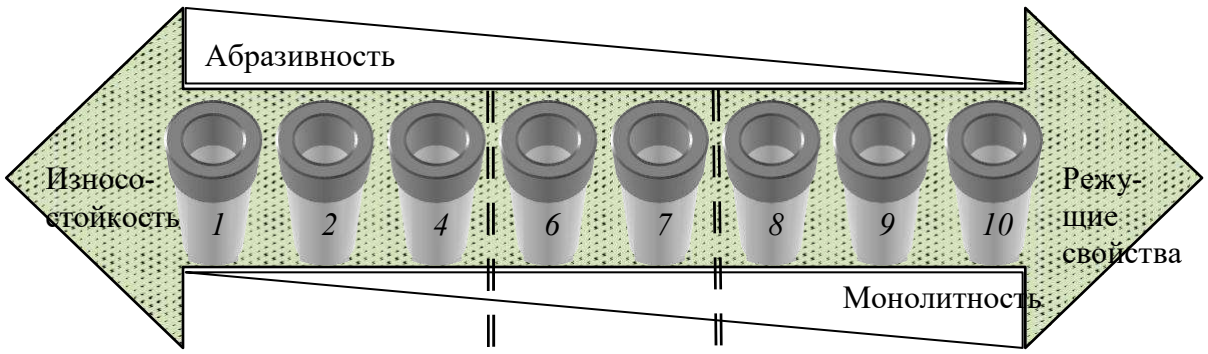
На первом этапе работы коронки действуют все три «этажа» матрицы, пропуская жидкость. При этом нижние окна обеспечивают проход жидкости для удаления шлама с забоя скважины. По мере срабатывания матрицы площадь, а затем и число каналов уменьшаются, а на заключительном этапе, когда в работе находится только последний «этаж» матрицы, работают только три оставшиеся промывочные каналы.

Сравнительные испытания коронок типа *Alpha Stage*3 и *Alpha Extended Crown* с высотой матрицы 12 мм показали, что интервал бурения первыми коронками в очень твердых породах составил 126–130 м, вторых 40–41 м. При бурении пород средней твердости соотношение длины проходки этими коронками составило соответственно 400–500/140–150 м.

Низкая (6,5, 8,0 мм) и стандартная (9,5 мм) высота матрицы используется для коронок, срок службы которых не влияет на количество операций спуска и подъема, а также если ожидается значительный износ коронки по диаметру. Для снарядов со съемным керноприемником обычно рекомендуются коронки с очень высокой матрицей (12 мм) и суперматрицей (16 и 25 мм).

Для импрегнированных коронок основным является W-профиль, эффективный за счет образования свободных поверхностей разрушения горной породы, что способствует ее разрушению.

Методика выбора коронок типа *Alpha* (рис. 1.49) компании *Boart Longyear* рассмотрена на рис. 1.50. Эти коронки выпускаются со значительным числом модификаций и оснащены алмазами в оболочке из хрома, что повышает прочность соединения их с матрицей и эксплуатационные показатели инструмента.



ТИП ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Мягкая и средней твердости:	*Твердая:*	*Очень твердая:*
андезит, перидотит, пегматит, сланец, выветрелый гранит и др. выветрелые твердые породы	кварцит, гнейс, гранит, риолит, диорит, габбро	джаспелит, таконит, кварц, роговик

Рис. 1.50. Технологическая схема выбора алмазных импрегнированных коронок *Alpha Bit* компании *Boart Longyear*: 1) коронки с матрицами от 6 до 10 серии могут изготавливаться с дополнительными каналами на торце (*Express*) и увеличенной высотой матрицы (*Extended Crown*); 2) коронки могут изготавливаться с увеличенной шириной промывочных окон (*Super-Flush*) и дополнительными торцевыми промывочными отверстиями (*Face Discharge*); 3) для бурения твердых и одновременно абразивных, а также трещиноватых горных пород коронки стандартной серии 6,7 и 8 изготавливаются с более твердой и прочной матрицей в версии *Abrasive*; 4) для бурения очень твердых горных пород коронки стандартных серий 6, 7, 8, 9 и 10 изготавливаются в версии *Competent.*

Как следует из представленного (рис. 1.50) материала, методика выбора алмазной коронки компании *Boart Longyear* аналогична методике компании *Atlas Copco* и основывается на разделении горных пород по абразивности, монолитности (твердости) и трещиноватости.

При управлении процессом бурения для каждого типа коронки компаниями *Atlas Copco* и *Boart Longyear* рекомендуется рациональная частота вращения, выбор которой определяется по линейной скорости в пределах 2–5 м/с, и усилие подачи, которое должно обеспечить определенную скорость проходки. Критерием оптимального управления алмазным бурением является значение показателя *RPI* (число оборотов на сантиметр подачи).

Таблица 1.3.

Пример выбора параметров режима бурения в соответствии с управлением по методике рациональной *RPI*

Типоразмер коронки	Расход промывочной жидкости, л/мин	Частота вращения, мин$^{-1}$	Скорость бурения см/мин при *RPI*, об/см		Осевая нагрузка, даН
			80	100	
BQ – 59,6 мм	23-30	1 700	22	17	900–2 300
		1 000	13	10	
		700	9	7	
NQ – 75,3 мм	30-38	1 350	17	14	1 400–2 700
		800	10	8	
HQ – 96,1 мм	38-45	1 000	13	10	1 800–3 600
		600	8	6	
PQ – 122,6 мм	68-87	800	10	8	2 300–4 500
		600	6	5	

В табл. 1.3. приведены рекомендуемые параметры режима бурения импрегнированными коронками компании *Boart Longyear*, выбираемые в соответствии с критерием *RPI.*

Например, при частоте вращения 1 200 мин$^{-1}$ и скорости проходки 6 дюймов (15 см) показатель *RPI* составит 1 200/15 = 80. Управление процессом бурения осуществляют, ориентируясь на *RPI* = 80–100, но считаются допустимыми и более высокие скорости проходки, для которых *RPI* = 60–50. В данном случае критерием выбора параметров режима бурения и скорости углубления является износостойкость инструмента.

1.5.3.Динамические нагрузки на алмазы в процессе разрушения горных пород

Повышенная хрупкость алмаза делает его очень чувствительным к вибрации. При сильной вибрации ресурс алмазного бурового инструмента может снижаться в десятки раз по сравнению с инструментом, отработанным без наложения вибрации.

Вибрации бурового инструмента возникают из-за неравномерности разрушения горной породы и несовершенств самого инструмента, например вследствие неперпендикулярности торца, несовпадения осей корпуса, матрицы, резьбы и др.

Как правило, колебания инструмента происходят с частотой, кратной частоте вращения снаряда. Так, при частоте вращения колонны 200–800 мин$^{-1}$ алмазная коронка претерпевает от 3,3 до 13,3 колебаний в секунду [14]. Колебания инструмента приводят к динамическим нагрузкам на алмазы. Исследования динамических усилий, возникающих при разрушении горной породы единичным алмазом, показали [12], что процесс разрушения горной

породы резанием-скалыванием происходит скачкообразно. Амплитуда как осевого, так и тангенциального усилий разрушения непрерывно меняется. Причем каждому импульсу силы на осциллограмме (рис. 1.51) соответствует единичный акт разрушения горной породы. Запись единичных актов разрушения при больших скоростях позволяет утверждать, что по внешнему виду осциллограмма единичного акта разрушения во многом сходна с графиком разрушения упругохрупкой породы индентором.

При этом рассмотрение каждого отдельного импульса на осциллограмме (рис. 1.51) показывает, что нагрузка на алмазе возрастает от минимальных до максимальных значений в сотые и тысячные доли секунды. По существу, каждый импульс на осциллограмме соответствует микроудару алмаза по горной породе.

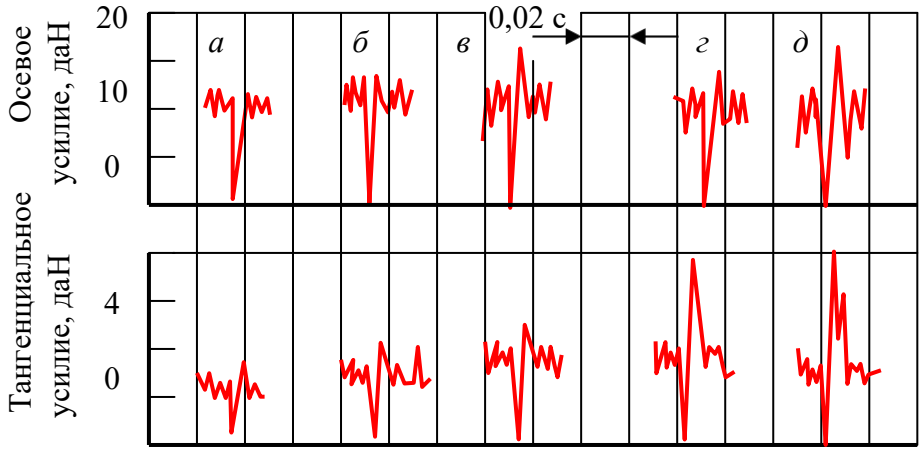


Рис. 1.51. Осциллограммы микроударов алмаза при пересечении трещины на различной глубине резания альбитофира (твердость 2 760 МПа, коэффициент пластичности 1,5), мм: *а* – 0,05; *б* – 0,75; *в* – 0,1; *г* – 0,13; *д* – 0,15.

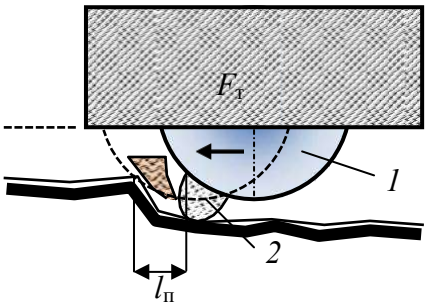


Рис. 1.52. Схема работы алмазного резца

Таким образом, в твердых упругохрупких и хрупких породах разрушение происходит циклически: микроудар – холостой ход – микроудар – холостой ход и т. д.

Динамический характер разрушения связан прежде всего с тем, что, произведя скалывание породы передней гранью и создав относительно свободное пространство перед собой, алмаз определенный участок пути $l_п$ может пройти вхолостую, а затем, достигнув неразрушенной породы на пути своего движения, вновь столкнуться с породой, испытывая при этом динамические нагрузки (рис. 1.52).

В табл. 1.4. приведено соотношение динамических, тангенциальных и осевых усилий разрушения, а также импульс силы при разрушении хрупкого мигматита (твердость 3 000 МПа, коэффициент пластичности 1).

При проведении эксперимента наряду с микроударами при резании-скалывании монолитной породы фиксировался микроудар алмазного резца при пересечении открытой трещины.

Представленные данные показывают, что алмаз воспринимает в зависимости от частоты вращения инструмента от 300 до 700 микроударов в секунду, но с увеличением скорости перемещения резца количество микроударов на единицу пути уменьшается. Сила удара, воспринимаемого алмазом при пересечении трещины, зависит от твердости горных пород и глубины его внедрения в породу (рис. 1.52).

Таблица 1.4.

Зависимость изменения характеристик микроудара алмаза по горной породе от нагрузки и скорости резания.

Частота вращения, мин$^{-1}$	Осевая нагрузка, даН			Тангенциальное усилие, даН			Импульс силы при пересечении трещины, даН		Продолжительность импульса, с
	min	max	Импульс силы, даН	min	max	Импульс силы, даН	Осевая сила, даН	Тангенциальное усилие, даН	
120	4,2	7,1	2,9	1,4	3,2	1,8	7,3	4,0	0,003
	4,9	7,9	3,0	2,0	4,0	2,0	6,25	4,25	0,003
	6,1	8,9	2,7	2,3	3,4	1,1	7,25	4,3	0,002
	6,9	12,2	5,3	2,1	4,5	2,4	9,5	5,4	0,004
	7,25	12,75	5,5	2,9	3,15	1,25	15,0	5,7	0,004
	8,5	11,2	2,7	2,5	3,5	1,0	9,5	5,0	0,004
375	4,5	7,0	2,5	1,5	3,1	1,6	7,25	4,7	0,002
	5,3	8,6	3,25	2,0	3,5	1,5	6,5	4,3	0,002
	5,5	8,0	2,5	2,1	3,1	1,0	5,6	3,25	0,0015
500	3,75	6,05	2,3	1,6	2,8	1,2	5,25	3,4	0,002
	5,5	7,0	1,5	1,6	3,0	1,4	5,75	3,8	0,002
	5,75	7,5	1,75	2,0	3,0	1,0	5,75	3,2	0,001
700	6,5	8,7	2,2	2,0	3,0	1,0	6,5	2,8	0,0016
	6,8	8,3	1,5	2,0	2,9	0,9	7,0	3,0	0,0016
	7,0	9,3	2,3	2,1	3,1	1,0	7,6	4,4	0,001

При ширине трещины, равной или несколько превышающей размер внедрившейся части алмаза, в момент пересечения трещины нагрузка на алмаз падает до нуля, а затем резко возрастает. С увеличением глубины внедрения алмаза в породу (повышение осевой нагрузки на резец) меняется амплитуда колебаний усилий до 1,5–2 раз. Отсюда следует, что максимальные динамические нагрузки на алмазный резец возникают при разрушении более твердого габбро, а при разрушении перидотита не наблюдается значительных колебаний осевого и тангенциального усилий.

Наличие трещины приводит к значительным перегрузкам на резец, которые особенно заметны на фоне незначительных динамических колебаний осевого и тангенциального усилий при разрушении перидотита.

Горная порода является диссипативной системой, что приводит к поглощению энергии ударного столкновения алмаза с ней. Влияние *диссипативных* свойств породы можно учесть через коэффициент внутреннего трения горной породы, который равен tg $\varphi_п$.

Диссипация (от лат. *dissipatio* – рассеяние) – *явление рассеивания механической энергии при движении, деформировании с переходом кинетической энергии в тепловую.*

Бурение в трещиноватых горных породах имеет ряд особенностей. Значительное влияние на процесс бурения в трещиноватых горных породах оказывает оптимальное сочетание режимных параметров, в первую очередь осевой нагрузки на буровой инструмент и частоты вращения.

Экспериментальными исследованиями и данными практики установлено, что осевая нагрузка на буровую коронку и частота вращения снаряда должны снижаться по мере увеличения степени трещиноватости пород до 50 % от значений, принятых для монолитных пород. Это связано с тем, что при появлении трещиноватости горных пород изменяется механизм их разрушения.

Трещины способствуют развитию деформаций в породе, возрастает объем разрушенной породы при подходе резца к трещине, увеличивается и размер разрушенных частиц породы (рис. 1.53). При подходе резца к трещине наблюдается расширение и углубление борозды разрушения в 1,5–2 раза.

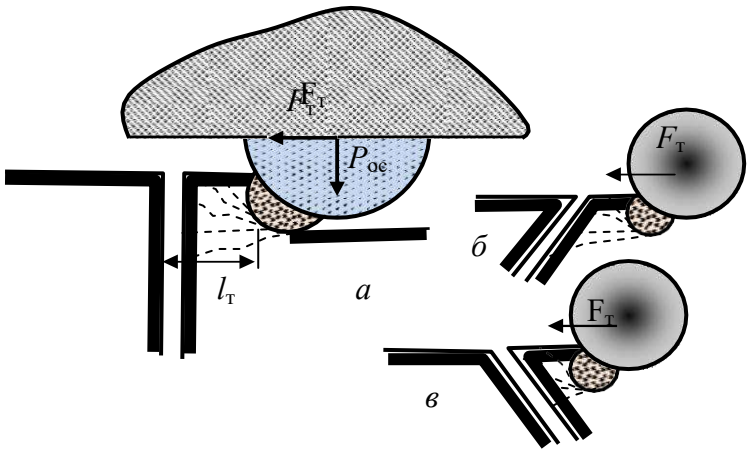


Рис. 1.53. Схемы, поясняющие процесс разрушения породы резцом перед трещиной

Таким образом, наличие трещин способствует разрушению горной породы. Степень понижения прочности забоя скважины определяется размером трещины, их количеством на единице площади забоя и ориентацией по отношению к забою скважины.

В то же время работа резца, пересекающего трещину, как уже отмечено выше, носит чрезвычайно динамический характер, так как скол породы при подходе к трещине обеспечивает резцу «пробег» на интервале $l_т$ без какого-либо сопротивления до противоположного борта трещины (рис. 1.53, *а*), а при встрече резца с бортом трещины происходит удар, в результате которого может произойти слом резца.

Особенно чувствительны к подобным ударным нагрузкам буровые инструменты резцового типа – твердосплавные коронки, лопастные долота и алмазные буровые коронки.

Импульсный характер процесса бурения трещиноватых горных пород приводит к тому, что тангенциальное усилие на резце в момент пересечения им открытой трещины резко изменяется.

Наиболее значительные ударные нагрузки на резцы инструмента будут в случаях, при которых плоскость трещины или перпендикулярна направлению движения резца (рис. 1.53, *а*), или, если плоскость трещины наклонена по направлению движения резца (рис. 1.53, *б*). В случае если плоскость трещины ориентирована в направлении перемещения резца, динамический характер работы резца будет несколько снижен (рис. 1.53, *в*), поскольку он пересекает трещину по касательной.

С увеличением трещиноватости горных пород за счет снижения прочности забоя и увеличения количества ударов и энергии каждого удара начинает расти механическая скорость бурения, но одновременно с этим увеличивается и сила ударов по резцам, что может приводить к интенсивному износу алмазных коронок, сколам и выкрашиванию алмазных резцов. Снижение динамической нагрузки на резцы буровых коронок следует осуществлять прежде всего за счет уменьшения частоты их вращения. Снижение частот вращения, особенно при алмазном бурении, следует определять исходя из допустимой

энергии удара алмазов при пересечении ими трещин с учетом количества или размеров самих трещин.

1.6. Разрушение горных пород шарошечными долотами

1.6.1. Конструкции и вооружение шарошечных долот

Одним из наиболее распространенных буровых инструментов, предназначенных для бурения горных пород различной твердости – от мягких до самых твердых, без отбора керна и с отбором керна, являются шарошечные долота.

Шарошечное долото создано в конце XIX – начале XX в. Долото с коническими шарошками запатентовано Говардом Хьюзом (США) в 1909 г.

Шарошечное долото (рис. 1.54) состоит из корпуса с резьбой *1*, лап *2* и шарошек *3*, размещаемых на осях – цапфах *4*. Шарошки 3 имеют вооружение в виде армированных зубьев *5*. При вращении корпуса долота *1* с лапами *2* шарошки *3* вращаются вокруг цапф 4. Поэтому между шарошками *3* и цапфами *4* размещают шариковые или роликовые подшипники *6*, а в долотах малого размера применяют подшипники скольжения. Очистной агент подается к забою по каналу *7*. Отверстие *8* предназначено для доставки в канал между шарошкой *3* и цапфой *4* шариков подшипника *6*, которые, выполняя функцию подшипника, служат также в качестве фиксаторов шарошки *3* на цапфе *4*. После сборки долота канал *8* закрывают.

Уникальность этого инструмента состоит в сочетании ударного, раздавливающего и скалывающего действией, реализуемых одновременно, что позволяет успешно бурить как мягкие и пластичные, так и твердые и хрупкие горные породы.

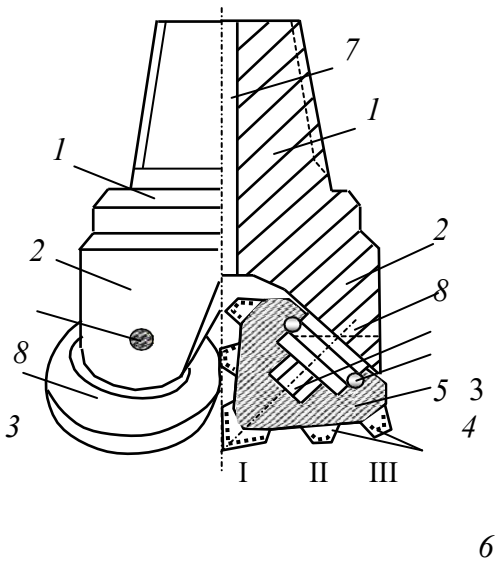


Рис. 1.54. Схема трехшарошечно- го долота с центральным промывочным каналом, зубчатым вооружением и опорой качения на подшипниках

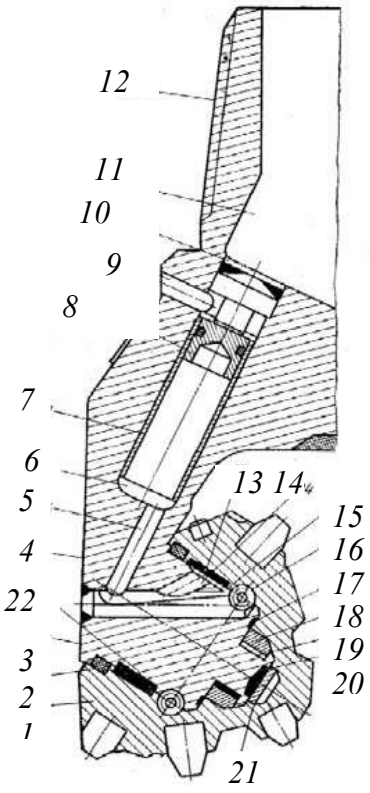


Рис. 1.55. Долото с герметизированной маслонаполненной опорой

При вращении долота шарошки перекатываются по забою, опираясь (каждая из них) на породу то одним, то двумя зубьями. Таким образом, одновременно в контакте с породой находятся несколько зубьев шарошки, а остальные остаются как бы в резерве. Если сопоставить вооружение шарошечного долота с инструментом режущего типа, например лопастным долотом, можно убедиться, что запас вооружения у шарошечного долота увеличивается в десятки раз, хотя удельное давление на забой при равной осевой нагрузке при этом остается прежним.

Зубья шарошечного долота находятся в контакте с горной породой весьма короткое время, а выйдя из контакта, интенсивно охлаждаются промывочной жидкостью. Это позволяет резко увеличить удельную мощность, реализуемую зубьями, по сравнению с резцами режуще-скалывающего инструмента, без опасности развития катастрофического изнашивания вооружения.

Ресурс шарошечных долот определяется довольно часто не стойкостью вооружения, а износостойкостью опор вращения шарошек. Для повышения ресурса шарошечных долот большого размера применяют герметизирующие подшипниковые узлы уплотнения, а также долота с маслонаполненными под давлением опорами.

На рис. 1.55 приведена схема долота с герметизированной маслонаполненной опорой серии *L* французской фирмы *Creusot-Loire*.

Долото имеет герметизированную опору благодаря наличию манжеты *2*, перекрывающей зазор между шарошкой *1* и цапфой *3*. В состав герметизированной системы, заполненной смазкой, входят просверленные в лапе *4* смазочный соединительный канал *5* и лубрикатор *6*. В лубрикаторе *6* установлены гидроцилиндр *7* с поршнем *8*, которые образуют компенсатор, обеспечивающий автономную подачу смазки из лубрикатора *6* и гидроцилиндра *7* через канал *5* к элементам опоры в процессе бурения под действием нисходящего потока промывочной жидкости. Для выравнивания давлений, действующих с одной стороны на манжету *2*, а с другой – на поршень *8*, просверлен отводной канал *9*, сбрасывающий часть жидкости, поступающей в верхнюю часть *10* лубрикатора над поршнем из внутренней полости 11 резьбовой головки *12* долота. К фрикционным поверхностям *13* и *22* большого подшипника смазка подводится от соединенного канала *5* через канал *14*, а к шариковому замковому подшипнику *16* через канал *15*. Под шариковым подшипником *16* предусмотрен дополнительный торцевой подшипник *17* скольжения. Малый фрикционный узел со стороны шарошки выполнен вставной фрикционной втулкой *18*, а со стороны цапфы 3 – поверхностью 19, армированной защитным покрытием таким же образом, как и в зоне большого подшипника, по нижнему нагруженному сегменту. Защитным покрытием армируется и концевой торец *20* цапфы, контактирующий с подпятником *21*, запрессованным в шарошку.

Защита подшипниковых опор шарошечного долота является одной из важнейших задач при его работе в условиях высокой температуры и давления, воздействия корозионных пластовых флюидов и промывочной жидкости.

Примером современного решения по созданию герметизированных опор шарошечных долот является двойное сальниковое уплотнение долот *Gemini R*, производимых компанией *Smith bits* (рис. 1.56).

Система двойного сальникового уплотнения *Gemini R* является наиболее долговечной и надежной среди подобных. Она состоит из первичного уплотнительного кольца для защиты подшипников и вторичного, обеспечивающего защиту первичного сальникового уплотнения. Первичное уплотнение новой конструкции усилено по динамическим поверхностям особым износостойким эластомером и новым энергоемким материалом, обладающим постоянным давлением в зоне соприкосновения. Первичное кольцо пулевидной формы имеет широкий поперечный профиль и обеспечивает максимальную защиту подшипника.

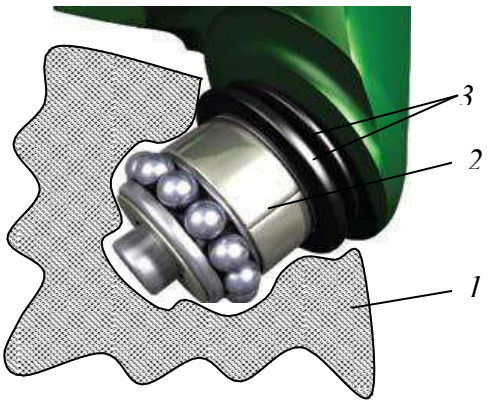


Рис. 1.56. Долото с двойным сальниковым уплотнением опоры качения:
1 – шарошка; *2* – цапфа; *3* – сдвоенные сальники.

Вторичное уплотнительное кольцо также изготавливается из нескольких специально разработанных материалов и предназначено для защиты подшипникового уплотнительного кольца от абразивного воздействия твердых частиц, присутствующих в скважинных флюидах. Специально разработанный термостойкий материал *Kevlar* расположен на торцевой поверхности уплотнения в зоне контакта герметичного кольца и цапфы. Он обеспечивает повышенный уровень износостойкости, а также защиту от абразивного воздействия скважинных жидкостей.

Эластомерная матрица обеспечивает упругость и превосходные уплотняющие свойства. Хотя уплотнительные кольца функционируют независимо друг от друга, в паре они создают превосходную герметизацию подшипникового узла и надежную работу в условиях высокой частоты вращения инструмента, больших нагрузок на долото, при проходе участков со значительным искривлением ствола, повышенном содержании твердой фазы в буровом растворе и высоком забойном давлении. Долота могут иметь 1, 2, 3, 4 и более шарошек. Основными являются трехшарошечные долота (рис. 1.57).

По назначению шарошечные долота разделяются на следующие основные виды:

- для бескернового вращательного бурения;
- бурения с отбором керна (колонковые долота);
- бурения с продувкой;
- специального назначения.

Для производства буровых работ выпускаются бескерновые шарошечные долота следующих типов: М (для мягких пород), МЗ (для мягких абразивных), МС (для мягких пород с пропластками пород средней твердости), МСЗ (для мягких абразивных пород с пропластками пород средней твердости), С (для горных пород средней твердости), СЗ (для абразивных пород средней твердости), СТ (для горных пород средней твердости с пропластками твердых пород), Т (для твердых пород), ТЗ (для твердых абра- зивных пород), ТК (для твердых горных пород с пропластками крепких пород), ТКЗ (для абразивных твердых пород с пропластками крепких пород), К (для крепких пород), ОК (для очень крепких горных пород).

Все перечисленные долота подразделяются на две группы, которые отличаются как по характеру взаимодействия и разрушения горной породы на забое, так и конструктивному исполнению рабочих породоразрушающих органов – шарошек долота.

Рис. 1.57. Трехшарошечные долота: *а* – для бурения мягких горных пород с фрезерованными на шарошках зубьями; *б*, *в* – для бурения средних по твердости и твердых горных пород с твердосплавными по- родоразрушающими вставками; *1* – траектории движения венцов шарошек долота; *2* – сопло для выхода промывочной жидкости с боковым расположением; *3* – шарошки; *4* – лапы долота; *5* – резьба.

Первая группа – долота с зубчатыми шарошками, производящие раздавливающее-дробящее-скалывающее воздействие (долота типа М, МЗ, МС, МЗС, СЗ). Раздавливание, дробление и скалывание породы реализуется при качении шарошки по забою, а вследствие проскальзывания (поступательного движения шарошки без вращения на оси) осуществляется дополнительное резание-скалывание породы.

Как следует из характеристики процесса разрушения горной породы шарошечным долотом, статические формы разрушения (раздавливание) сочетаются с динамическими (скалывание), в том числе с ударными (дробление), что и делает шарошечные долота универсальными инструментами для бурения самых различных по твердости горных пород.

Разрушение горных пород шарошечными долотами может производиться при различных соотношениях режуще-скалывающего и дробящего воздействия. Чтобы создать долота, производящие на горную породу только ударные – дробящие нагрузки, необходимо придать шарошкам такую геометрическую форму, при которой последние осуществляли бы чистое качение. Этим условиям соответствует одноконусная шарошка с образующими, пересекающимися на оси долота. Любое отклонение от указанной геометрии приводит к проскальзыванию шарошек при вращении долота на забое.

Проскальзывание шарошек является важным показателем конструкции долота, который оценивается коэффициентом проскальзывания ($К_{пр}$) – отношением длины траектории проскальзывания зубца за один оборот долота на забое к длине концентрической окружности на забое скважины, по которой перемещается зубец при вращении долота. Проскальзывание достигается за счет формы шарошек и углового или продольного смещения осей вращения шарошек от оси долота. Например, для долот с

конусными шарошками $К_{пр}$ = 0, для двух-, трех- конусных шарошек $К_{пр}$ = 0,05–0,1, для бочкообразных $К_{пр}$ = 0,1–0,15, для долот со смещением осей шарошек от оси долота коэффициент проскальзывания может достигать 0,3 . Значит, в последнем случае почти треть пути по забою зубцы шарошек осуществляют поступательное перемещение как зубцы твердосплавных коронок и долот и только две трети пути по забою перекатываются, совершая дробяще-скалывающее и раздавливающее воздействие на горную породу.

Вооружение шарошек долот первой группы выполняется зубчатым. Зубцы фрезеруются непосредственно на шарошке и армируются наплавляемым твердым сплавом.

Долота, предназначенные для бурения абразивных пород, имеют вооружение в виде запрессованных в шарошки твердосплавных вставок с клиновидной формой рабочей поверхности.

Вторая группа – долота с увеличенным дробящим воздействием на породу и минимальным проскальзывание шарошек (СТ, Т, ТЗ, ТКЗ, К, ОК). Именно поэтому у долот этого типа в основном одноконусные шарошки, установленные в долоте без смещения осей вращения. При этом шарошки долот типа СТ и Т выполняются зубчатыми, ТК, К, ОК армируются твердосплавными вставками со сферическими торцами, а шарошки долот типа ТЗ и ТКЗ имеют комбинированное вооружение – зубья чередуются с твердосплавными вставками.

Шарошечные долота могут оснащаться гидромониторными насадками, повышающими скорость истечения струй промывочной жидкости из центрального канала долота, для улучшения очистки забоя и шарошек от продуктов разрушения.

Как уже отмечено, породоразрушающими элементами шарошек могут быть зубья или твердосплавные вставки с клиновидной, шарообразной и др. формами рабочих поверхностей.

Зубья и вставки на шарошках долота располагают венцами. Венцы и зубья со вставками в них располагают таким образом, чтобы за один полный оборот долота вся поверхность забоя была покрыта зонами разрушения.

Зубья шарошек могут иметь различную геометрическую форму. Наиболее типичной является клиновая с площадкой притупления на вершине зуба (рис. 1.58). Зубья шарошек характеризуются определенными параметрами: α – углом приострения зуба; *a* – шириной площадки притупления; *b* – длиной зуба; *H* – высотой зуба; *S* – шагом расстановки зубьев.

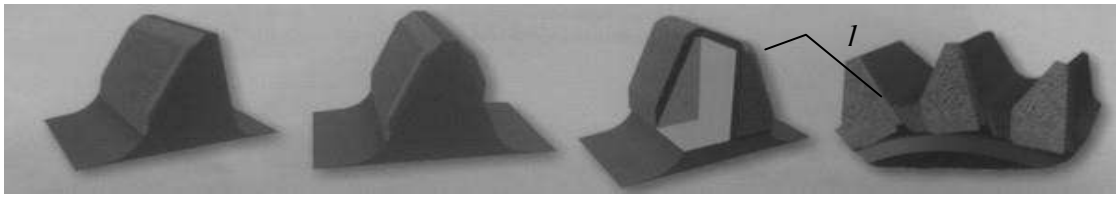


Рис. 1.58. Формы фрезерованных зубьев шарошечных долот:
1 – наплавляемый твердый сплав

Элементы вооружения (зубья или вставные зубки-вставки) располагаются на шарошках таким образом, чтобы предотвратить образование
«рейки» на забое и обеспечить полное перекрытие. Имеется вариант исполнения вооружения по самоочищающейся схеме, когда зубья соседних шарошек входят в бесконтактное зацепление, подобно двум шестерням в механической передаче, но без взаимодействия (рис. 1.59). Подобная схема выполняется с целью очистки шарошек и особенно пространства между зубьями от налипающей горной породы.

Долота оснащаются твердосплавными вставками, например разработанными компанией *Hughes Tool Company* (рис. 1.60). Каждая вставка имеет цилиндрическое основание со скошенной у нижнего торца фаской. Рабочая головка вставки может иметь

различную форму в зависимости от назначения вставки. Так, вставка с круглой (овоидальной) головкой (рис. 1.60, *а*) предназначена для скалывания и дробления породы, поэтому она применяется для оснащения долот при бурении очень твердых горных пород (ОК).

Зубок со сводчатой формой (рис. 1.60, *б*) используется в долотах, предназначенных для бурения твердых (Т) и крепких (К) горных пород. Высота головки несколько больше, чем у предыдущей вставки, поэтому при перекатывании шарошки зубок внедряется в породу на бóльшую глубину, а это возможно в породах менее твердых, чем разбуриваемые вставкой с круглой головкой. Воздействие на породу со стороны шарошки в этом случае так же дробяще-скалывающее.

Вставка со сводчато-черпаковидной головкой (рис. 1.60, *в*) характеризуется еще большей высотой. Кроме дробления-скалывания она благодаря черпаковидной выемке производит и механическое извлечение разрушенной породы из лунок забоя. Предназначена такая вставка для бурения горных пород средней (С) твердости.

Коническая рабочая головка вставки (рис. 1.60, *г*) способствует дробящему воздействию на породу, но она производит также и небольшое скребуще-режущее воздействие, а поэтому применяется для оснащения долот, предназначенных для бурения горных пород средней (С) твердости. Зубиловидная головка вставки (рис. 1.60, *д*) характеризуется пересечением граней под углом 90º. Она предназначена для разрушения горных пород средней (С) твердости дроблением и скалыванием.

Долотовидная вставка (рис. 1.60, *е*) с затуплением вершины предназначен для разрушения горных пород средней (С) твердости и мягких (М) и характеризуется наряду с дроблением-скалыванием также и скребущим действием.

Клиновидно-коническая вставка (рис. 1.60, *ж*) характеризуется весьма значительным закруглением вершины и может применяться для бурения горных пород средней твердости (С) и мягких (М).

Вставка с черпаковидной головкой и со смещением вершины (рис. 1.60, *з*) предназначена для разрушения преимущественно мягких (М) и рыхлых горных пород. Зубок обеспечивает фрезерующе-сребущее воздействие на породу и извлечение из лунок забоя разрушенных осколков породы, предотвращая их многократное перемалывание. Высота этого зубка максимальна.

Черпако-долотчатая вставка (рис. 1.60, *и*) обладает теми же свойствами, что и предыдущий, но характеризуется бóльшим притуплением его вершины и меньшей высотой, что допускает возможность его применения для разрушения более плотных пород, т. е. средней (С) твердости.

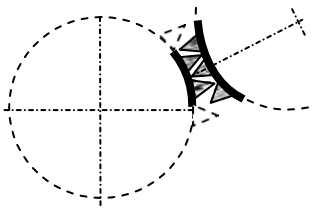


Рис. 1.59. Исполнение вооружения шарошек по самоочищающей схеме

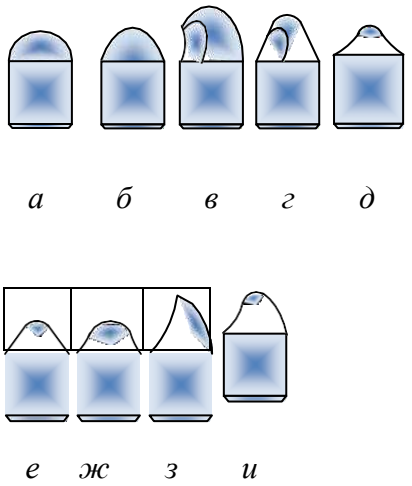


Рис. 1.60. Разновидности вставок, применяющихся в долотах

У долот фирмы *Hughes Tool Company* также выполняется усиление калибрующего вооружения твердосплавными вставками, преимущественно овоидальной формы, устанавливаемыми через один-два фрезерованных зуба. При этом вершина фрезерованного зуба срезается и в образуемой площадке ближе к тыльной стороне высверливается гнездо под вставку. Такое усиление называют «Heel Pac», т. е. упрочнение пяты – тыльной части шарошки (рис. 1.61).

Для повышения эффективности разрушения горных пород применяют долота с венцами, зубья которых имеют различную длину торцевых площадок. Такие долота получили название долот с волнообразными венцами. Ресурс этого долота и скорость бурения увеличены за счет скола зубьями более крупных частиц породы: более острые зубья *1* проникают в породу на бóльшую глубину, а более широкие зубья *2* скалывают боковые поверхности лунок, образовавшихся от ударов острых зубьев *1* (рис. 1.62). Обязательным условием при конструировании шарошечных долот является создание достаточно долговечной опоры шарошек. С этой целью трущиеся детали долот выполняются из высококачественных сталей и подвергаются специальной термообработке. Особенно сложной представляется задача создания долговечных опор качения шарошек у долот диаметром 76, 59 и 46 мм в связи с резким снижением прочностных характеристик всех деталей и трудностью использования шариковых затворов шарошек, вызванными малыми размерами цапф, лап и низкой прочностью шариков приемлемых размеров.

В связи с этим для бурения скважин диаметром 76–46 мм в Среднеазиатском НИИ геологии и минерального сырья предложена оригинальная и эффективная конструктивная схема малогабаритного долота, получившего маркировку ДДА (долото двухшарошечное асимметричное). Долота ДДА-46, 59, 76 и 93 предназначены для бурения твердых и очень твердых горных пород.

Долото ДДА (рис. 1.63) состоит из корпуса с резьбой *1* из двух секций, соединенных сварными швами *2*. На цапфах *3* корпуса смонтированы шарошки *4* полусферической формы, армированные цилиндрическими зубками *5* из твердого сплава ВК8. Опора долот (цапфа *3*, шарошка *4*) представлена подшипником скольжения, что позволяет выполнить её конструктивно более прочной, так как не требуется размещение на опоре шариков и роликов подшипниковых узлов. Шарошки долота *4* закрепляются на лапах распорным *V*-образным пальцем *6* с упорными буртами, который своими концами вставляется в отверстия пустотелых цапф *3*, создавая, таким образом, дополнительную опору.

а *б*

Рис. 1.61. Варианты усиления тыльной части шарошек долот: *а* – калибрующие вставки и один ряд вставок для защиты; *б* – два ряда вставок для защиты

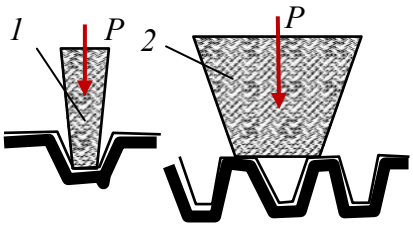


Рис. 1.62. Схема поражения забоя шарошечным долотом с зубьями в венце различной ширины

В этом случае шарошки *4* размещены в долоте не консольно, как это принято по основной схеме, а в пределах замкнутого контура «цапфа *1* – *V*-образный палец-лапа *2*», что существенно повышает прочность долота и практически исключает отделение шарошек от корпуса при бурении. Угол наклона цапф *6* к оси долота 65°. Детали долота изготавливаются из легированной стали и подвергаются термообработке, цементации, закалке и отпуску.

Исследования, выполненные при создании конструкции долота ДДА, показали, что проскальзывание является одним из основных факторов, интенсифицирующих процесс разрушения при бурении не только мягких и пластичных пород, но и твердых горных пород.

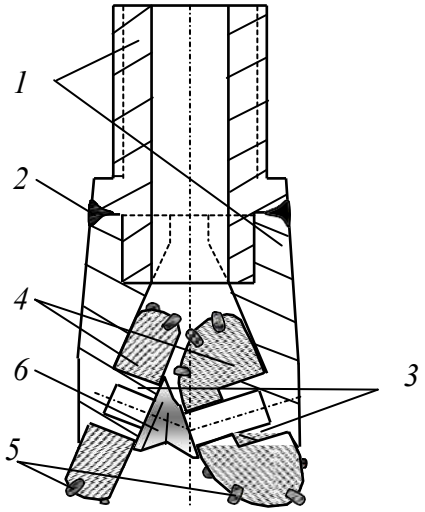


Рис. 1.63. Шарошечное долото ДДА

При бурении долотами типа ДДА достигается более высокая механическая скорость бурения при относительно равном ресурсе в сравнении с другими долотами, например трех- или двухшарошечными долотами типа К, конструкции СКБ Министерства геологии, которые выполнены по классической схеме.

1.6.2.Системы очистки забоя и интенсификация процесса разрушения при бурении шарошечными долотами

Поскольку при шарошечном бурении образуется большое количество продуктов разрушения (шлама), осколков и достаточно крупных обломков, эффективное разрушение горных пород шарошечными долотами возможно только при совершенной системе очистки забоя, под которой подразумевается система, обеспечивающая немедленное и полное удаление продуктов разрушения, образующихся в результате взаимодействия зубьев долота с породой из зоны породоразрушающего действия инструмента. Обломки породы, отделенные от забоя одним зубом, должны быть удалены до взаимодействия с породой следующего зуба таким образом, чтобы все породоразрушающие элементы долота постоянно контактировали только с породой забоя, не производя повторного измельчения разрушенной породы. В таком случае при определенном количестве затраченной на разрушение породы механической энергии скорость проходки будет максимальной. В другом случае часть энергии будет расходоваться бесполезно на разрушение уже образовавшихся, но не удаленных с забоя обломков породы.

Одной из причин уменьшения скорости бурения может быть зашламование долота, особенно при бурении пластичных пород. В шарошечных долотах шламом забивается пространство между зубьями и даже шарошками, а в алмазных инструментах – между

алмазными резцами и в каналах на торце.

Немедленное удаление шлама из призабойной зоны может быть достигнуто при обеспечении эффективной циркуляции промывочного раствора.

К факторам, определяющим эффективность циркуляции, относятся:

- расход жидкости;
- скорость истечения струи из промывочного канала или гидромониторного сопла;
- геометрия системы промывки долота: число и форма насадок (или отверстий), их расположение и расстояние до забоя;
- характеристики промывочной жидкости: плотность, содержание твердой фазы, фильтрационная способность, вязкость, смачивающая способность и др.;
- свойства разбуриваемых горных пород: прочность, проницаемость, пластовое давление.

Процесс промывки забоя можно условно разделить на три этапа:

- удаление обломков породы с поверхности забоя;
- вынос шлама из зоны действия зубьев долота в кольцевое пространство между буровым снарядом и стенкой скважины;
- транспортирование шлама по кольцевому пространству к устью скважины.

Достижение максимальных скоростей бурения возможно лишь при оптимизации всего процесса и параметров промывки, характеристик промывочной жидкости.

Определяющим для эффективной работы долота является этап быстрого удаления обломков после отделения их зубьями долота от массива породы. Эта задача решается применением той или иной системы промывки долот. В наиболее традиционных и часто применяемых для бурения трехшарошечных долотах используются три основные системы промывки: центральная, периферийная, комбинированная.

При центральной промывке буровой раствор поступает в призабойную зону через внутренний канал долота. Поток раствора омывает шарошки, очищая их от шлама, а затем достигает забоя, подхватывает шлам и через зазоры между лапами долота и стенкой скважины поступает в затрубное пространство. Часто вместо одного центрального канала создают три промывочных отверстия – одно для каждой шарошки долота. Скорость струй промывочной жидкости изменяется от 20–40 м/с.

При периферийной схеме промывки буровой раствор поступает в призабойную зону через отверстия между шарошками, причем струи направляются непосредственно на забой скважины. Здесь струи растекаются параллельно плоскости забоя, очищают поверхность забоя и зубья шарошек, после чего жидкость через зазор между долотом и стенкой скважины поступает в затрубное пространство. Обычно в промывочных отверстиях запрессованы сменные гидромониторные насадки (керамические или карбида вольфрама). Скорость струй раствора составляет 70–150 м/с. Комбинированная система промывки применяется в долотах большого диаметра. В данном случае сочетаются две первые схемы.

Примером комбинированной схемы промывки может быть гидродинамическая система долот компании *Smith bits*.

Для оценки потока жидкости в системе промывки *Typhoon* компании *Smith bits* применяется усовершенствованная расчетная модель гидродинамики жидкости (*CFD*), которая обеспечивает оптимизацию потока для более эффективной очистки шарошек, выноса бурового шлама, а также во избежание его повторного перемалывания. В системе промывки *Typhoon* используются как векторные (направленные) удлиненные насадки *VE* для очистки внешней части вооружения, так и насадки для очистки внутренней части вооружения *J*3 (рис. 1.64).

Векторные удлиненные насадки для очистки внешней части вооружения *VE* точно направляют поток жидкости к передней кромке шарошек, в то время как насадки *J*3 для очистки внутренней части вооружения распределяют потоки в пространство между шарошками. Совместное действие этих шести точно направленных насадок формирует режим потока, который улучшает путь прохождения и скорость бурового раствора. Это позволяет оптимизировать очистку резцов и вынос бурового шлама с забоя, что приводит к максимальному увеличению механической скорости бурения. В настоящее время система промывки *Typhoon* предлагается для долот с наружным диаметром 406 мм и более.

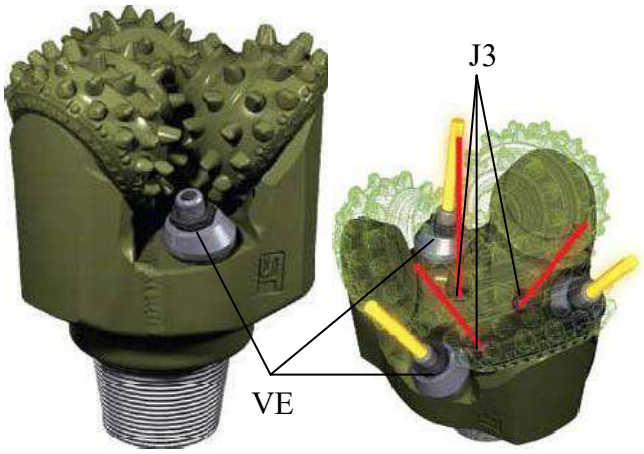


Рис. 1.64. Долота *Shamal Typhoon* компании *Smith bits* с тремя векторными насадками (VE) для очистки внешней части вооружения и тремя насадками для очистки внутренней части вооружения (J3).

Параметры, определяющие качество промывки забоя (средняя скорость струй, мощность, сила удара и динамическое давление струй, скорость параллельных забою потоков), имеют максимальное значение при небольшом расстоянии между насадкой и забоем.

Поэтому один из путей улучшения характеристик долот с периферийной системой промывки состоит в приближении насадок к забою скважины на расстояние, которое меньше длины ядра струи (в котором скорость струи постоянна). Это расстояние будет равно (4–6) d_o, где d_o – диаметр насадки в точке истечения раствора. Чаще всего расстояние размещения насадок составляет (10–20) d_o. Для размещения насадок используют специальные удлинители.

В долотах фирмы *Smit tul* расстояние от насадки до забоя составляет

38 мм – (2,5–4) d_o.

Другой способ повышения эффективности шарошечных долот заключается в применении асимметричной схемы промывки.

Например, известно применение долота (Бухарестский институт нефти и газа), в котором часть жидкости проходит через канал в одной из лап долота, через её цапфу и конус шарошки. Струя жидкости выходит почти параллельно плоскости забоя и при вращении долота смывает шлам из центральной зоны к периферии, откуда его легче удалять в затрубное пространство.

Во Франции разработано и испытано долото с двумя насадками (рис. 1.65), расположенными между шарошками, и одной, направленной вверх. Последняя, создает эжекционный эффект и ускоряет удаление шлама с забоя.

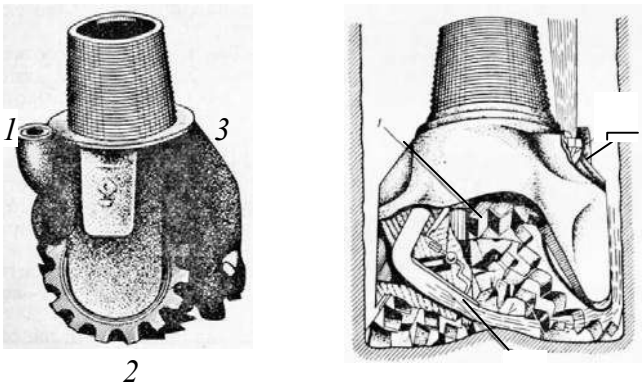


Рис. 1.65. Долота с гидродинамической насадкой, ориентированной вверх.

Эжектор (франц. *egoutteur* – выбрасывать) – *струйный насос, в котором жидкость перемещается (циркулирует), увлекаемая потоком (струей) жидкости или газа.*

Известно также применение долота с комбинированной асимметричной системой промывки: одна обычная периферийная насадка, один канал истечения струи через лапу и еще один промывочный канал, направленный вверх.

Результаты бурения долотами с асимметричной промывкой показали рост скорости проходки и ресурса вооружения и опор долота.

В малогабаритных долотах диаметром 112–46 мм традиционно применяется центральная система промывки забоя.

Гидромониторная струя жидкости, выходящая из сопла долота, распространяется в ограниченном пространстве. Расчет такой струи производится на основе теории затопленных струй.

Анализ показывает, что если струя жидкости к забою будет направлена по касательной, то её породоразрушающее действие может усилиться. В данном случае наибольший эффект может быть достигнут, если струя будет направлена по касательной непосредственно в зону работы зубца шарошечного долота.

Конструкция долот позволяет использовать удлиненные насадки и направлять струю под углом 15–25^{o} к забою в приконтакную зону зубьев шарошки с породой. В приконтактной зоне зуба долота с забоем порода деформирована зубьями, имеет выступы, которые образуются при внедрении в забой, и может быть легко разрушена струей жидкости.

При бурении более прочных пород – твердых и очень твердых, динамическое давление струи должно обеспечить сдвиг и отрыв от поверхности забоя частицы разрушенной породы.

При внедрении зуба шарошечного долота в породу на забое образуются магистральные трещины, направленные от ядра сжатия к поверхности забоя. Скалывание породы по направлениям развития магистральных трещин приводит к образованию лунок выкола. Препятствием этому является угнетающее давление, которое связано с действием гидростатического давления столба жидкости, пластового давления и динамического потока струй жидкости из промывочных каналов долота.

Для эффективного отделения (отслаивания) от забоя отколотых зубьями кусочков породы необходимо направить поток жидкости в зону разрушения по направлению именно в образующуюся трещину отрыва (рис. 1.66).

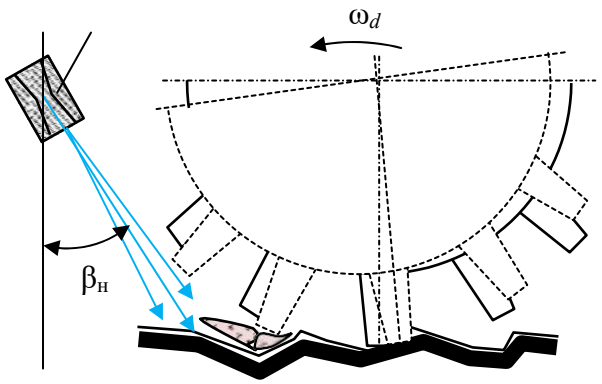


Рис. 1.66. Схема для определения рационального направления струи промывочного раствора из насадки *.1*

Представленная на рис. 1.66 модель интенсификации процесса разрушения твердой горной породы позволила повысить механическую скорость бурения на 30 %, а ресурс долот увеличить на 20 %.

1.7. Разрушение горных пород при вращательно-ударном, ударно-вращательном и ударном способах бурения

1.7.1. Разрушение горных пород при вращательно-ударном способе бурения

Эффективность вращательного бурения твердых горных пород алмазным и шарошечным буровым инструментом может быть существенно повышена за счет наложения высокочастотных ударных импульсов.

Вращательно-ударный способ бурения – это метод разрушения пород вследствие воздействия осевой нагрузки, крутящего момента, характерных для вращательного бурения, и динамической нагрузки, прилагаемой к буровому инструменту в режиме высокочастотных ударных импульсов малой и средней энергии.

Вследствие приложения высокочастотных ударных импульсов в горной породе развиваются дополнительные напряжения и формируются трещины. Особенно значительным становится эффект от ударных импульсов при бурении чрезвычайно твердых, хрупких и малоабразивных горных пород, поскольку применяемые осевые нагрузки на инструмент при вращательном бурении скважин диаметром 46, 59, 76 мм могут быть недостаточны для создания необходимых для объемного разрушения горных пород напряжений. При этом более вероятен недостаток разрушающих напряжений при алмазном бурении твердых и очень твердых горных пород коронками с увеличенной шириной матричного кольца (коронки для бурения снарядами со съемным керноприемником – ССК) и бурении долотами, поскольку в данных случаях особенно проблематично создание достаточных для разрушения контактных напряжений из-за увеличенной площади торца буровых инструментов. Повышение же осевой нагрузки до определенных пределов при вращательном бурении твердых горных пород сдерживается ограниченной прочностью бурильных колонн (особенно колонн ССК), их деформируемостью и, соответственно, вибрацией при бурении, ограничением мощности привода буровых станков при бурении на близких к предельным, по мощности привода, глубинах, наличием кривизны ствола скважины и др. В этих случаях дополнительным силовым фактором, способным интенсифицировать процесс разрушения горной породы, является ударный импульс малой и средней мощности, передаваемый буровой компоновке и буровому инструменту с высокой частотой.

Немаловажным обстоятельством, определяющим повышение эффективности бурения при наложении высокочастотной вибрации на буровую компоновку, является снижение коэффициента трения между колонной и стенкой скважины, что приводит к значительному улучшению условий работы деформированной бурильной колонны.

Так, например, вибрационный, с наложением крутильных колебаний, вид движения бурильной колонны и бурового инструмента преобразуется в более равномерный, максимально соответствующий оптимальным условиям передачи к буровому инструменту осевой нагрузки и крутящего момента.

Рост показателей вращательно-ударного бурения связан со снижением подклинок керна в колонковом снаряде, что также является следствием продольного вибрирования бурового снаряда.

1.7.2. Разрушение горных пород алмазным инструментом в режиме вращательно-ударного бурения

Анализ условий работы алмазных резцов показывает, что стойкость алмазов при вращении обусловлена прежде всего изгибающими напряжениями, а не напряжениями на раздавливание. Таким образом, имеющийся значительный резерв прочностных свойств резцов на сжатие при вращательном бурении не реализуется, поскольку повышение осевого усилия приводит к скалыванию резцов, испытывающих значительные поперечные нагрузки, сопровождающиеся ударами, характерными для процесса скалывания твердых и хрупких горных пород. Реализовать резерв прочности резцов в осевом направлении возможно за счет импульсного приложения нагрузки в направлении перпендикулярном плоскости забоя. В этом случае, в результате кратковременности действия ударного импульса силы трения на границе резец – горная порода не успевают развиваться и тангенциальная составляющая разрушения породы, несмотря на передачу дополнительной энергии, увеличивается незначительно. При этом важным обстоятельством является вибрирование инструмента и ударный характер нагрузок, что приводит к снижению коэффициента трения и способствует скалыванию и отделению кусочков породы от забоя.

Таким образом, прилагая нагрузку в виде кратковременных импульсов, направленных перпендикулярно к плоскости забоя, можно передавать для разрушения горной породы бóльшую энергию и интенсифицировать процесс вращательного бурения. При этом более полно будет использован потенциал прочности породоразрушающих резцов бурового инструмента.

На рис. 1.67, *в* приведена схема работы алмазного резца при вращательном бурении. Из данной схемы следует, что приложение ударного импульса интенсифицирует разрушение породы за счет повышения осевой силовой составляющей, что приводит к росту глубины внедрения резца и дополнительному развитию трещин предразрушения забоя. При этом тангенциальное усилие возрастает в меньшей степени в сравнении с вращательным бурением, что незначительно увеличивает износ и сохраняет работоспособность резцов.

При приложении к алмазной коронке ударных импульсов алмазы внедряются в породу, а избыточный запас энергии удара воспринимает матрица коронки. Повышение контактных напряжений и увеличение глубины внедрения алмазов в породу приводит к увеличению объема слоя породы, разрушаемого за один оборот. В результате отмечается образование крупных частиц шлама, происходит интенсивный абразивный износ матрицы и более активное, в сравнении с вращательным бурением, обнажение алмазов. Таким образом, в меньшей степени проявляются условия, приводящие к заполированию алмазов.

Практика гидроударно-алмазного бурения подтверждает чрезвычайно редкие случаи заполирования алмазов [31], что позволяет рекомендовать вращательно-ударное бурение алмазным инструментом горных пород, склонных вызывать заполирование алмазов.

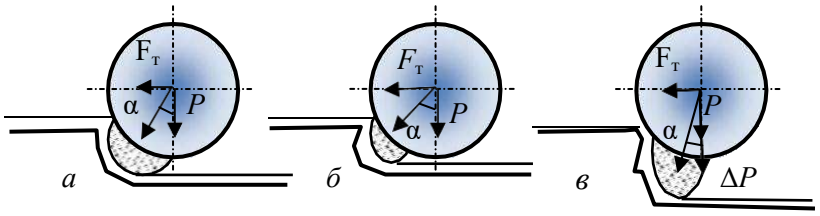


Рис. 1.67. Схемы для анализа процесса разрушения породы алмазным резцом при изменении усилия $F_т$ в процессе вращательного бурения (*а*, *б*) и приложения ударного импульса ΔP (*в*).

На рис. 1.68 представлены результаты исследования влияния ударных импульсов на показатели бурения алмазными коронками диаметром 59 мм.

Как следует из графиков, зависимости изменения механической скорости бурения и проходки на коронку имеют оптимальное значение при 15–20 Дж. С увеличением твердости горных пород оптимальные значения величины энергии удара смещаются в сторону меньших значений энергии.

Осмотр алмазных коронок показал, что с увеличением твердости пород и энергии удара интенсивность износа алмазов увеличивается, что и приводит к снижению проходки на коронку.

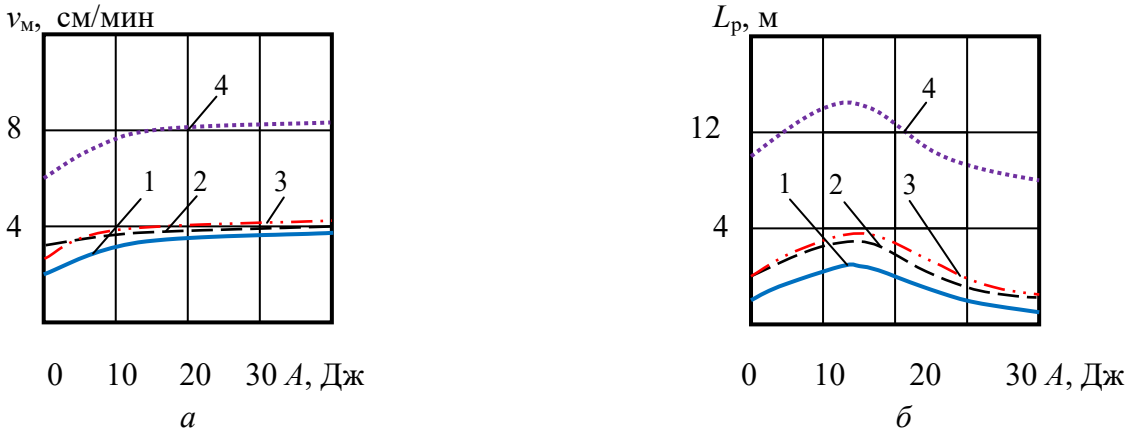


Рис. 1.68. Зависимости показателей бурения алмазной коронкой 01А3 от энергии удара *А*: *а* – механической скорости; *б* – проходки на коронку по породам:
1 – кварцит; 2 – гранит; 3 – лабрадорит; 4 – песчаник.

Рациональной для алмазных коронок диаметром 59 мм оказалась энергия удара 15 Дж, для коронок диаметром 76 мм – 20 Дж.

Оптимальная частота ударных импульсов $n_{уд}$, передаваемых породе, при вращательно-ударном бурении должна быть равна частоте циклов разрушения породы резцами.

Частота циклов разрушения породы за один оборот инструмента на забое $n_ц$ определится из соотношения длины периметра забоя радиусом R и интервала скола породы передней гранью резца $l_ц$[12]:

$$n_ц = \frac{2\pi R}{l_ц}.$$

Оптимальная частота ударных импульсов при принятом условии равенства частоте циклов разрушения породы резцами будет определяться из зависимости

$$n_{\text{уд}} = \frac{\omega n_{\text{ц}}}{n_{\text{р}}} = \frac{2\pi R \operatorname{tg} \gamma_{\text{ск}}}{h_{\text{л}} n_{\text{р}}} \omega, \qquad (1.2.)$$

где $h_{\text{л}}$ – глубина борозды разрушения резцом, м; $n_{\text{р}}$ – число активно работающих резцов в линии резания на торце коронки; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания породы резцом, град.

Из формулы 1.2. следует, что оптимальная частота ударов по забою пропорциональна частоте вращения инструмента, а значит, при повышении частоты вращения бурового инструмента частота ударных импульсов должна повышаться в равной степени. Действительно, опыт вращательно- ударного бурения свидетельствует, что с увеличением частоты вращения инструмента при постоянной частоте ударов эффективность наложения ударных импульсов снижается: рост механической скорости бурения при частоте вращения 300 мин$^{-1}$ составил 1,5–2,0 раза, а при частоте вращения 1 000 мин$^{-1}$ – только 1,1–1,3 раза.

Рациональная частота вращения бурового инструмента с учетом абсолютного значения механической скорости бурения и ресурса инструмента, возможно, заключена между приведенными значениями частот вращения 300 и 1 000 мин$^{-1}$.

При известной частоте ударов $n_{\text{уд}}$, реализуемой гидроударником, которая может варьировать в пределах 2 500–3 500 ударов в минуту, важно определить рациональную частоту вращения бурового инструмента. С учетом зависимости для расчета числа активно работающих резцов $n_{\text{р}}$ из зависимости 1.2. получим

$$\omega = \frac{n_{\text{уд}} N_0 h}{2\pi R \operatorname{tg} \gamma_{\text{ск}}} \qquad (1.3.)$$

где N_0 – число резцов в линии резания на торце коронки (средняя линия торца матрицы на расстоянии от центра торца, равном R); h – глубина внедрения резца в породу.

Из приведенной зависимости следует, что для эффективной реализации вращательно-ударного алмазного бурения на высоких частотах вращения бурового инструмента следует применять забойные ударные машины, реализующие максимально возможные частоты ударов. Резерв повышения эффективности определяется также повышением глубины внедрения резцов в породу. Поэтому лучшие результаты бурения могут быть получены при использовании алмазного инструмента с заданным увеличенным выпуском резцов. Более высокой оптимальная частота вращения будет при бурении импрегнированными коронками, так как существенно возрастает число работающих резцов.

Результаты алмазного вращательно-ударного бурения в ПГО «Севзапгеология» (данные И. С. Афанасьева и др.) свидетельствуют, что лучшие результаты по механической скорости бурения получены при частотах вращения 300–780 мин$^{-1}$, при этом интенсивность роста механической скорости бурения импрегнированными коронками оказалась выше, чем при бурении однослойными. В то же время эффект применения высокочастотных гидроударников ГВ-6 и Г-59В снижается при использовании однослойных коронок с более крупными алмазами.

Осевая нагрузка при вращательно-ударном бурении играет не меньшую роль, чем частота вращения, и должна подбираться наряду с частотой вращения. Для месторождений Северо-Запада по результатам буровых работ определено, что при частоте вращения инструмента 430 мин$^{-1}$ оптимальными для однослойных коронок будут осевые нагрузки 1 200–1 600 даН, а для импрегнированных – 1 100–1 800 даН.

При алмазном вращательно-ударном бурении на забой необходимо подавать пониженное количество промывочной жидкости, соответствующее требованиям бурения алмазным инструментом. В то же время для работы гидроударника требуется значительное количество промывочной жидкости, существенно превышающее нужное количество по условию эффективного разрушения породы алмазным инструментом.

Для уменьшения количества поступающей на забой промывочной жидкости в корпусе кернорвателя сверлят отверстия или применяют специальные делители потока промывочной жидкости.

Максимальный эффект от применения вращательно-ударного бурения в различных производственных организациях получен при бурении твердых, хрупких и малоабразивных горных пород, при разрушении которых алмазными коронками имеет место заполирование алмазов: механическая скорость возрастает на 30–40 %, углубление за рейс увеличивается на 15–25 %, ресурс коронок повышается на 35–50 %, выход керна возрастает с 70 до 80–90 %, снижается интенсивность естественного искривления скважин.

1.7.3. Разрушение горных пород шарошечными долотами в режиме вращательно-ударного бурения

Интенсификация процесса разрушения горных пород наложением ударных импульсов возможна и при бурении шарошечными долотами. Особенно оправдано применение ударных забойных машин при бурении достаточно твердых горных пород, для разрушения которых требуется значительная осевая нагрузка на долота.

Опыт применения (по данным А. Т. Киселева и В. Г. Кардыша) гидроударных забойных машин показал, что вследствие роста удельных контактных напряжений в породе при бурении горных пород VII–XII категорий по буримости при осевой нагрузке 15–20 кН и частоте вращения 280–430 мин$^{-1}$ средний ресурс двухшарошечных долот диаметром 76 мм возрос вследствие применения высокочастотных гидроударников с 11 до 19 м, а скорость бурения увеличилась с 3,4 до 4,8 м/ч.

При этом достигнут более значительный рост показателей при бурении трехшарошечными долотами в сравнении с двухшарошечными, что подтверждает вывод о влиянии на эффективность разрушения породы прежде всего контактного напряжения, которое существенно возрастает при наложении ударного импульса. У трехшарошечных долот, как известно, площадь контакта вставок с породой забоя несколько выше, чем у двухшарошечных, а значит, роль дополнительной ударной нагрузки оказалась более значительной.

Применение гидроударников при бурении шарошечными долотами позволяет бурить на пониженных осевых нагрузках, но с более высокой механической скоростью, что в результате и сказывается на ресурсе долот.

При бурении шарошечными долотами в режиме вращательно- ударного бурения отмечено, что с повышением частоты вращения бурового инструмента эффективность разрушения породы снижается, т. е. остается справедливой закономерность, отмеченная ранее для вращательно- ударного бурения алмазным инструментом.

В зависимости от диаметра долот рекомендуются для использования гидроударники с различной энергией удара: для бурения долотами диаметром 59 мм подходят высокочастные ударные машины с энергией удара 15 Дж, для долот диаметром 76 мм гидроударники со средней частотой удара и энергией удара 60–80 Дж, а при бурении долотами диаметром 93 мм целесообразно использование гидроударников с высокой энергией и малой частотой ударного импульса.

Таким образом, для бурения долотами больших размеров более подходит ударно-вращательный способ бурения, при котором преобладает ударное разрушение горной породы над режимом вращательного бурения.

1.7.4. Разрушение горных пород при ударно-вращательном способе бурения

Ударно-вращательный способ бурения – способ разрушения горных пород ударными нагрузками, под действием которых происходит скалывание и дробление породы, а осевая нагрузка на инструмент и вращение бурового инструмента исполняют вспомогательную роль, обеспечивая процесс ударного разрушения породы.

Он применяется при бурении скважин погружными пневмоударниками и шпуров в твердых горных породах перфораторами.

Ударно-вращательный способ характеризуется высокими значениями энергии удара (не менее 40 Дж), малыми значениями частоты вращения бурового инструмента (10–60 $мин^{-1}$) и осевой нагрузки (300–600 даН на инструмент диаметром 59–105 мм).

Вращение инструмента в сочетании с частотой ударов обеспечивает определенную схему поражения забоя (расстояние между ударами вставок о породу), которая может быть эффективной только при определенном соотношении частот удара и вращения.

Привод вращения бурового инструмента при реализации ударно- вращательного бурения может быть:

- от бурового станка, т. е. за счет вращения всей бурильной колонны;
- поворотного механизма, обеспечивающего поворот долота во взаимодействии с циклом ударных нагрузок;
- возможно вращение колонны забойным гидродвигателем.

Осевая нагрузка при этом способе бурения носит вспомогательный характер и должна обеспечивать не внедрение резцов инструмента в породу, как это происходит при вращательном способе бурения, а постоянный контакт долота или коронки с забоем.

Результаты экспериментов, приведенные в, показывают, что при малых значениях энергии удара статическая осевая нагрузка способствует снижению энергоемкости разрушения, однако дальнейшее повышение энергии удара приводит к преобладающему влиянию на процесс разрушения динамической силы и влияние статической нагрузки становится несущественным (рис. 1.69).

Очевидно, что при ударно-вращательном бурении значительный недостаток осевого усилия приведет к отскакиваниям долота от забоя и эффект передачи ударного импульса будет снижен.

Чрезмерная осевая нагрузка приводит к тому, что породоразрушающие вставки будут находиться в постоянно заглубленном в породу положении, а это не позволит реализовать задаваемую вращением инструмента эффективную схему поражения забоя между ударами. В то же время высокая осевая нагрузка и задавливание резцов в породу при наложении мощного ударного импульса приводят к разрушению породоразрушающих вставок.

При ударно-вращательном бурении крайне важна схема поражения забоя породоразрушающими вставками бурового инструмента.

В представлены результаты оценки влияния схемы нанесения ударов по забою клиновидными (острым и притупленным, рис. 1.70, *а*, *б*) инденторами. Эти исследования важны при обосновании параметров технологии ударно-вращательного бурения, в частности частоты вращения инструмента.

При рассмотрении трех схем поражения забоя (рис. 1.70, *а*, *б*, *в*) установлено, что минимальная энергоемкость разрушения достигается при реализации второй схемы поражения забоя острым индентором.

Результаты исследований приведены в табл. 5. Анализ данных показывает, что энергоемкость разрушения снижается при нанесении ударов по подготовленному и предварительно ослабленному забою. В этих условиях будут достаточно эффективны острые инденторы.

При радиальном равномерном размещении резцов на торце коронки или долота вторая схема поражения забоя (рис. 1.70) может рассматриваться как основная при обосновании параметров режима бурения.

Таблица 1.4.

Энергоемкость разрушения породы при различных схемах поражения забоя

Форма торца индентора	Энергоемкость разрушения, Дж/см^3		
	Схема поражения забоя на рис. 1.70, *а*	Схема поражения забоя на рис. 1.70, *б*	Схема поражения забоя на рис. 1.70, *в*
Притупленный клин	2 000	260	370
Острый клин	400	160	280

Обязательным условием осуществления рациональной схемы нанесения ударов является смещение (отставание) ударов от предыдущих на определенное расстояние. Это, прежде всего, связано с тем, что вследствие вращения инструмента удар по забою наносится не под прямым углом, а с некоторым отклонением (косой удар). Именно поэтому для рационального использования энергии удара следует обеспечивать некоторое смещение центра удара, а расстояние *К* от следа первого удара может составлять 0,6–0,75.

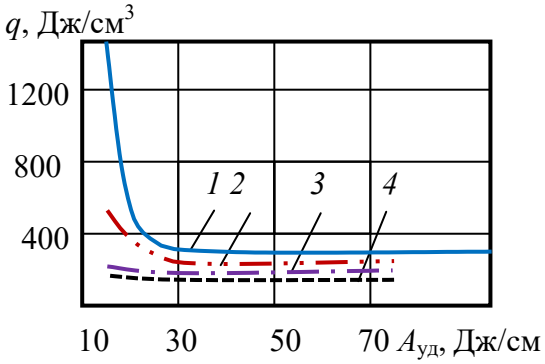


Рис. 1.69. Зависимости энергоемкости разрушения *q* притупленным клином от энергии удара $A_{уд}$ при различных значениях статической нагрузки: *1* – 0,1 кН/см; *2* – 1 кН/см; *3* – 3,3 кН/см; *4* – 6,7 кН/см

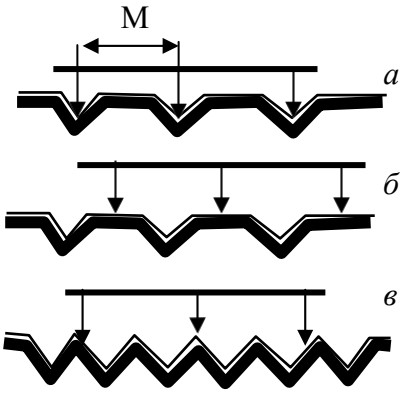


Рис. 1.70. Схемы нанесения ударов в плоскости забоя (М = 16 мм): *а* – лунки не взаимодействуют друг с другом; *б* – повторные удары наносятся между лунками; *в* – удары по нарушенному забою

На рис. 1.71. дана зависимость механической скорости бурения при пневмоударном бурении долотами, вооруженными лезвиями с радиальным расположением от частоты вращения. Из графиков следует, что в диапазоне частот вращения 0–100 мин$^{-1}$ отмечается 2–3 экстремальных значения. Представленные графики подтверждают наличие рациональной схемы поражения забоя, которая определяется частотой вращения инструмента. Минимальная скорость бурения (точки *2*, 2^{I}) получена при совпадении лунок разрушения с повторным нанесением ударов. Максимальная скорость бурения (точки *1*, 1^{I}, *3*, 3^{I}) получена при нанесении ударов по выступам, расположенным между лунками разрушения.

В случае если породоразрушающие вставки располагаются на торце инструмента не по радиальной схеме, зависимость механической скорости бурения от частоты вращения будет иной, отличной от представленной на рис. 1.72. Поперечное расположение лезвий на торце, а также применение сферических породоразрушающих вставок приводит к тому, что зависимость механической скорости бурения от частоты вращения инструмента получила форму параболы с одним максимумом (рис. 1.73).

При этом характерно, что для менее твердых пород максимум частоты вращения, при котором достигнута наиболее высокая механическая скорость бурения, смещен в сторону больших значений (~ 50 мин$^{-1}$), а при бурении твердых и крепких пород максимальная скорость бурения полу- чена при малых значениях частоты вращения (~ 30 мин$^{-1}$). На рис. 1.73 эта закономерность отмечена восходящей стрелкой через вершины максимальных значений графиков скорости бурения.

Зависимость скорости ударно-вращательного бурения от осевой нагрузки определяется тем, что с ее увеличением в начале рейса механическая скорость бурения возрастает, но в течение рейса снижается и тем интенсивнее, чем она выше (рис. 1.74). Эти данные показывают, что чрезмерные осевые нагрузки при ударно-вращательном бурении приводят к более интенсивному разрушению породоразрушающих вставок.

Зависимость скорости бурения от давления сжатого воздуха показывает практически прямопропорциональный рост скорости бурения при повышении давления.

При этом повышение давления сжатого воздуха, например, при бурении бесклапанными пневмоударниками высокого давления фирмы *Atlas Copco* типа *Cop* до значений 2–2,5 МПа приводит к значительному росту механической скорости, предельные значения которой не установлены.

Более высокая скорость бурения достигается в более твердых гранитах в сравнении с существенно менее твердым известняком.

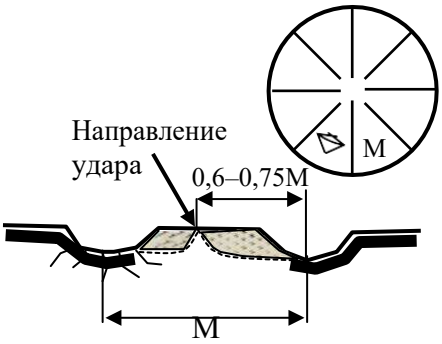


Рис. 1.71. Схема поражения забоя при ударно-вращательном бурении.

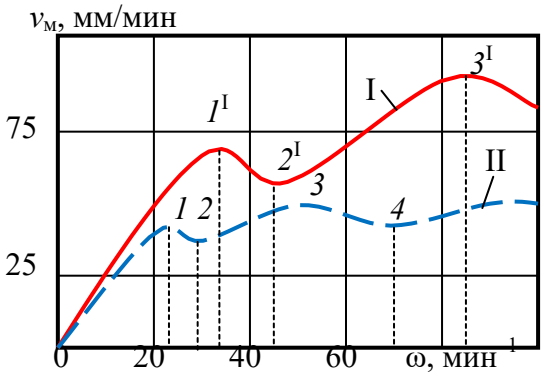


Рис. 1.72. Зависимость механической скорости бурения от частоты вращения:
I – известняк VII категории по буримости; II – кварцит X категории по буримости

Пневмоударники типа *Cop* 32, *Cop* 42, *Cop* 52, *Cop* 62 предназначены для бурения скважин диаметром 85–165 мм, в том числе по технологиям *OD*, *ODEX* и *DEPS*.

OD, ODEX, *DEPS* – системы ударно-вращательного бурения по валунно-галечникам с одновременным креплением ствола скважины обсадной колонной компании *Atlas Copco*:

OD(over drilling) – погружной пневмоударник инициирует удары как по вращаемой обсадной колонне с породоразрушающим башмаком, так и внутренней бурильной колонне;

ODEX (over drilling excentrics) – усовершенствованная система *OD*, в которой происходит бурение расширенного ствола скважины специальным эксцентричным долотом и одновременное его крепление обсадной колонной;

DEPS – удары по обсадной и бурильной колонне наносятся двумя различными пневмоударниками, что удваивает ударную мощь системы и позволяет бурить более глубокие скважины.

Забойные ударные машины *Cop* 32 работают при давлении воздуха 0,6–1,2 МПа с частотой 1 300–1 650 ударов в минуту и предназначены для бурения скважин диаметром 85–100 мм. Пневмоударники *Cop* 42 работают при давлении 0,6–2,5 МПа с частотой ударов 1300–2100 ударов в минуту и предназначены для бурения скважин диаметром 105–125 мм.

В настоящее время ударно-вращательное бурение пневмоударниками высокого давления является наиболее производительным из всех существующих механических способов бурения.

Этот способ бурения становится все более популярным при выполнении геологоразведочных работ, что объясняется его более низкой стоимостью. В то же время шламовая проба не может по качеству быть сопоставима с керном, но в настоящее время техника бурения и техническое оснащение методов оценки пробы достаточно усовершенствованы и соответствуют требованиям геологической службы.

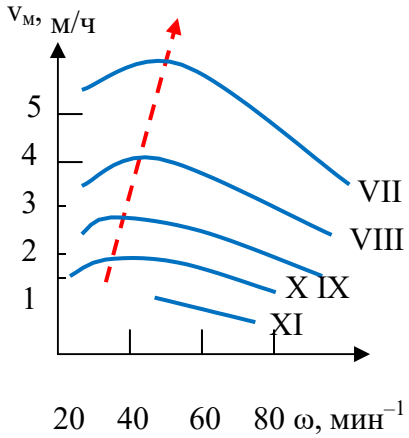


Рис. 1.73. Зависимость скорости бурения от частоты вращения снаряда в породах различной категории по буримости долотами с поперечно-радиальным расположением вставок на торце.

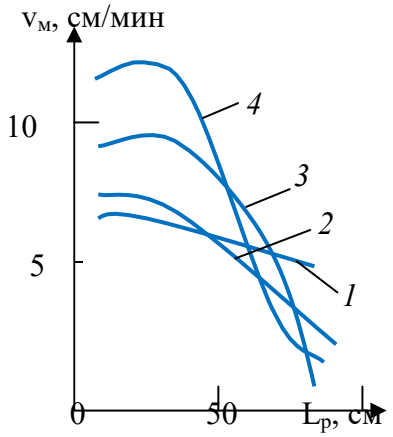


Рис. 1.74. Зависимость скорости бурения от длины рейса при частоте вращения снаряда 40 мин$^{-1}$ и различных осевых нагрузках: *1*, *2*, *3*, *4* – осевая нагрузка 5, 10, 15 и 20 кН соответственно.

На сегодняшний день в таких станах, как США, ЮАР, Австралия, в силу сложившихся тенденций значительная часть скважин бурится с опробованием, которое основывается на комбинированном варианте: до рудной зоны бурение ведется с обратной циркуляцией очистного агента с отбором шламовой пробы, а по рудной зоне производится отбор керна.

Таким образом, ударно-вращательное бурение получает все большее распространение при проведении геологоразведочных работ, появляются новые мощные забойные машины и инструменты, совершенствуется технология бурения и методика опробования по шламу.

С повышением глубины скважины вследствие увеличения сопротивлений и давления воздуха скорость бурения снижается. Например, при повышении глубины скважины от 100 до 200 м скорость бурения снизилась на 35 %. Поэтому с глубиной снижается производительность бурения пневмоударниками, наблюдается намокание шлама и образование сальников, осложнены условия опробования вследствие влияния подземных вод.

При этом важно подчеркнуть, что эффективность пневмоударного бурения в слабообводненных породах снижается, если используется низкое давление воздуха в пределах 0,3–0,5 МПа. При бурении пневмоударниками высокого давления подобные проблемы могут возникнуть только при значительной (более 500 м) глубине скважин в связи со снижением давления подаваемого воздуха вследствие роста аэродинамических сопротивлений с глубиной скважины, что ведет к ухудшению выноса шлама, образованию сальников и осложнениям при подъеме инструмента.

Одним из средств борьбы с осложнениями в этих условиях является применение воздуха с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ).

В то же время известно, что применение смеси воздуха и ПАВ дает снижение механической скорости бурения вследствие падения ударной мощности забойной машины. Например, при расходе ПАВ в пределах 5–6 л/мин с изменением концентрации в растворе от 0,5 до 4 % скорость бурения понижается незначительно (в пределах 10 %), а при повышении концентрации ПАВ до 5 % и более ведет к снижению механической скорости на 25–35 %.

Других особенностей бурения с ПАВ, которые бы могли повлиять на выбор параметров режима бурения, в практике не отмечено.

1.7.5. Разрушение горных пород при ударном способе бурения

Ударный способ разрушения горных пород относится к наиболее древним. В настоящее время он реализуется при проведении геологоразведочных работ как ударно-канатный и ударно-забивной. Ударно-канатный способ бурения чаще всего применяют при разведочных работах на россыпных месторождениях, а ударно-забивной – при бурении всухую рыхлых и мягких пород с целью получения качественной пробы.

Различают также ударно-штанговое бурение, которое вместе с ударно-канатным относится к ударно-поворотному способу бурения.

Породоразрушающие инструменты, применяемые при ударно-канатном бурении имеют клиновидную форму рабочей торцевой поверхности (рис. 1.75, *а*, *б*, *в*). Основными элементами таких долот являются лезвие *1*, щеки *2*, корпус *3* и резьбовая головка *4* для присоединения к буровому снаряду.

Лезвие долота имеет следующие параметры:

- угол приострения α;

- длину, которая определяет диаметр скважины;

- форму, которая может быть плоской (рис. 1.75, *а*), вогнутой (рис. 1.75.*б*) или дугообразной (рис. 1.75, *в*).

У долот может быть различным и количество лезвий: у плоских долот одно лезвие,

крестовых – два пересекающихся лезвия, двутавровых – одно основное и два дополнительных по краям и др.

Усилия, разрушающие породу при ударном бурении, носят динамический характер, а разрушение происходит за счет дробления, смятия и скалывания породы.

При внедрении лезвия долота в твердую хрупкую породу под его торцом она дробится, а разрушенная вытесняется из под торца долота. Разрушение породы определяется влиянием ряда факторов, таких как сила удара $P_д$, количество ударов m, наносимых по забою, величина угла поворота долота после каждого удара.

Внедрение бурового инструмента в породу сопровождается образованием четырех зон разрушения (рис. 1.76) [26]. Величина и соотношение этих зон зависят от свойств породы, определяющих ее способность разрушаться под действием ударного импульса, формы лезвий долота и их числа, величины ударного импульса и др.

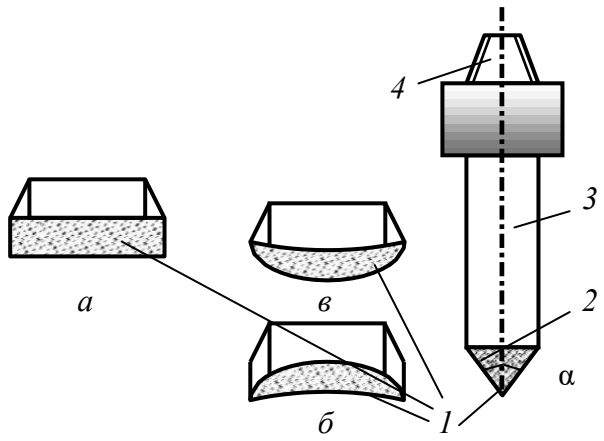


Рис. 1.75. Долото для ударного бурения:
а – плоское; *б* – вогнутое; *в* – дугообразное

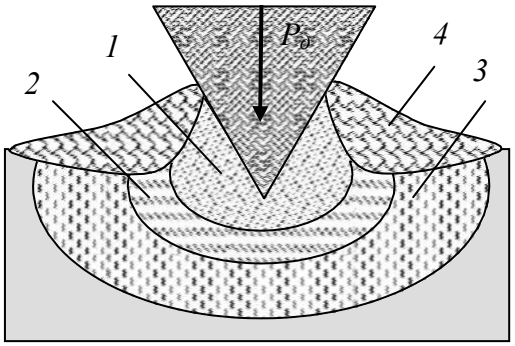


Рис. 1.76. Схема внедрения бурового инструмента в породу:
1 – зона дробления; *2* – зона разрушения; *3* – зона трещинообразования; *4* – зона скола.

1.8. Взрывное разрушение

1.8.1. Понятие о взрыве

Взрывные работы широко применяют в геологоразведочном деле и при добыче полезных ископаемых. Взрывным способом создают котлованы, дамбы, плотины, дороги и другие сооружения, при которых применяют взрывы на сброс или выброс. Особое место занимают взрывные работы при проведении горноразведочных работ.

В геологоразведке взрывные работы применяют при сейсморазведке для возбуждения упругих волн, по скорости распространения которых определяют свойства горных пород, выделяют геологические структуры и наличие залежей углеводородов и других полезных ископаемых.

Взрывным способом ликвидируют аварии при бурении скважин, повышают дебит газа и нефти за счет увеличения трещиноватости пластов. Взрывные работы используют при тушении пожаров.

При проведении горноразведочных горных выработок взрыванием обеспечивается формирование канав и разрушение породы (отбойка) в забое горной выработки.

Технология разрушения горных пород взрывом существенно усовершенствовалась при появлении короткозамедленного взрывания.

Взрывные работы характеризуются высокой производительностью и экономичностью, поэтому они нашли широкое применение при проведении горно-разведочных выработок, особенно для разрушения твердых горных пород.

Впервые задача физической сущности взрыва была исследована М. В. Ломоносовым, в работе «О природе и рождении селитры» в 1748 г. Им дано определение взрыва как очень быстрого выделения значительного количества энергии и большого объема газов.

В современной интерпретации *взрыв – процесс сверхзвукового физического или химического превращения взрывчатого вещества за счет прохождения по нему детонационной волны, сопровождающейся переходом потенциальной энергии этого вещества или продуктов его превращения в кинетическую*.

Взрывчатым веществом называют смеси и химические соединения, способные под влиянием внешнего воздействия (нагрева, удара, трения) взрываться, т. е. чрезвычайно быстро превращаться в другие соединения с образованием большого количества тепла и газов.

Таким образом, взрыв, взрывчатое превращение – это быстро протекающая в веществе химическая реакция, сопровождающаяся образованием большого количества газов и значительным выделением тепла, в результате чего газы нагреваются до высокой температуры, а в месте нахождения взрывчатого вещества развивается высокое давление. Взрывчатое вещество применяют в зарядах, под которыми понимают определенную массу вещества, подготовленную к взрыву.

Скорость взрывчатого разложения внутри заряда взрывчатого вещества может быть разной и в значительной степени определяет разрушительное действие взрыва на окружающую среду.

По характеру воздействия на горную породу взрывчатые вещества делятся на две группы:

- бризантные;
- метательные (пороха).

Среди бризантных взрывчатых веществ в особую группу выделяют обладающие высокой чувствительностью инициирующие вещества, которые применяют в качестве средств инициирования (детонаторы).

Промышленные взрывчатые вещества предназначаются для дробления, разрушения и перемещения горных пород.

Существуют три формы химических превращений взрывчатых веществ:

- медленное химическое превращение;
- горение;
- детонация.

Медленное химическое превращение протекает при низких температурах по всему объему вещества.

При горении передача тепла от слоя к слою происходит в результате теплопроводности. Скорость горения может быть от долей сантиметра до десятков метров в секунду.

Взрыв, распространяющийся с постоянной и высокой скоростью, называют детонацией. При детонации энергия по заряду взрывчатого вещества распространяется со скоростью 2–8 тысяч в секунду.

Быстрое химическое и физическое превращение вещества, сопровождается мгновенным переходом потенциальной энергии в тепловую, резким повышением давления на окружающую среду и звуковым эффектом. По своей природе взрывы делятся на:

- физические, которые приводят только к физическим преобразованиям веществ, например беспламенное взрывание с помощью сжатого воздуха;

- химические, при которых наблюдаются быстрые химические реакции с выделением тепла;

- ядерные, в основе которых реакции деления ядер вещества с образованием новых элементов.

При взрывных работах на горных предприятиях применяют химические взрывы.

Физическая сущность детонации. Ударная волна характеризуется резким скачкообразным изменением параметров вещества – давления, плотности, температуры и скорости. Поэтому детонационная волна от ударной отличается тем, что за фронтом ударной волны идет зона химической реакции, где выделяется энергия взрывчатого превращения, часть которой расходуется на поддержание устойчивого распространения детонации.

Промежуточным между горением и детонацией является взрывное горение, которое от основных форм отличается непостоянством скорости. Формы взрывчатого превращения в зависимости от условий могут переходить одна в другую (горение в детонацию и наоборот). Порохам присуще сравнительно медленное разложение в форме горения, поэтому они оказывают на внешнюю среду преимущественно метательное действие.

Ударная волна, проходящая по взрывчатому веществу, сжимает и разогревает его, вызывая химическую реакцию. Реакция сопровождается выделением большого количества тепла, которое трансформируется в энергию сжатых газов и передается в головную ударную волну, компенсируя потери ее энергии на сжатие вещества (рис. 1.77).

При этом начинается химическая реакция и давление достигает максимального значения p_{max} при объеме V_{min}. Реакция развивается с выделением тепла и расширением продуктов взрыва, давление при этом падает, а объем увеличивается. Заканчивается реакция в точке *N* на ударной диабате продуктов взрыва, называемой точкой Чепмена–Жуге, с параметрами $p_ж$ и $V_ж$. При этом прямая 2 соединяет параметры состояния исходного вещества с параметрами всплеска в состоянии максимального сжатия и завершения реакции.

Вещество в детонационной волне последовательно проходит все состояния по прямой *ANM*. Участок *AN* соответствует зоне сжатия в ударной волне, участок *NM* – зоне химических реакций.

По гидродинамической теории детонации взрывчатое вещество характеризуется ударной адиабатой *1*, а конечные продукты – адиабатой *3*. Продолжительность химической реакции в детонационной волне составляет 10^{-6}–10^{-7} с.

Скорость детонации $\Omega_д$, скорость движения продуктов взрыва $\Omega_п$ и скорость звука в продуктах взрыва *C* связаны соотношением $\Omega_д = \Omega_п + C$.

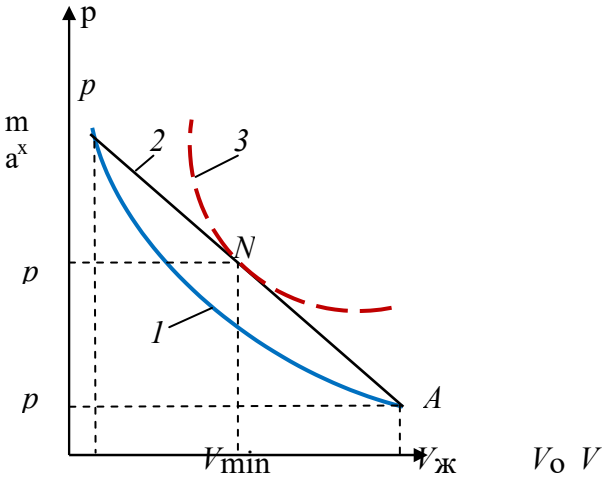


Рис. 1.77. Изменение состояния взрывчатого вещества в детонационной волне

1.8.2.Механизм разрушения пород взрывом

В результате взрывного разрушения за счет высокой скорости приложения нагрузки и деформирования среды образуется множество трещин в отличие от статического разрушения, для которого характерно образование единичных трещин.

В безграничной среде, где влияние свободной поверхности мало, взрывное разрушение протекает двустадийно.

Первичное разрушение происходит на динамическом фронте дробления – поверхности, где достигается предельное упругое состояние среды и образуются макротрещины по двум механизмам: сколом – при достижении предельных сдвиговых напряжений (в ближней к центру взрыва зоне, где напряжения сжимающие), отрывом – при достижении прочности на отрыв (в дальней зоне, где действуют растягивающие напряжения). Преобладающая масса среды на фронте дробления разрушается отрывом, так как прочность на сдвиг в хрупких средах и горных породах значительно превосходит прочность на отрыв. В результате образуется зона радиальныхтрещин.

Вторичное разрушение протекает при последующем сдвиговом деформировании нарушенной среды. Оно преобладает около взрывной полости, где деформации имеют наибольшее значение, являются основной причиной переизмельчения среды и бесполезных тепловых потерь энергии, обусловленных внутренним трением в разрушенной среде. Трещины при вторичном взрывном разрушении ориентированы беспорядочно. Это так называемая зона дробления. Влияние вторичного дробления растет с деформацией, поэтому его наибольший вклад будет в случае сильного взрыва (ядерного), когда степень деформирования существенно возрастает по сравнению с химическим взрывчатым веществом.

Размер зоны дробления R существенно зависит от интенсивности взрывного источника. Если начальное давление продуктов взрыва близко к прочности на сжатие, зона дробления может вообще отсутствовать. В этом случае преобладает разрушение отрывом, а зона радиальных трещин начинается от взрывной полости.

При взрыве вблизи свободной поверхности массива описанный механизм разрушения дополняется отколом – разрушением путем отрыва под действием растягивающих радиальных напряжений, возникающих при отражении взрывной волны от свободной поверхности (рис. 1.78). При откole трещины ориентированы в основном параллельно свободной поверхности. Максимальная глубина зоны откольного разрушения не превышает половины длины фазы сжимающих напряжений взрывной волны.

Качество взрывного разрушения характеризуется распределением кусков по размеру. При взрыве в однородной среде (без начальной трещиноватости) установлена чёткая корреляция между механизмом разрушения и гранулометрическим составом разрушенной среды. Первичное разрушение приводит к образованию в горной массе примерно равного количества кусков различного размера, при вторичном разрушении большая часть кусков имеет приблизительно одинаковый размер.

В реальных горных породах всегда существуют дефекты (неоднородности) различного масштаба – от естественной трещиноватости массива до дислокаций в зернах минералов, которые приводят к зарождению трещин и определяют гранулометрический состав разрушенной взрывом горной породы. Преимущественное влияние тех или иных неоднородностей зависит от величины действующих напряжений и проявляется дифференцированно в зависимости от расстояния от центра взрыва и интенсивности взрывного источника. Около взрывной полости, где действуют максимальные напяжения, разрушению могут подвергаться даже самые прочные минералы, входящие в горную породу. Наибольшее влияние на формирование гранулометрического состава оказывают макро- и микротрещиноватость и слоистость.

Например, при слабом взрыве в породе с чётко выраженной блочной структурой

гранулометрический состав определяется в основном начальной системой трещин. На взрывное разрушение, т. е. на создание новых поверхностей в массиве, расходуется около 1 % от всей энергии взрыва.

Если взрыв производят в слоистых породах в направлении, перпендикулярно слоям, то сдвиг породы происходит вдоль слоев, а отрыв перпендикулярном к слоям. Так как предел прочности на сдвиг будет минимален в направлении вдоль слоев, то минимальная энергоемкость разрушения будет тогда, когда сдвиг происходит вдоль слоистости.

Управление разрушающим действием взрыва состоит в возможном регулировании среднего размера куска и набора фракций. С этой целью применяют короткозамедленное и буферное взрывание.

Для разрушения горных пород взрывом в практике геологоразведочных работ используют шпуровые, скважинные, котловые, камерные и накладные заряды.

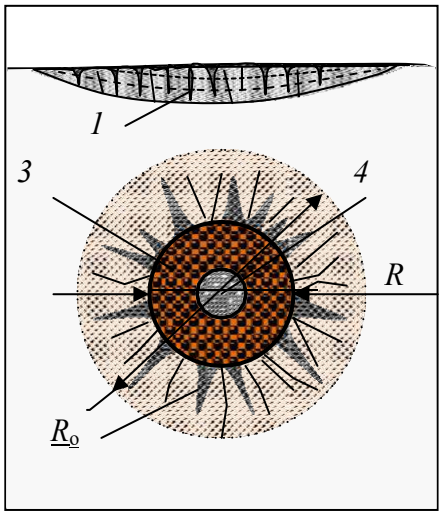


Рис. 1.78. Схема зон взрывного разрушения: *1* – откольного; *2* – радиальных трещин; *3* – дробления; *4* – полость.

Шпуровые заряды выполняют размещением взрывчатого вещества в шпуре (рис. 1.79.). Длина заряда может составлять до 2–3 м при диаметре 32 или 40 мм. Шпур заполняется на ⅔–¾ длины взрывчатым веществом – патронированным или россыпным *1*, а остальная часть забойкой *2* (специальной пробкой или породой). Инициирование взрыва осуществляют при помощи средств взрывания – электродетонаторов *3*, соединяемых в схему электропроводом *4*.

Для взрывания одиночных зарядов или группы из нескольких зарядов могут применяться огнепроводные шнуры, капсюля-детонаторы и детонирующие шнуры.

В большинстве случаев донные части шпуров после взрывания остаются неразрушенными. Эти части носят название «стаканов», а отношение полезно используемой длины шпура к его полной длине называется коэффициентом использования шпура (КИШ). Величина этого коэффициента составляет 0,8–0,9.

Для повышения коэффициента полезного действия взрыва (КИШ) следует использовать наиболее плотную забойку шпура, а также инициировать взрыв в направлении от дна шпура (обратная схема инициирования), рис. 1.79.

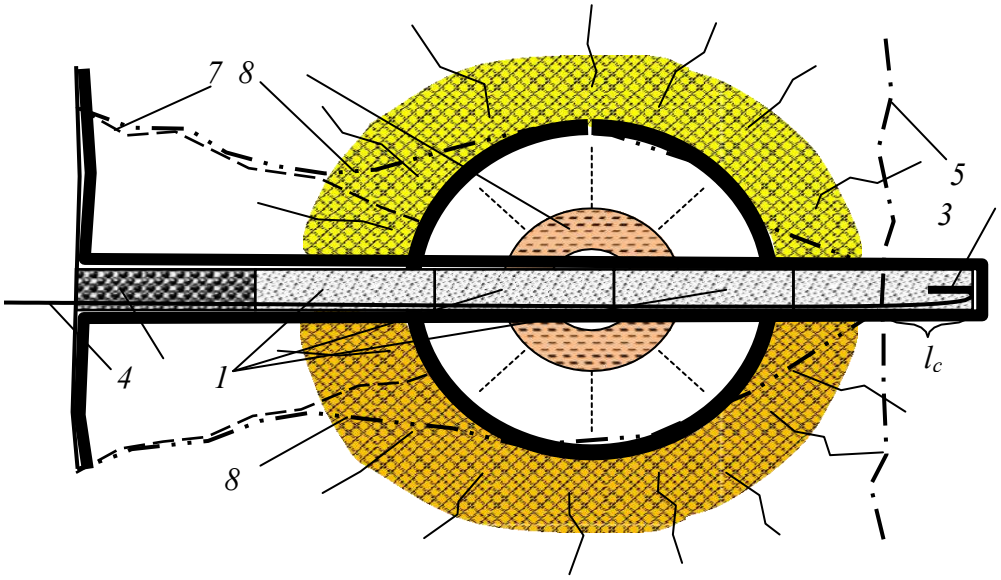


Рис. 1.79. Схема шпурового заряда и его действия при отбойке породы в забое горной выработки: *1* – патроны взрывчатого вещества; *2* – забойка шпура; *3* – электородетонатор; *4* – провод для соединения электродетонаторов; *5* – линия отрыва породы при взрыве группы шпуров в забое выработки; *6* – центр взрыва с расходящимися от центра зонами раздробленной и разбитой трещинами породы; *7* – линия отрыва породы; *8* – линия разрушенной породы в случае взрывания одного заряда; l_c – длина «стакана».

Действие взрыва приводит к дроблению и распространению трещин в породе в направлении от центра взрыва *6*. Направление действия взрыва определяется наличием свободной поверхности, к которой распространяются трещины отрыва *7*. При взрыве одного заряда образуется достаточно узкая полость, контур которой примерно соответствует линии *8*. Взрыв всех шпуров, входящих в систему отбойки породы, приводит к отделению породы по линии *5*.

Шпуровые заряды позволяют производить сравнительно равномерное дробление породы и применяются в самых разнообразных горно- геологических условиях.

Метод скважинных зарядов заключается в том, что во взрываемой породе бурят скважину (глубина более 5 м и диаметр более 75 мм), в которую помещают удлиненные заряды. Этот метод применяют при выполнении взрывных работ на карьерах, когда глубина шпуров недостаточна для размещения нужного количества взрывчатого вещества или если требуется получить большое количество равномерно раздробленной породы. При заряжании скважины для повышения эффективности взрыва более мощные взрывчатые вещества, если применяют взрывчатку различных сортов, рекомендуется помещать в нижней части скважины.

Метод котловых зарядов состоит в том, что шпур или скважину над забоем путем многократного взрывания в них небольших зарядов взрывчатых веществ расширяют до образования камеры, близкой по форме к шару. В эту камеру (котел) после очистки ее от разрушенной породы помещают расчетный заряд взрывчатого вещества для основного взрывания. Операции по получению котлов называют простреливанием шпуров или скважин, а шпур или скважину с котлом в призабойной части – котловым шпуром или котловой скважиной.

Метод котловых зарядов применяется тогда, когда расчетный заряд при заданных глубине шпура или скважины не может поместиться в шпуре или скважине и в тех случаях, если линия сопротивления породы (расстояние от центра заряда до поверхности)

настолько велика, что заряд взрывчатого вещества не в состоянии его преодолеть без концентрации заданного объема взрывчатки.

Метод камерных зарядов заключается в том, что отбойка породы производится путем взрывания сосредоточенных зарядов большой величины (до нескольких десятков и даже сотен тонн), которые помещают в специальные горные выработки, называемые зарядными камерами или просто камерами.

Накладные заряды применяют для разрушения крупных обломков, глыб, больших камней путем наложения взрывчатого вещества непосредственно на объект.

Кроме перечисленных методов взрывания различают еще взрывание на выброс, сброс и др.

Наиболее часто при проведении горноразведочных выработок для разрушения породы применяют шпуровые заряды. Принятые схемы расположения шпуров в забое должны обеспечить отрыв породы в забое выработки в соответствии с ее проектным контуром, а также равномерное дробление породы.

Эффективность буровзрывных работ зависит от количества и схемы расположения шпуров в забое. По назначению шпуры делятся на врубовые, вспомогательные, оконтуривающие.

Врубовые шпуры предназначены для предварительного образования вруба (углубления) с целью создания дополнительных плоскостей обнажения в массиве породы в пределах контура выработки. Врубовые шпуры взрываются первыми, создавая поверхность обнажения, в направлении которой отбивают породу вспомогательные, а затем и оконтуривающие шпуры. Вспомогательные шпуры служат для расширения выемки, образованной при взрывании врубовых шпуров. Применяются вспомогательные шпуры при проходке выработок большого поперечного сечения.

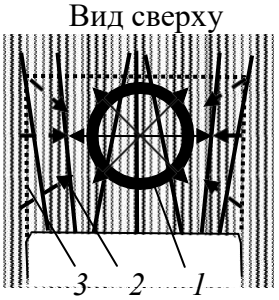


Рис. 1.80. Схема расположения шпуров с центральным клиновым врубом (шпуры *1–6*): *1* – очаг взрыва врубовых шпуров; *2* – направление отбойки породы при взрыве оконтуривающих шпуров; *3* – контур отбитой, в результате взрывания шпуров, породы.

Оконтуривающие шпуры служат клиновым врубом, форма которого и расположение заданы с учетом условий залегания горных пород и отбойки породы до пределов проектного контура сечения выработки. Поэтому располагаются они по периметру выработки и взрываются с задержкой последними.

Схема расположения шпуров с центральным клиновым врубом (рис. 1.80) применяется при вертикальной слоистости горных пород, когдаслои совпадают с направлением продвижения горной выработки или в случае разрушения равномернозернистой породы. Для образования клинового вруба бурят четное количество врубовых шпуров, которые располагают в двух вертикальных плоскостях, направленных под углом к центру выработки.

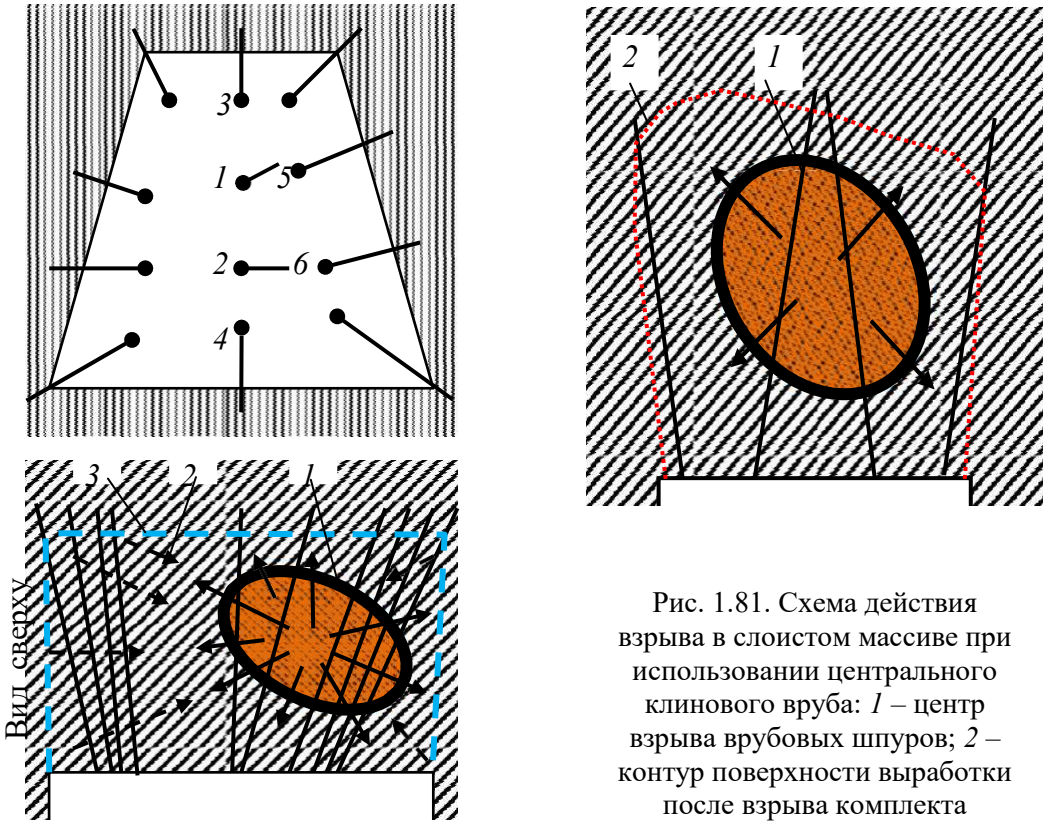


Рис. 1.81. Схема действия взрыва в слоистом массиве при использовании центрального клинового вруба: *1* – центр взрыва врубовых шпуров; *2* – контур поверхности выработки после взрыва комплекта шпуров.

При взрывании шпуров первыми приводят в действие врубовые шпуры, взрыв которых создает полость в центральной части массива породы *1* (рис. 1.81). Вслед за врубовыми шпурами с замедлением 0,1–0,2 сек. производят взрывание вспомогательных и оконтуривающих шпуров. При взрыве оконтуривающих шпуров порода отбивается в направлении центра взрыва врубовых шпуров *2*. В результате взрывания всего комплекта шпуров образуется новая поверхность горной выработки *3*.

В ряде случаев после взрывания врубовых шпуров и замедления взрывают вспомогательные шпуры и только после очередного микрозамедления – оконтуривающие. Последняя схема применяется в случае проходки горных выработок большого сечения.

В случае если при вертикальном расположении слоев горной породы они пересекают выработку под углом со стороны правой стенки, вруб направляется в сторону правой же стенки выработки, т. е. в направлении слоев горных пород. Данная схема расположения вруба позволяет направить энергию взрыва в массив породы с наибольшей прочностью, поскольку порода в этом случае более деформируема, активнее разрушается вкрест слоистости и менее податлива в направлении слоев.

Отмеченная закономерность предопределена анизотропией механических свойств слоистых горных пород, в которых деформации и разрушающие напряжения развиваются неравномерно, а преимущественно в направлении минимальной прочности.

При смещении врубовых шпуров от оси выработки вправо центр взрыва врубовых шпуров *1* смещается от оси выработки также вправо, а взрывание оконтуривающих шпуров с замедлением позволит добиться более равномерного и полного разрушения массива породы перед выработкой и создания новой поверхности выработки в соответствии с проектным контуром *3*.

При симметричном же расположении шпуров горная порода со стороны, совпадающей с направлением слоев, будет разрушаться не в полной мере, а с противоположной стороны более интенсивно. В результате не будет сохранено прямолинейное проектное направление горной выработки и нарушена форма ее поперечного сечения.

2. БУРОВОЙ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

2.1. Буровые коронки твердосплавные

Буровые коронки являются важнейшей частью бурового оборудования. По характеру рабочей поверхности они делятся на 2 типа: твердосплавные и алмазные. Они используются для вращательного бурения скважин сравнительно небольшого диаметра, например:

- геологоразведочных;
- взрывных;
- шпуров и т.д.

Коронки твердосплавные внешне представляют собой короткий цилиндр с твердосплавными пластинами с одной стороны и резьбой – с другой. Сама коронка изготавливается из стали, а пластины и специального высокопрочного сплава. Каждая коронка рассчитана на бурение породы определенной категории. Очистка забоя в большинстве случаев осуществляется с помощью промывочной жидкости.

Рис. 2.1. Коронка твердосплавная КТ-2 Ǿ 112.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 108 мм.

Рис.2.2. Коронка твердосплавная КТ-2 Ǿ 132.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 127 мм.

Рис.2.3. Коронка твердосплавная КТ-2 Ǿ 151.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 146 мм.

Рис. 2.4. Коронка твердосплавная КТ-2 Ǿ 172.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 168 мм.

Рис. 2.5. Коронка твердосплавная КТ-2 Ǿ 76.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 73 мм.

Рис.2.6. Коронка твердосплавная КТ-2 Ǿ 93.

Применяется при бурении мало абразивных пород V-VI категорий. Слабые песчаники, гипсы, песчаные сланцы, известняки, мягкие сульфиды без кварца, каменные соли, аргиллиты, мягкие сланцы и т.д. Диаметр колонковой трубы 89 мм.

Рис. 2.7. Коронка твердосплавная М-5 Ǿ 112.

Применяется при бурении мягких пород до IV категории. Глины, слабосцементированные песчаники, гипсы, ангидриды, глинистые сланцы с прослоями валунно-галечных отложений. .Диаметр колонковой трубы 89мм.

Рис.2.8. Коронка твердосплавная СА-4 Ǿ 112.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 108мм.

Рис.2.9. Коронка твердосплавная СА-4 Ǿ 132.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 127 мм.

Рис. 2.10. Коронка твердосплавная СА-4 Ǿ 151.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 146 мм.

Рис. 2.11. Коронка твердосплавная СА-4 Ǿ 76.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 73 мм.

Рис. 2.12. Коронка твердосплавная СА-4 Ǿ 93.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород VI-VIII категорий. Габбро, пироксениты, порфириты, диориты, дациты, диопсидомагнетитовые и гранатовые скарны. Диаметр колонковой трубы 89 мм.

Рис. 2.13. Коронка твердосплавная СА-6 Ǿ 112.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Диаметр колонковой трубы 108 мм.

Рис. 2.14. Коронка твердосплавная СА-6 Ǿ 132.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириты, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 127 мм.

Рис. 2.15. Коронка твердосплавная СА-6 Ǿ 151.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириты, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 146 мм.

Рис.2. 16. Коронка твердосплавная СА-6 Ǿ 59.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириты, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 57 мм.

Рис. 2.17. Коронка твердосплавная СА-6 Ǿ 76.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириты, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 73 мм.

Рис.2. 18. Коронка твердосплавная СА-6 Ǿ 93.

Применяется при бурении абразивных пород VI-VIII категорий. Песчаники, алевролиты, габбро, диориты, порфириты, окварцованные известняки. Диаметр колонковой трубы 89 мм.

Рис.2. 19. Коронка твердосплавная СМ-5 Ǿ 112.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 108 мм.

Рис. 2.20. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 132.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 127 мм.

Рис.2. 21. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 59.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 57 мм.

Рис. 2.22. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 93.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 89 мм.

Рис. 2.23. Коронка твердосплавная СМ-5 Ø 76.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, глинистые и песчаные сланцы, серпентиниты. Диаметр колонковой трубы 73 мм.

Рис. 2.24. Коронка твердосплавная СМ-6 Ǿ 151.

Применяется при бурении абразивных, монолитных, слаботрещиноватых пород V-VI категорий. Доломиты, известняки, серпентиниты, перидотиты. Диаметр колонковой трубы 146 мм.

Рис.2. 25. Резец РП-3 У 33.00.00.000.

Зуб бара предназначен для усиления твердосплавного вооружения при обсаживании скважины.

2.2. Коронки алмазные импрегнированные

Импригнированные алмазные коронки предназначены для бурения пород V111-X11 категорий и характеризуются равномерным распределением по всему объему матриц относительно мелких природных или синтетических алмазов. Подобное строение импрегнированной коронки обеспечивает ее эффективность при бурении по твердым продам.

Рис.2.26. Алмазная коронка 02ИЗ, 02И4.

Категория буримости порд V111- X11, малообразивные, очень крепкие, плотные монолитные, тонкозернистые, скрытокристаллические, абразивные, мелко- и скрыто-зернистые. Диаметр бурения 36, 46, 59, 76, 93 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис.2.27. Импригнированная буровая коронка 08ИЗ.

Категория буримости порд 1Х-Х1, мало- и среднеобразивные, очень крепкие, плотные монолитные, тонкозернистые, скрытокристаллические, абразивные, мелко- и скрыто-зернистые. Диаметр бурения 46 мм. Бурение бескерновое многозабойное.

Рис. 2. 28. Импригнированная буровая коронка БИТ.

Категория буримости порд V11-X, монолитные и среднетрещиноватые. Диаметр бурения 59, 76, 93, 112, 132 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.29. Импригнированная буровая коронка К-01-3.

Категория буримости порд Х-Х1, монолитные, слабо-трещиноватые, мало-абразивные и абразивные. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.

Рис. 2.30. Импригнированная буровая коронка К- 08.

Категория буримости порд V111-X, плотные, средне-трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.

Рис. 2.31. Импригнированная буровая коронка К-09И2Г.

Категория буримости порд 1X-X1, плотные, средне-трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.

Рис. 2.32. Импригнированная буровая коронка 17ИЗ.

Категория буримости порд V11-X1, монолитные, плотные, среднетрещиноватые, мало- и среднеабразивные. Диаметр бурения 76 мм. Бурение с отбором керна с комплексом КССК-76.

Рис. 2.33. Импригнированная буровая коронка БИТ ССК 59.

Категория буримости порд V11-X, монолитные и среднетрещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК-59.

Рис. 2.34. Импригнированная буровая коронка 21М3.

Категория буримости порд 1Х-Х1, твердые. Диаметр бурения 46, 59,76, 93, 112, 136, 172, 222 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.35. Импригнированная буровая коронка 23И3.

Категория буримости порд V111-1Х, средне-твердые, твердые, слабо-абразивные и частично трещиноватые. Диаметр бурения 59,6; 75,3; 95,6; 122 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК.

Рис. 2.36. Импригнированная буровая коронка 27И3.

Категория буримости порд V111-1Х, средне-твердые, твердые, слабо-абразивные и частично трещиноватые. Диаметр бурения 59,6; 76 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК.

Рис. 2.37. Импригнированная буровая коронка 28И3.

Категория буримости порд V111-1Х, средне-твердые, слабо-абразивные и частично трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59, 76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.38. Импрегнированная буровая коронка 28И4.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 46, 59, 76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.39. Импрегнированная буровая коронка 26И.

Категория буримости порд V11-Х11, абразивные и трещиноватые. Диаметр бурения 75,3/60,2; 91,8/76; 95,6/76; 117,5/100; 143,5/123,8 мм. Для забуривания или при установке обсадных труб.

Рис. 2. 40. Импрегнированная буровая коронка 28И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 46/31; 59/42; 76/58; 93/73; 112/92;151/132 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.41. Импригнированная буровая коронка 29И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/85 мм. Бурение с отбором керна с комплексом ССК.

Рис. 2.42. Импригнированная буровая коронка 30И.

Категория буримости порд 1Х-Х1, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 75,3 мм. Бурение сплошным забоем с комплексом ССК.

Рис. 2.43. Импригнированная буровая коронка 32И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 75,3/47; 95.,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.44. Импригнированная буровая коронка 33И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности . Диаметр бурения 46/31,7 66,8/50,4; 76/57; 76/57,5; 76/61,7; 56/45,2 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.45. Импригнированная буровая коронка 36И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, средней твердости до твердых, слабо абразивные, частично трещиноватые. Диаметр бурения 46/31,7 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.46. Импригнированная буровая коронка 37И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, для крепких и очень крепких пород незначительно разрушенных. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.47. Импригнированная буровая коронка 38И.

Категория буримости порд Х-Х1, для сложных горно-геологических условий, сильно раздробленные или трещиноватые породы. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122 / 85 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.48. Импригнированная буровая коронка 34И КЛМ.

Категория буримости порд V11-Х1, для монолитных, слаботрещиноватых и трещиноватых пород. Диаметр бурения 75,3/40 мм. Бурение с обратной промывкой, гидротранспортом керна с комплексом ССК-NK.

Рис. 2.49. Импригнированная буровая коронка 23И.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95.6/63.5; 122/85 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.50. Импригнированная буровая коронка 27И.

Категория буримости порд V11-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 46,5/30,3; 56,5/39; 59.6/42; 75.3/56 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.51. Импригнированная буровая коронка К04 КП.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 76/48 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.52. Импригнированная буровая коронка К04.

Категория буримости порд 1Х-Х11, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 59/35,4;76 /48 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.53. Импригнированная буровая коронка К-01-3.

Категория буримости порд V111-X1, монолитные, слабо трещиноватые и трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

2.3. Коронки алмазные однослойные

Алмазы в однослойных коронках располагаются в верхнем слое матрицы. Используются крупные природные и синтетические алмазы, которые обеспечивают высокую скорость проходки и высокую эффективность буровых работ. Алмазы в однослойных коронках располагают по определенной схеме, которая меняется в зависимости от размеров используемых алмазов, что в значительной мере определяет ресурс коронки и скорость бурения.

Рис. 2.54. Однослойная буровая коронка 01А3, 01А4.

Категория буримости порд V11-1X, малообразивные, монолитные, трещиноватые. Диаметр бурения 36, 46, 59, 76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.55. Однослойная буровая коронка 08А3.

Категория буримости порд V11-1X, мало и средне абразивные. Диаметр бурения 46 мм. Бурение бескерновое многозабойное.

Рис. 2.56. Однослойная буровая коронка 09А3.

Категория буримости порд V11-1X, мало и средне абразивные. Диаметр бурения 59 мм. Бурение бескерновое многозабойное.

Рис. 2.57. Однослойная буровая коронка К16.

Категория буримости порд V1- V111, перемежающиеся. Диаметр бурения 76 мм. Бурение с отбором керна комплексом КССК-76.

Рис. 2.58 Однослойная буровая коронка К01.

Категория буримости порд V11- 1X, плотные слабо и средне трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК-59.

Рис. 2.59. Однослойная буровая коронка К01-1.

Категория буримости порд V11- 1X, плотные. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК-59.

Рис. 2.60. Однослойная буровая коронка К01-2.

Категория буримости порд V11- 1X, средне трещиноватые. Диаметр бурения 59 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК-59.

Рис. 2.61. Однослойная буровая коронка 01КС.

Категория буримости порд V-1X, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,76, 93, 112, 132, 151, 245/225 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.62. Однослойная буровая коронка 02КС.

Категория буримости порд V-1X, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,76, 93, 112, 132, 151 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.63. Однослойная буровая коронка 01А3СВ.

Категория буримости порд V111, монолитные и слабо трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59,76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.64. Однослойная буровая коронка 01А4СВ.

Категория буримости порд V111, монолитные и слабо трещиноватые. Диаметр бурения 46, 59,76, 93, 112 мм. Бурение с отбором керна одинарными колонковыми трубами.

Рис. 2.65. Однослойная буровая коронка 07КС.

Категория буримости порд V-1X, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/83 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.66. Однослойная буровая коронка 07КС2.

Категория буримости порд V-V111, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/83 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.67. Однослойная буровая коронка 07КС-0.

Категория буримости порд V-V111, абразивные, переслаивающиеся по твердости и абразивности. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5; 122/83 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.68. Однослойная буровая коронка К-06.

Категория буримости порд V11-1X, плотные, слабо и средне трещиноватые. Диаметр бурения 75,3; 95,6 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.69. Однослойная буровая коронка 07КС-2-0.

Категория буримости порд V11-1X, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.70. Однослойная буровая коронка 23А.

Категория буримости порд V111-X, малоабразивные, абразивные, плотные, монолитные, мелко и среднезернистые, трещиноватые. Диаметр бурения 59,6/36,4; 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.71. Однослойная буровая коронка 29А.

Категория буримости порд V111-1X, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 75,3/47,6; 95,6/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

Рис. 2.72. Однослойная буровая коронка 31А.

Категория буримости порд V111-X, различной твердости и абразивности. Диаметр бурения 93, 112 мм. Бурение сплошным зобоем.

Рис. 2.73 Однослойная буровая коронка ГБА.

Категория буримости порд V1-V111, абразивные горные породы. Диаметр бурения 215,9/100 мм. Бурение с отбором керна.

Рис. 2.74. Однослойная буровая коронка Б-1.

Категория буримости порд V1-1X, резко перемежающиеся горные породы. Диаметр бурения 117,5/63,5 мм. Бурение с отбором керна комплексом ССК.

2.4. Алмазные расширители

Алмазные расширители предназначены для поддержания заданного диаметра скважины. В буровом снаряде расширитель устанавливается между коронкой и колонковой трубой. Расширители заменяются, когда их диаметр становится меньше диаметра новой коронки. Поэтому только самая последняя часть калибруется при установке новой коронки. Алмазный расширитель помогает стабилизировать колонковую трубу. Выпускаются расширители для всех типов колонковых труб и коронок. В расширителях для армирования секторов применяются специально отобранные природные или синтетические алмазы.

Рис. 2.75. Алмазный расширитель РСА.

Категория буримости порд 1Х- Х, мало и средне абразивные. Диаметр бурения 46,4; 59,4; 76,4; 93,4 мм.

Рис. 2.76. Алмазный расширитель РСА-1.

Категория буримости порд V11 - Х, плотные, слабо и средне трещиноватые. Диаметр бурения 59,4 мм.

Рис. 2.77. Алмазный расширитель РЦК.

Категория буримости порд V1 - Х, плотные, малообразивные и средне трещиноватые. Диаметр бурения 76,4 мм.

Рис. 2.78. Алмазный расширитель РСА 23П.

Категория буримости порд V11–X11, твердые, очень твердые, средне абразивные и трещиноватые. Диаметр бурения 60; 75,7; 96 мм.

Рис. 2.79. Алмазный расширитель РСА 27П.

Категория буримости порд V11–X1, плотные и слабо трещиноватые. Диаметр бурения 60 мм.

Рис. 2.80. Алмазный расширитель РСН.

Категория буримости порд V11–X11, твердые, очень твердые, среднеабразивные и трещиноватые, плотные. Диаметр бурения 46,4; 59,4; 76,4; 93,4 мм.

Рис. 2.81. Алмазный расширитель РАС.

Категория буримости порд V11–X, плотные, малоабразивные и средне трещиноватые. Диаметр бурения 112,4; 136,7; 172,7 мм.

Рис. 2.82. Алмазный расширитель РСА 33.

Категория буримости порд V111–X1, монолитные, слаботрещиноватые и трещиноватые. Диаметр бурения 76,4 мм.

Рис. 2.83. Переходник центратор ПЦ.

Переходник центратор ПЦ служит для центрирования верхнего конца колонковой трубы в скважине с целью снижения искривления скважины и вибрации снаряда, а так же для снижения износа колонковой трубы. Служит для соединения бурильных труб с колонковой трубой или шламовой трубой. Диаметр бурения 59,6; 75,3; 96; 122,6 мм.

Рис. 2.84. Башмаки обсадных труб.

Башмаки обсадных труб применяются для забуривания или при установке обсадных труб в скважены. Изготавливаются стандартных и иных размеров.

2.5. Лопастные породоразрушающие инструменты

Лопастные породоразрушающие инструменты состоят из корпуса и лопастей (рис. 2.85.). В верхней части корпуса нарезается присоединительная резьба, а в нижней части просверливаются сквозные промывочные отверстия для подачи промывочной жидкости на забой. Боковые калибрующие и другие рабочие поверхности лопастей обычно покрывают релитом, чугуном или армируют порошкообразным карбидом вольфрама.

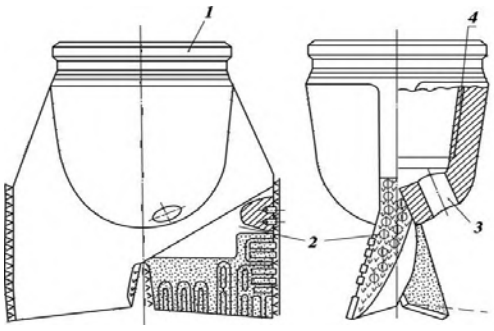


Рис. 2.85. Двухлопастное долото:
1 − корпус; 2 − лопасти; 3 − промывочные отверстия;
4− присоединительная резьба.

Лопастные долота выпускаются следующих пяти разновидностей:
2Л − двухлопастные;
3Л − трехлопастные (рис. 2.86.);
3ИР − трехлопастные истирающе-режущие;
6ИР − шестилопастные истирающе-режущие;
П − пикообразные (однолопастные).

Лопастные породоразрушающие инструменты в соответствии с их назначением производятся четырех типов: М, МС, МСЗ и С.
Породоразрушающие инструменты разновидностей 2Л и 3Л выпускаются двух типов: М и МС.

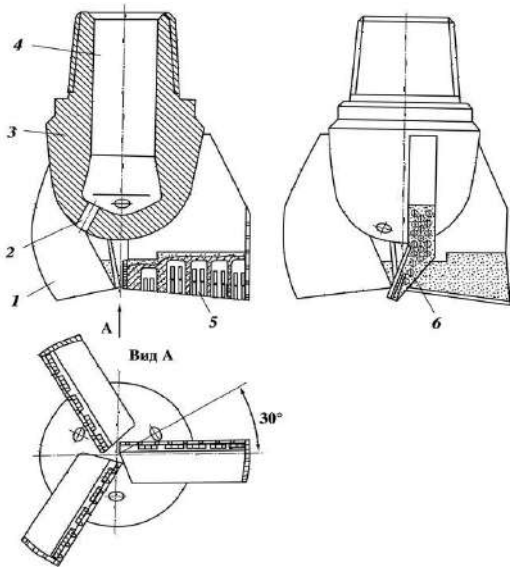


Рис. 2.86. Трехлопастное долото:
1 − лопасть; 2 − промывочное отверстие; 3 − корпус; 4 − присоединительная резьба;
5 − твердосплавные пластины; 6 − армирование торца лопасти.

Конструктивно породоразрушающие инструменты типа М отличаются от долот типа МС армированием передней поверхности зерновым релитом в пазах, прорезанных по определенной схеме с учетом характера износа лопастей и усилением с наружи чугуном. В породоразрушающих инструментах типа МС вместо релита в тех же пазах устанавливаются и припаиваются твердосплавные победитовые пластины прямоугольной формы. Породоразрушающие инструменты разновидности 3ИР относятся к типу МСЗ, а разновидности 6ИР − к типу С. Пикообразные породоразрушающие инструменты изготовляют двух типов: ПЦ − для разбуривания цементных пробок и металлических деталей низа обсадных колонн (рис. 3); ПР − для расширения ствола скважины.

Согласно ОСТ 26-02-1282−75 все лопастные породоразрушающие инструменты должны изготавливаться только с ниппельной присоединительной резьбой, выполненной соответствии с ГОСТ 20692−75, диаметром от 94,4 до 469,9 мм. По способу соединения корпуса с лопастями выделяются цельнокованые породоразрушающие инструменты и инструменты сварные, т.е. с приварными к корпусу лопастями. По конструкции промывочного устройства выделяются породоразрушающие инструменты с обычной и гидромониторной промывкой.

Примеры условной записи лопастных породоразрушающих инструментов (долот):
2Л-76М: 2Л − двухлопастное; 76 − номинальный диаметр, мм; М − для мягких пород;
3Л-161М: 3Л − трехлопастное; 161 − номинальный диаметр, мм; М − для мягких пород.

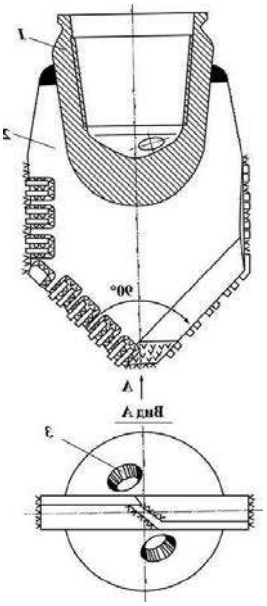


Рис.2.87. Пикообразное долото для разбуривания цементных стаканов в обсадной колоне:
1 − корпус; 2 − лопасть; 3 − промывочные отверстия.

2.6. Шарошечные породоразрушающие инструменты

Впервые породоразрушающий шарошечный инструмент был изобретен и изготовлен в США предпринимателем Юзом в 1909 г.

Шарошечные породоразрушающие инструменты относятся к группе инструментов дробяще-скалывающего действия, за исключением одношарошечных. В настоящее время шарошечные породоразрушающие инструменты производят в двух-, трех - и многошарошечном исполнении. Свое название они получили по конструктивному элементу − зубчатому катку − шарошке, на которой кольцевыми рядами (венцами) располагаются элементы вооружения (зубцы), разрушающие горную породу.

Породоразрушающие инструменты в двух- и трехшарошечном исполнении

составляют группу инструментов, разрушающих породу сплошным забоем. Их называют буровыми шарошечными долотами.

Шарошечное долото (рис.2.88.) состоит из секций, сваренных между собой. Верхняя часть сваренных между собой секций образует корпус. На верхнем конце корпуса нарезается присоединительная резьба. Число секций равно числу шарошек. В шарошечных долотах выделяют:

− вооружение долота − совокупность всех зубцов на всех шарошках;
− опору долота − совокупность подшипников всех шарошек;
− систему промывки долота
− совокупность всех промывочных узлов долота.

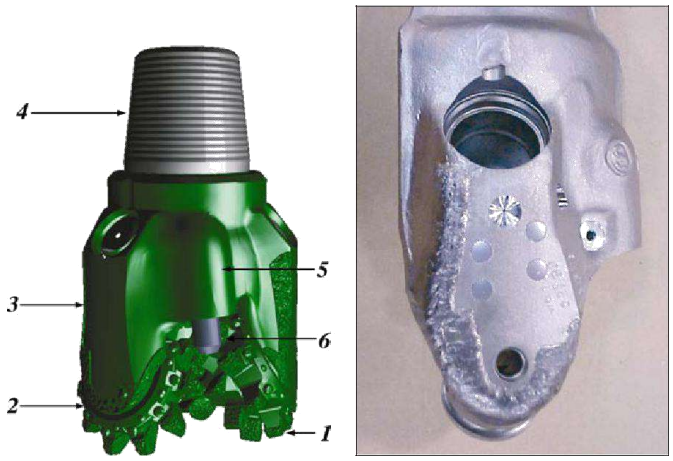


Рис.2.88. Общий вид трехшарошечного долота:
1 − шарошка; 2 − козырек лапы; 3 − лапа; 4 − присоединительная резьба;
5 − насадочный прилив; 6 – насадка.

Рис.2.89. Общий вид лапы.

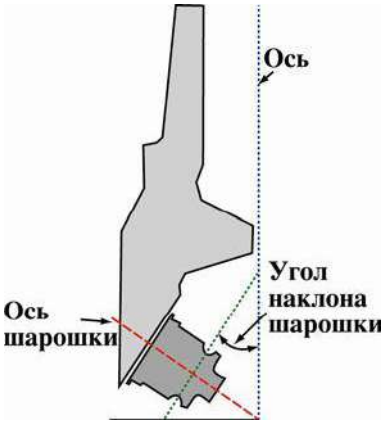


Рис.2.90. Основные элементы лапы

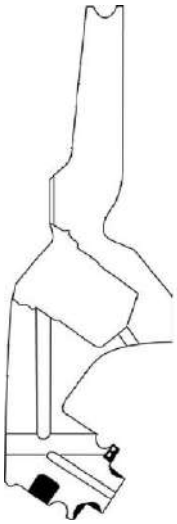


Рис. 2.91. Схема лапы с внутренними каналами.

Рис. 2.92. Общий вид цапфы.

Рис. 2.93. Общий вид шарошки с фрезерованным вооружением.

Собранная секция состоит из лапы (рис.2.89, 2.90, 2.91) заканчивающейся цапфой (рис.2.92.). На цапфе на подшипниках смонтирована свободно вращающаяся шарошка (рис.2.93.). Взаимная ориентация секций в долоте осуществляется с помощью двухгранного угла, фрезеруемого на каждой лапе, и сборочных штифтов.

Вооружение шарошечных породоразрушающих инструментов

Вооружение предназначено для разрушения горной породы. Шарошки, как правило, имеют коническую форму и могут быть одно- (рис.2.94, 2.95) и многоконусными. Тело одноконусной шарошки (рис 2.94) ограничено двумя коническими поверхностями. Конус 1 называется основным, а конус 2 − обратным.

Тело двухконусной шарошки (рис.2.96) ограничено тремя коническими поверхностями, а трехконусной − четырьмя. Конусы, расположенные между основным и обратным конусами, называются дополнительными. Вершины дополнительных конусов направлены к оси долота и их боковые поверхности взаимодействуют с забоем. Дополнительные конусы принято нумеровать, начиная от основного конуса в сторону обратного.

Шарошка характеризуется следующими геометрическими параметрами: диаметр $d_{ш}$, углы основного 2α и дополнительного $2\alpha i$ конусов, высота $H_{ш}$.

Угол при вершине основного конуса определяет объем шарошки.

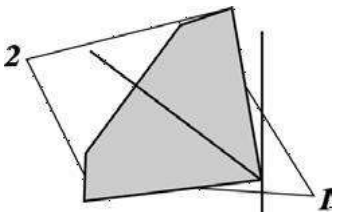


Рис.2.94**.** Тело одноконусной шарошки.

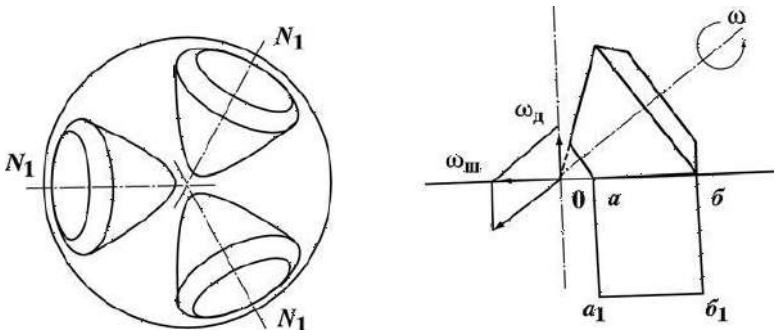


Рис. 2.95. Кинематика одноконусной шарошки:
ωд - угловая скорость вращения долота; ωш - угловая скорость шарошки;
а, а1, б, б 1 - проекция образующей корпуса шарошки на забой.

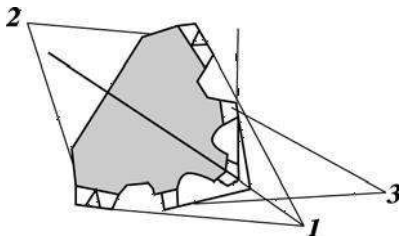


Рис. 2.96. Тело двухконусной шарошки:
1 – основной конус; 2 − обратный конус;
3 − дополнительный конус.

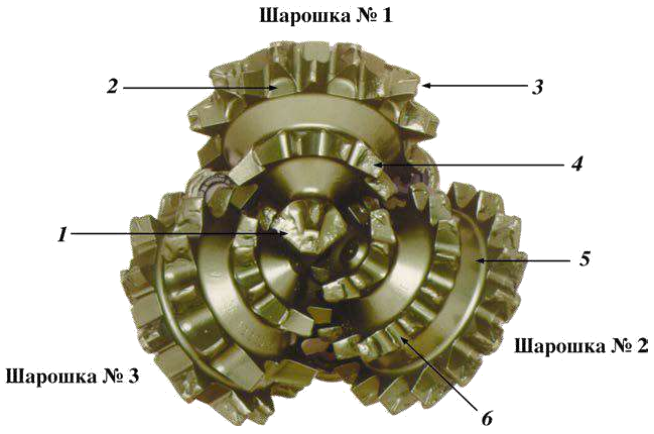


Рис.2.97. Основные элементы шарошек долота с твердосплавным вооружением:
1 − внутренние венцы; 2 − пирамидальный резец внутреннего венца; 3 − зазор между резцами; 4 − резцы калибрующего венца; 5 − межвенцовая канавка

Шарошки принято нумеровать в зависимости от того, какое место занимает первый венец по отношению к оси долота (рис.2.98, 2.99). Шарошке, у которой первый венец расположен в зоне оси долота и разрушает центральную часть забоя, присваивается

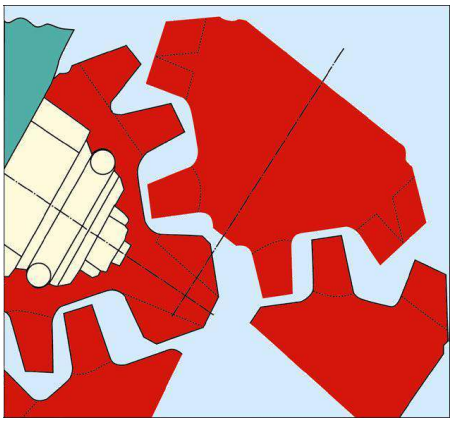


Рис.2.98. Смещение осей шарошек.

первый номер. Шарошка, первый венец которой разрушает кольцо, прилегающее к центральной части забоя, является второй.

Расположение шарошек относительно оси долота определяется следующими параметрами:

− углом наклона оси шарошки к оси долота β;

− выносом вершины шарошки за ось долота, f;

− величиной смещения осей шарошек в плане k.

Угол наклона оси шарошки к оси долота для современных серийных шарошечных долот лежит в пределах $51^0\ 57^0 30'$ и определяется типом долота.

Величина выноса вершины шарошки за ось долота определяется типоразмером долота и лежит в пределах 0−12 мм.

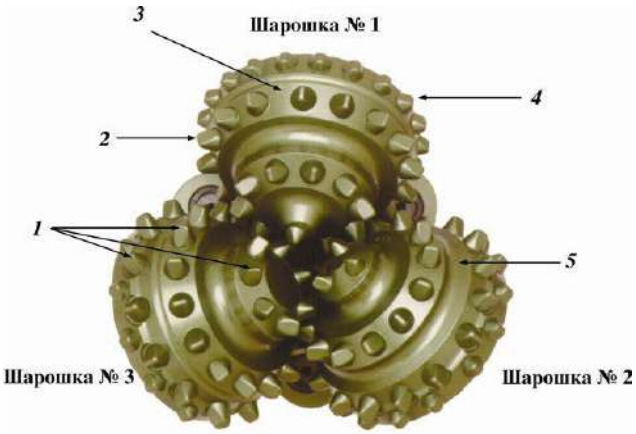


Рис. 2.99. Основные элементы шарошек долота с фрезерованным вооружением:
1 − центральная точка; 2 − уменьшенный зубец; 3 − зубцы калибрующего венца;
4 − защитное покрытие; 5 − межвенцовая канавка; 6 − зазор между зубцами.

В плане оси шарошек расположены относительно друг друга под углом 120^0, а по отношению к оси долота возможны два варианта расположения:

− долота с несмещенными осями шарошек, оси которых пересекаются в одной точке на оси долота;

− долота со смещенными осями шарошек (рис.2.100).

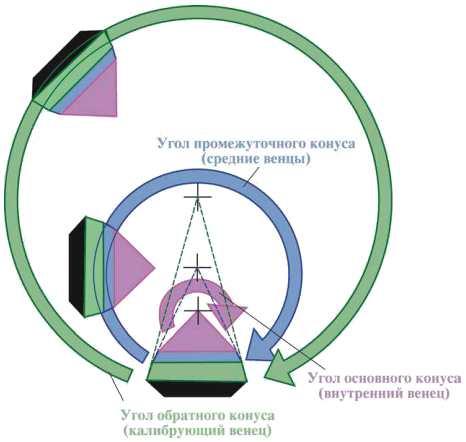


Рис.2.100. Схема смещения осей шарошки.

Оси смещаются в сторону вращения долота, и при этом смещение считается положительным. Величина смещения лежит в пределах 4−10 мм и определяется типоразмером долота. Долота считаются с несмещенными осями шарошек, если они имеют смещение, не превышающее 1,5 мм. Такое смещение называют технологическим. Оно гарантирует отсутствие отрицательного смещения шарошек, которое могло появиться в результате неблагоприятного сочетания допусков на размеры лап и неточностей сборки и сварки секций в корпус.

По расположению шарошек относительно друг друга следует различать два вида долот:

− долота с самоочищающимися шарошками, у которых центральные венцы каждой из шарошек входят в межвенцовое пространство соседних шарошек;

− долота с не самоочищающимися шарошками, у которых контуры соседних шарошек не пересекаются.

На венцах шарошек фрезеруются или крепятся элементы вооружения (зубцы), предназначенные для разрушения горной породы.

Совокупность всех зубцов на всех шарошках называют вооружением долота. Вооружение долот бывает трех видов:

− фрезерованное, армированное твердым сплавом;

− твердосплавное зубковое (штыревое);

− комбинированное (по спецзаказу) (рис.2.101).

Рис.2.101. Комбинированное вооружение.

В современных шарошечных долотах используются фрезерованные зубки разных форм для обеспечения лучшей породоразрушающей способности и долговечности (рис. 2.102).

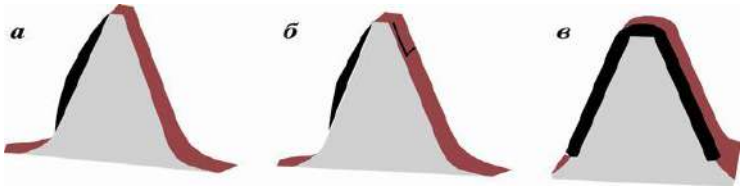


Рис.2.102. Типовые формы фрезерованных зубцов шарошечных долот производства ОАО «Волгабурмаш»:
а − тип 1, наплавляется только набегающая грань; б − тип 2, наплавляются набегающая грань и начало сбегающей грани; в − тип 3, наплавляются полностью все четыре грани и площадка притупления

Для обеспечения долговечности фрезерованного вооружения шарошки изготавливаются из малоуглеродистых легированных сталей (например, марок 17Н3МА, 18ХН3МА, 20ХН3А) с последующей их химико-термической обработкой. Химико-термическая обработка позволяет получить высокую твердость поверхностного цементированного слоя глубиной 0,6−2,4 мм в зависимости от диаметра долота (с увеличением диаметра глубина цементации возрастает), необходимую прочность и ударную выносливость сердцевины.

Боковые и торцовые грани зубцов, а также калибрующие поверхности обратных конусов шарошек направляются (армируются) твердым зерновым сплавом − релитом, представляющим измельченный литой карбид вольфрама.

Кроме того, в некоторых конструкциях долот в обратные конуса шарошек запрессовываются цилиндрические твердосплавные (сплав типа ВК11ВК) вставки с последующей наплавкой. Для улучшения охлаждения наплавленных поверхностей обратных конусов на них выполняются канавки.

В долотах некоторых типов в качестве элементов вооружения на центральных и периферийных венцах используются твердосплавные зубки, изготовленные из вольфрамокобальтового сплава типа ВК11ВК. Зубок имеет форму цилиндра, один торец которого плоский, а другой является рабочей головкой зубка, непосредственно воздействующий на горную породу (рис.2.103).

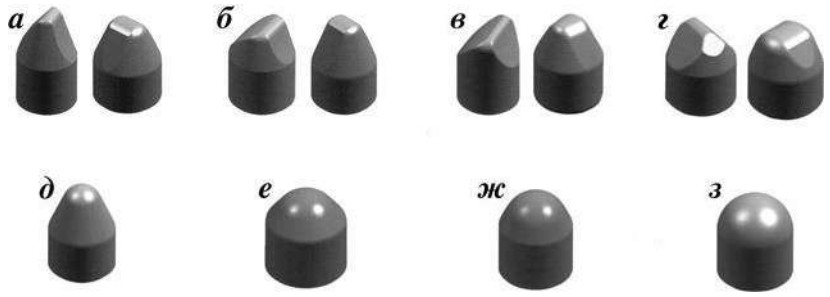


Рис. 2.103. Формы твердосплавных зубков шарошечных долот производства ОАО «Волгабурмаш»:
а − для очень мягких пород; б − для мягких пород; в − для мягких пород, перемежающихся со средними; г − для средних пород; д − для средних пород, перемежающихся с твердыми; е − для твердых пород; ж − для твердых пород, перемежающихся с крепкими; з − для крепких пород

Важным геометрическим параметром вооружения шарошечного долота является коэффициент перекрытия забоя, который рассчитывается по формулам:
(для долот с фрезерованными зубцами)

$$\eta = {}^{\Sigma}\sum l_{ij}/R_{д}, \tag{2.1}$$

где η − коэффициент перекрытия забоя; l_{ij} − сумма длин зубцов по одному с каждого венца всех шарошек (i − номер шарошки, j
− номер венца); $R_{д}$ − радиус долота;
(для долот с твердосплавными зубками)

$$\eta = {}^{\Sigma}\sum d_{ij}/R_{д}, \tag{2.2}$$

где d_{ij} − сумма диаметров зубков по одному с каждого венца всех шарошек (i -номер шарошки, j − номер венца).

Системы очистки забоя и элементов вооружения шарошечных породоразрушающих инструментов

Система очистки забоя предназначена для формирования потоков промывочной жидкости или продувочного агента и направления его в нужную часть забоя. Она включает в себя внутреннюю полость долота 1, подводящий канал 2 (один или несколько), выходное отверстие 3 (одно или несколько) (рис.2.104).

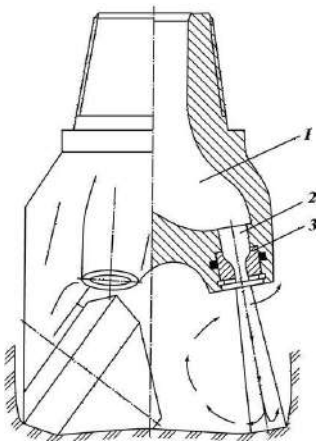


Рис. 2.104. Схема системы промывки шарошечных долот

В зависимости от направления струи промывочного агента долота подразделяются на долота:

− с центральной промывкой или продувкой (рис.2.105);

− с боковой гидромониторной промывкой или продувкой.

У первых долот струя направлена в центральную часть забоя на шарошки. Выходное отверстие выполнено в центре долота и имеет в большинстве случаев круглое сечение.

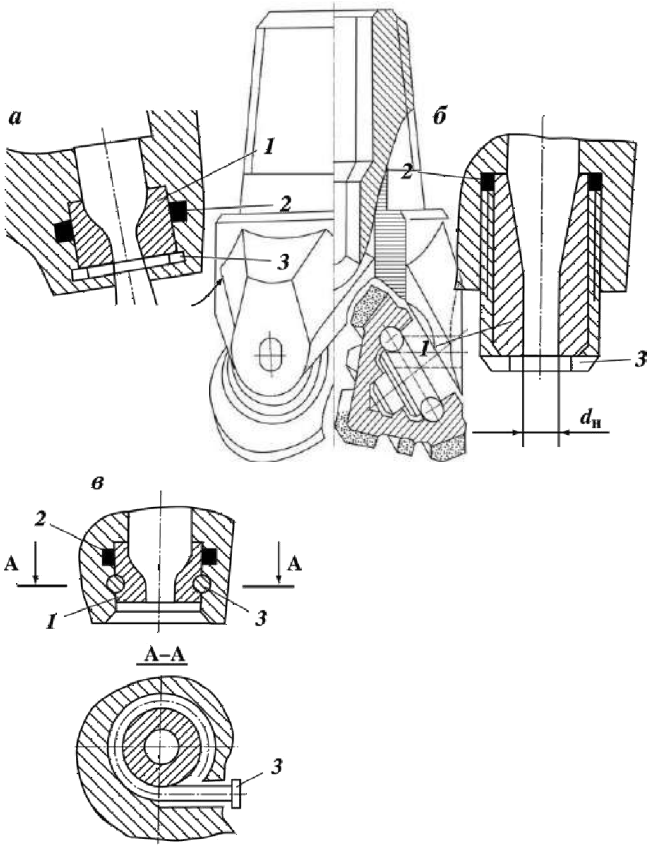


Рис.2.105. Схема долота с центральной системой промывки

У вторых долот выходные отверстия направляют струи жидкости между шарошками на периферийную часть забоя под некоторым углом к оси долота. Это обеспечивает направление струи одновременно к стенке скважины и в сторону, противоположную направлению вращения долота.

Струи непосредственно воздействуют на породу, интенсифицируя очистку забоя от шлама. Долота с такой системой промывки принято называть гидромониторными.

Для предотвращения размыва выходных отверстий в гидро-мониторных долотах устанавливаются гидромониторные насадки. Эти системы образуют гидромониторные узлы (ГМУ).

Рис. 2.106. Схемы ГМУ шарошечных долот:
а − крепление пружинным кольцом; б − крепление резьбовой втулкой; в − крепление гвоздем

Каждый ГМУ (рис.2.106.) включает три обязательных элемента: насадку 1, уплотнение 2, удерживающий замок 3. Насадка является сменной и изготавливается из твердого материала, способного противостоять эрозионному изнашиванию. Уплотнение 2 предназначено для герметизации зазора между насадкой 1 и корпусом. Переток промывочной жидкости по этому зазору приводит к интенсивному размыву отверстия в корпусе и выпадению из него насадки. Замок 3 предназначен для удержания насадки 1 в корпусе долота.

Герметизация зазора между насадкой 1 и корпусом во всех трех рассмотренных конструкциях осуществляется тороидальным резиновым кольцом 2.

Основной эксплуатационный параметр ГМУ − выходной диаметр dn насадки.

Гидравлическая система современных долот позволяет выбирать схему промывки забоя и вооружения долота, обеспечивающую наилучший эффект их очистки в зависимости от свойств породы и условий бурения. Это достигается применением различных схем промывки центральной, периферийной или асимметричной.

Под асимметричной схемой промывки понимают работу двух или даже одной периферийной насадки вместо трех. В большом числе случаев весьма эффективны комбинированные схемы, когда одновременно работают центральная и периферийные насадки.

Для бурения скважин с продувкой забоя сжатым газом выпускаются долота с продувкой. Отличительной особенностью этих долот является наличие центрального продувочного канала уменьшенного сечения в корпусе долота и каналов в каждой лапе, которые подводят часть нагнетаемого газа в полости опор шарошек для их охлаждения и очистки от возможного попадания в них мелких выбуренных частиц породы и пыли (рис.2.107).

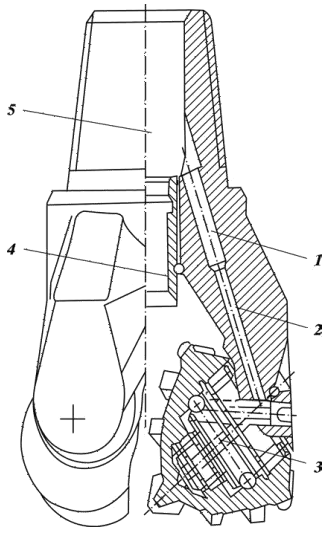


Рис.2.107. Схема ГМУ для продувки сжатым газом:
1, 2 − продувочные каналы в лапе долота; 3 − замковый подшипник;
4 − центральный промывочный узел; 5 − внутренняя полость в корпусе долота

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

2.7. Типы и основные размеры шарошечных долот по гост 20692−2003

ДОЛОТА ШАРОШЕЧНЫЕ

Технические условия

Roller bits. Specifications

Дата введения 2004—07—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на шарошечные долота для сплошного бурения скважин.

Требования, изложенные в разделах 3—5 (кроме 5.2), разделах 6—8, являются обязательными.

Обязательные требования, обеспечивающие безопасность работы с шарошечными долотами, изложены в 4.4—4.6.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 9.032—74 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения

ГОСТ 15.309—98 Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения

ГОСТ 164—90 Штангенрейсмасы. Технические условия

ГОСТ 577—68 Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия

ГОСТ 3242—79 Соединения сварные. Методы контроля качества

ГОСТ 7918—75 Замки для геолого-разведочных бурильных труб диаметром 50 мм. Технические условия

ГОСТ 14192—96 Маркировка грузов

ГОСТ 15150—69 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 28487—90 Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль. Размеры. Допуски*

3 Классификация и основные размеры

3.1 Долота следует изготовлять следующих видов:

I — одношарошечные;

II — двухшарошечные;

III — трехшарошечные.

* На территории Российской Федерации действует ГОСТ Р 50864—96 Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль, размеры, технические требования.

Издание официальное

3.2 Долота следует изготовлять следующих типов:

М — со стальными зубьями для бурения мягких пород;

МЗ — с твердосплавными зубками для бурения мягких абразивных пород;

МС — со стальными зубьями для бурения мягких пород с пропластками средней твердости;

МСЗ — с твердосплавными зубками для бурения мягких абразивных пород с пропластками средней твердости;

С — со стальными зубьями для бурения пород средней твердости;

СЗ — с твердосплавными зубками для бурения абразивных пород средней твердости;

СТ — со стальными зубьями для бурения пород средней твердости с пропластками твердых;

Т — со стальными зубьями для бурения твердых пород;

ТЗ — с твердосплавными зубками для бурения твердых абразивных пород;

ТК — со стальными зубьями и твердосплавными зубками для бурения твердых пород с пропластками крепких;

ТКЗ — с твердосплавными зубками для бурения твердых абразивных пород с пропластками крепких;

К — с твердосплавными зубками для бурения крепких пород;

ОК — с твердосплавными зубками для бурения очень крепких пород.

3.3 По расположению и конструкции промывочных и продувных узлов (каналов) долота следует изготовлять с:

центральной промывкой — Ц;

боковой гидромониторной промывкой — Г;

комбинированной промывкой — ЦГ;

центральной продувкой — П;

боковой продувкой — ПГ.

3.4 Опоры шарошек следует изготовлять на:

подшипниках с телами качения и одном или более упорных подшипниках скольжения, или без упорных подшипников скольжения — В;

подшипниках с телами качения и одном или более упорных подшипниках скольжения и герметизацией опоры — ВУ;

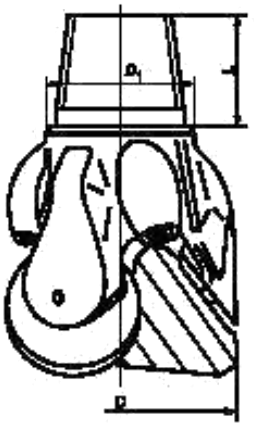
одном радиальном и одном или более упорных подшипниках скольжения (остальные подшипники с телами качения) — Н;

одном радиальном и одном или более упорных подшипниках скольжения (остальные подшипники с телами качения) и герметизацией опоры — НУ;

двух или более радиальных подшипниках скольжения с одним или более упорным подшипником скольжения — А;

двух или более радиальных подшипниках скольжения с одним или более упорным подшипником скольжения и герметизацией опоры — АУ.

3.5 Основные размеры долот и обозначения присоединительной резьбы должны соответствовать указанным на рисунке 1 и в таблице 1.



Примечание — Рисунок не определяет конструкцию долота

Рисунок 1

Таблица 1

Размеры в миллиметрах

Диаметр долота D		Диаметр упорного уступа D_1 ± 0,4	Длина ниппеля L − 4,8	Обозначение присоединительной резьбы
Номин.	Пред. откл.			
76,0	+ 0,6	57,0	50	3-42
93,0	+ 0,8	65,0; 77,4; 78,18	76; (60)	3-50
95,3		77,4; 78,18; 83,0		3-63,5; 3-66
98,4				
114,3				
117,5		92,47	88,9; (70)	3-76
120,6				
127,0				
130,2		92,47; 105,17	88,9; 95,25; (70)	3-76; 3-88
132,0				
139,7		83,0; 105,17	70,0; 95,25; (60)	3-63,5; 3-88
146,0				
151,0				
161,0				
165,1				
171,4				
187,3				
190,5		136,13	107,95; (80)	3-117
200,0				
212,7				
215,9				
222,3				
238,1				
241,3		142,1; 187,72	102; 127; (80)	3-121; 3-152
244,5				
250,8				
269,9				
295,3				
304,8				
311,1				
320,0				
349,2				
365,1	+ 1,6	187,72; 196,0; 203*; 215,9	127,0; (80); 133,35	3-152; 3-171; 3-177
368,3				
371,5				
374,6				
393,7				
444,5				
469,9	+ 2,4	196,0; 215,9; 243,28; 243,8	127,0; 133,35; 136,53; 137,0	3-171; 3-177; 3-201
473,1				
490,0				
508,0				

* Для корпусных долот с муфтовой присоединительной резьбой.

Примечания

1 Размеры в скобках указаны для долот с укороченной резьбой.

2 По заказу потребителя допускается изготовление долот с размерами, отличными от указанных.

3 Долота с опорами А и В следует изготовлять: с $D = 76^{+0,6}_{-0,3}$ мм, с D от $93^{+1,0}_{-0,3}$ мм до $320,0^{+1,0}_{-0,3}$ мм, с D от (349,2 ± 1,5) мм до (393,7 ± 1,5) мм; с $D \geq 444,5$ мм ± 2,0 мм.

Пример условного обозначения трехшарошечного долота диаметром 215,9 мм для бурения абразивных пород средней твердости (СЗ), с боковой гидромониторной промывкой (Г), на двух или более радиальных подшипниках скольжения с одним или более упорным подшипником скольжения и герметизацией опоры (АУ):

Долото шарошечное III 215,9 СЗ-ГАУ ГОСТ 20692—2003

4 Технические требования

4.1 Долота следует изготовлять в соответствии с требованиями настоящего стандарта, по рабочим чертежам, утвержденным в установленном порядке.

4.2 Точность изготовления долот должна соответствовать значениям, указанным в таблице 2.

Таблица 2

Размеры в миллиметрах

Наименование параметра	Тип долота	Норма точности для долот диаметрами, не более							
		от 76,0 до 98,4 включ.	св. 98,4 до 171,4 включ.	св. 171,4 до 250,8 включ.	св. 250,8 до 311,1 включ.	св. 311,1 до 349,2 включ.	св. 349,2 до 393,7 включ.	св. 393,7 до 490,0 включ.	св. 490,0
Разновысотность шарошек относительно упорного уступа	М, МС, С, М3, МС3, С3	1,1	1,5	1,6		2,2	2,4	2,6	3,3
	СТ, Т, Т3, ТК3	0,9	1,3	1,6		2,0	2,4	2,6	3,3
	ОК, К	0,7	1,0	1,2		1,5	1,7	2,6	—
Радиальное биение шарошек относительно оси резьбы	М	1,0	1,1	1,4	2,0	2,3	2,8	3,0	3,8
	МС, С, М3, МС3, С3	1,0	1,1	1,4	1,6	2,0	2,5	3,0	3,8
	СТ, Т, Т3, ТК3	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,3	3,0	3,0
	ОК, К	0,6	0,8	1,2	1,4	1,5	1,8	3,0	—

4.3 Долота следует изготовлять с правой конической замковой резьбой.

Резьбы З-42 и З-63,5 — по техническому документу, утвержденному в установленном порядке.

Резьба З-50 — по ГОСТ 7918.

Остальные резьбы (кроме величины натяга) — по ГОСТ 28487.

Соответствие обозначений присоединительной резьбы по настоящему стандарту и спецификации 7 Американского нефтяного института (API Spec 7) приведено в приложении А.

4.4 Натяг конической замковой резьбы должен быть:

$10{,}35^{+0{,}4}$ мм — для ниппельной резьбы З-42;

$10{,}00^{+0{,}4}$ мм — для ниппельной резьбы З-50;

$16{,}00^{+0{,}4}$ мм — для ниппельной резьбы З-63,5;

$15{,}875\ ^{+0{,}25}_{-0{,}80}$ мм — для ниппельных резьб З-88, З-117, З-121, З-152, З-171, З-177, З-201;

$0\ ^{+0{,}35}_{-0{,}25}$ мм — для муфтовых резьб З-88, З-117, З-121, З-152, З-171, З-177, З-201.

4.5 Система промывки гидромониторных долот диаметрами 190,5 мм и более должна быть герметична при давлении жидкости 7,85 МПа; диаметрами менее 190,5 мм — при давлении жидкости 5 МПа.

4.6 Насадки в гидромониторных долотах с боковой промывкой диаметрами 190,5 мм и более должны удерживаться при давлении жидкости 7,85 МПа; диаметрами менее 190.5 мм — при давлении жидкости 5 МПа. Насадки должны быть сменными.

4.7 В сварных швах на поверхностях упорного уступа ниппеля и на расстоянии 25 мм над упорным уступом ниппеля не допускаются дефекты сварки, на остальной резьбовой части ниппеля

допускаются единичные поры и раковины диаметром не более 1 мм в количестве не более 3 шт. на каждом шве. На резьбовой части корпусных долот допускаются единичные поры и раковины диаметром не более 2 мм в количестве до 5 шт.

4.8 Требования к материалам, химико-термической обработке, комплектующим, краскам, смазкам должны соответствовать нормативной и технической документации, утвержденной в установленном порядке.

4.9 Поверхность долот, кроме присоединительной резьбы, упорного уступа ниппеля (упорного торца муфты), торца ниппеля и заходной фаски должна быть покрыта ровным слоем краски. После высыхания краска должна прочно удерживаться на долоте. Класс покрытия VII — по ГОСТ 9.032.

4.10 Поры, вздутия, мелкие пузыри и выступания коррозии через краску, а также попадание краски на присоединительную резьбу, упорный уступ, клапаны, в отверстия крышек смазочных резервуаров, промывочные каналы гидромониторных долот не допускаются.

4.11 Присоединительная резьба должна быть покрыта антикоррозионной смазкой.

4.12 Опоры шарошек должны быть заполнены смазкой. Заполнение смазкой долот с опорой НУ следует проводить до появления смазки из-под манжеты. Долота с опорами АУ и ВУ перед заполнением смазкой вакуумируют.

4.13 Шарошки долот с опорами АУ, НУ, ВУ должны проворачиваться на опорах от руки со значительным усилием. Шарошки долот с опорами Н, В, А должны свободно и плавно проворачиваться на опорах от усилий руки.

Зацепление зубьев или зубков одной шарошки за зубья или зубки, а также за корпус другой шарошки не допускается.

4.14 Пружинное кольцо компенсационного узла долота должно заходить по всему периметру в канавку и не иметь повреждений, а крышка не должна проворачиваться от руки.

4.15 Требования надежности

4.15.1 Срок сохраняемости долот — не менее 18 мес со дня изготовления.

4.16 Комплектность

4.16.1 В комплект поставки входят: долото с установленными насадками и (или) клапанами, а также паспорт долота.

По согласованию с потребителем допускается поставка долот без насадок.

4.17 Маркировка

4.17.1 Маркировка долот должна быть четкой и сохраняться на протяжении срока службы долота.

4.17.2 На торце ниппеля (пояске муфты) маркируются:

- товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение долота (допускается обозначение стандарта не маркировать);
- обозначение присоединительной резьбы (по требованию потребителя);
- порядковый номер долота по системе нумерации предприятия-изготовителя;
- дата изготовления (месяц, год);
- клеймо технического контроля.

Примечание — Допускается маркирование товарного знака предприятия-изготовителя на других поверхностях долота.

4.18 Упаковка

4.18.1 Поверхность присоединительной резьбы, включая упорный уступ ниппеля (упорный торец муфты), торец ниппеля и заходную фаску, должна быть полностью покрыта ровным слоем консервационной смазки по технической документации, утвержденной в установленном порядке.

4.18.2 Долота упаковывают в соответствии с технической документацией, утвержденной в установленном порядке.

По согласованию с потребителем допускается не упаковывать долота, при этом должна быть обеспечена защита присоединительной резьбы.

Каждое долото должно сопровождаться паспортом, содержащим:

- наименование продукции;
- наименование страны-изготовителя;
- наименование предприятия-изготовителя;
- область применения продукции;
- основные технические характеристики;
- изображение знака соответствия для сертифицированной продукции;
- юридический адрес предприятия-изготовителя (продавца);
- массу нетто;

2.8. Лицензионные шарошечные долота производства ОАО «Волгабурмаш»

В 1997 г. ОАО «Волгабурмаш». сертифицировало свою продукцию, выпускаемую по лицензии американской фирмы «Dresser», в Международной организации по стандартам (International Standards Organization − ISO) и Американском нефтяном институте (American Petroleum Institute − API) с получением сертификатов соответствия ISO 96-371 и API 7-0268. После этого выпускаемые ОАО «Волгабурмаш» долота классифицированы по международной системе IADC (I − International, A − Association, (of), D − Drilling, C − Contractors).

Система IADC базируется на четырехсимвольном коде, отражающем конструкцию долота и тип горной породы, для бурения которой оно предназначено.

Первые три символа кода − цифровые, а четвертый − буквенный.

Последовательность цифровых символов определяет: серию вооружения (породы) − тип вооружения (породы) − конструкцию опоры/калибрующих поверхностей.

Четвертый буквенный символ − дополнительные характеристики.

Первая цифра кода (1−8) − восемь серий вооружения, соответствующих восьми категориям разбуриваемых пород.

Серии 1−3 соответствуют долотам с фрезерованным вооружением.

Серии 4−8 соответствуют долотам с твердосплавным зубковым (штыревым) вооружением.

Вторая цифра кода характеризует тип вооружения (породу) внутри серии.

Каждая серия разделена на четыре типа пород по твердости. Чем больше цифра − тем выше твердость породы, для бурения которой предназначено долото.

Третья цифра характеризует конструкцию опоры и наличие (или отсутствие) дополнительной защиты калибрующих поверхностей (венцов шарошек) от износа по диаметру:

1 − открытая опора качения;

2 − открытая опора качения для бурения с продувкой воздухом;

3 − открытая опора качения + твердосплавные вставки на калибрующих поверхностях шарошек (обратных конусах шарошек);

4 − герметизированная опора качения;

5 − герметизированная опора качения + твердосплавные вставки на калибрующих поверхностях шарошек (обратных конусах шарошек);

6 − герметизированная опора на подшипниках скольжения;

7 − герметизированная опора на подшипниках скольжения + твердосплавные вставки на калибрующих поверхностях шарошек (обратных конусах шарошек);

8, 9 − резервные, для использования в будущем.

Некоторые зарубежные фирмы уже используют эти резервные обозначения. Так, например на фирме «Smith International, Inc.»:

8 − долота для бурения горизонтальных и наклонных скважин (L, XP);

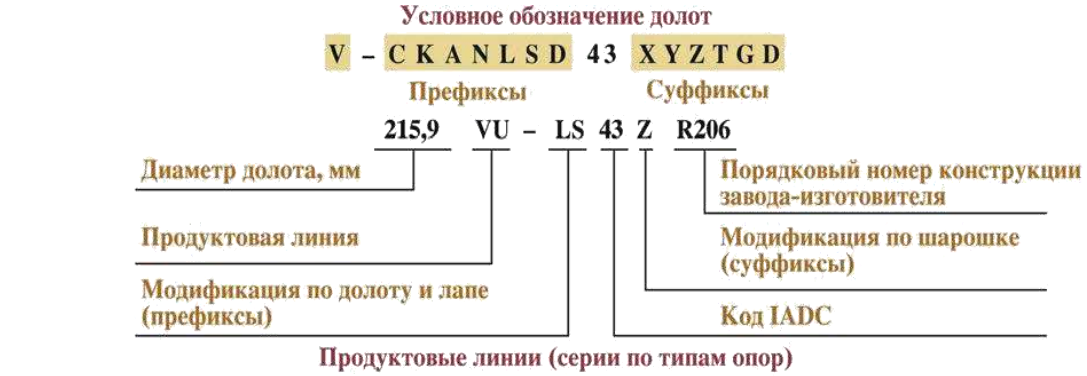
9 – долота для геотермального бурения (G) и бурения забойными двигателями (M).

Четвертый буквенный символ кода − дополнительные характеристики − содержит 16 английских букв и используется для обозначения специальных конструкций вооружения, опор, систем промывки и защиты корпусов долот от износа, но он является необязательным для производителей долот:

A − для бурения с продувкой воздухом;

B − для высокооборотного бурения (> 450 об/мин); C − центральная насадка;

D − специальная конструкция вооружения, уменьшающая самопроизвольное искривление ствола скважины;



Продуктовые линии (серии по типам опор)

A	V	N	VU	NU	AU	AUP	AUL
два радиальных подшипника скольжения	только подшипники качения	один подшипник скольжения (остальные подшипники качения)	только подшипники качения с уплотнением	один подшипник скольжения с уплотнением	два радиальных подшипника скольжения с уплотнением	долота малого диаметра до 172 мм	два радиальных подшипника скольжения с уплотнением (разрезная плавающая втулка и упорная шайба)

	Префиксы
C	центральныая насадка
K	комбинированная промывка
A	продувка воздухом
N	удлиненные насадки
L	наплавка козырька и набегающей грани лапы
S	армирование спинки лапы твердосплавными зубками
D	армирование спинки лапы зубками с алмазным покрытием

	Суффиксы
X	клиновидный зубок
Y	конический зубок
Z	зубок прочей формы, отличный от клиновидного и конического
T	усиленная объемная наплавка зубьев
G	дополнительное армирование твердосплавными зубками обратного конуса шарошки
D	армирование обратного конуса шарошки зубками с алмазным покрытием

Рис. 2.108. Условные обозначения лицензионных долот производства ОАО “Волгабурмаш”.

E − удлиненные насадки;
G − усиленная защита козырьков лап от износа;
H − долота для наклонного и горизонтального бурения;
J − гидромониторное долото для набора зенитного угла (кривизны);
L − калибрующие накладки на спинках лап, усиленные твердосплавными штырями;
M − долота для бурения винтовыми забойными двигателями;
S − стандартные долота с фрезерованным вооружением;
T − двухшарошечные долота;
W − усовершенствованное вооружение, запатентованное производителем;
X − твердосплавные зубки клиновидной формы;
Y − твердосплавные зубки конической формы;
Z − другие формы зубков.

После сертификации продукции ОАО «Волгабурмаш» изменило обозначение и кодирование шарошечных долот, выпускаемых по лицензии американской фирмы «Dresser», в своих каталогах (рис. 32).

Продуктовые линии (серии долот по типам опор) лицензионных долот в соответствии с ГОСТ 20692−75 нормируют эксплуатационные частоты их вращения:

(V) (> 450 об/мин);
(VU) (> 450 об/мин);
(N) (250−450 об/мин);
(NU) (250−450 об/мин);
(AU) (< 90 об/мин).

В табл. 9. показаны примеры обозначения шифров лицензионных шарошечных долот производства ОАО «Волгабурмаш» после сертификации.

Таблица 2.1.

Примеры обозначения долота по продуктовым линиям

Твердосплавное вооружение	
76,0 A-C74ZR306	76,0 − диаметр долота, мм; A − продуктовая линия; C − центральная промывка; 74 – крепкие породы по IADC; Z − сферический зубок (отличный от клиновидного и конического); R306 – порядковый номер конструкции завода - изготовителя
215,9 V-NL63YR276	215,9 − диаметр долота, мм; V – продуктовая линия; N − удлиненные насадки; L – наплавка козырька и набегающей грани лапы; 63 – твердые абразивные породы по IADC; Y – конический зубок; R276 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
311,1 N-43XR102M	311,1 − диаметр долота, мм; N – продуктовая линия; 43 − очень мягкие абразивные породы по IADC; X − клиновидный зубок; R102M − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 VU-LS43ZR206	215,9 − диаметр долота, мм; VU – продуктовая линия; L − наплавка козырька и набегающей грани лапы; S − армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 43 − очень мягкие абразивные породы по IADC; Z − ковшеобразный зубок (отличный от клиновидного и конического); R206 − порядковый номер конструкции завода - изготовителя
215,9 NU-62XR05	215,9 − диаметр долота, мм; NU – продуктовая линия; 62 − твердые абразивные породы по IADC; X − клиновидный зубок; R05 − порядковый номер конструкции завода - изготовителя
165,1 AU-L51XR111	165,1 − диаметр долота, мм; AU – продуктовая линия; L − наплавка козырька и набегающей грани лапы; 51 − мягкие абразивные породы по IADC; X − клиновидный зубок; R111 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
124,0 AUPLS54XR413	124,0 − диаметр долота, мм; AUP – продуктовая линия; L − наплавка козырька и набегающей грани лапы; S − армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 54 − средние абразивные породы по IADC; X − клиновидный зубок; R413 – порядковый номер конструкции завода - изготовителя
311,1 AULLS83Y R29	311,1 − диаметр долота, мм; AUL – продуктовая линия; L − наплавка козырька набегающей грани лапы; S − армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 83 − очень крепкие породы по IADC; Y − конический зубок; R299 -порядковый номер конструкции завода-изготовителя
Фрезерованное вооружение	
93,0 A-C31R307	93,0 − диаметр долота, мм; A − продуктовая линия; C − центральная промывка; 31 − твердые породы по IADC; R306 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
444,5 V-K11TGR130	444,5 − диаметр долота, мм; V − продуктовая линия; K − комбинированная (боковая и центральная) промывка; 11 − мягкие породы по IADC; T − усиленная объемная наплавка зубьев; G − дополнительное армирование твердосплавными зубками

	обратного конуса шарошки; R130 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 N-N21R163	215,9 − диаметр долота, мм; N − продуктовая линия; N − удлиненные насадки; 21 − средние породы по IADC; R163 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 VU-LS21R190	215,9 − диаметр долота, мм; VU – продуктовая линия; L − наплавка козырька и набегающей грани лапы; S − армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 21 − средние породы по IADC; R190 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 NU-LS11TGR183	215,9 − диаметр долота, мм; NU – продуктовая линия; L − наплавка козырька и набегающей грани лапы; S − армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 11 − мягкие породы по IADC; T −усиленная объемная наплавка зубьев; G − дополнительное армирование твердосплавными зубками обратного конуса шарошки; R183 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
200,0 AU-11TR133	200,0 − диаметр долота, мм; AU – продуктовая линия; 11 − мягкие породы по IADC; T − усиленная объемная наплавка зубьев; R133 – порядковый номер конструкции завода-изготовителя
215,9 AULLS13TGR415	215,9 − диаметр долота, мм; AUL – продуктовая линия; L − наплавка козырька и набегающей грани лапы; S − армирование спинки лапы твердосплавными зубками; 13 − мягкие средние породы по IADC; T − усиленная объемная наплавка зубьев; G − дополнительное армирование твердосплавными зубками обратного конуса шарошки; R415 − порядковый номер конструкции завода-изготовителя

2.9. Одношарошечные долота

Конструкционная схема одношарошечного долота показана на рис.2.109, а его общий вид приведен на рис. 2.110, 2.111. Сферическая шарошка оснащена твердосплавными штырями. Центр сферы располагается в точке пересечения осей. Ось шарошки наклонена под углом 30^0 к оси долота. Промывка осуществляется через отверстие в корпусе долота. Опора долота гораздо больше, чем в трехшарошечных долотах, и состоит из цапфы и трех подшипников: скольжения, шарикового и шарикового замкового.

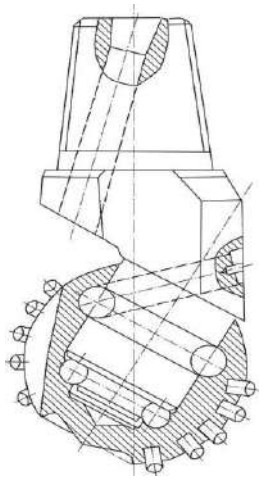


Рис.2.109. Схема одношарошечного долота

Одношарошечные долота выпускают диаметрами 138-216 мм. Они предназначены для низкооборотного бурения в породах средней твердости. Поскольку часть зубков при бурении находится в постоянном контакте с породой, серийное одношарошечное долото относится к долотам режуще-скалывающего действия.

2.10. Система кодирования износа шарошечных долот, принятая в России

Система кодирования износа шарошечных долот, применяемая в России, разработана ВНИИБТ, бывшим главным научно-исследовательским институтом буровой техники в СССР. Система оценивает износ шарошечных долот по четырем направлениям: износу вооружения, износу опор, износу диаметра и аварийный износ.

Износ вооружения (хотя бы одного венца):

В1 − уменьшение высоты зубцов на 1/4;

В2 − уменьшение высоты зубцов на 1/2 (2/4);

В3 − уменьшение высоты зубцов на 3/4;

В4 − уменьшение высоты зубцов на 4/4 (полностью).

При наличии скола фрезерованных зубцов, скола и выпадения твердосплавных зубков добавляется индекс С. Общее количество (в %) сколотых фрезерованных зубцов и выпавших твердосплавных зубков записывается в скобках. Например: С(20).

При закруглении зубцов периферийных венцов добавляется индекс Р. Например: С(20)Р.

Рис.2.110. Общий вид одношарошечного долота с герметизированной маслонаполненной опорой

Рис.2.111. Общий вид одношарошечного долота с открытой опорой

Износ опоры (хотя бы одной шарошки):

П1 − износ небольшой: «качка» торца шарошки относительно оси цапфы невелика (например, до 2 мм для долота диаметром 190−214 мм; до 4 мм для долот диаметром 243−295 мм); тела качения не обнажены;

П2 − износ средний: «качка» торца шарошки большая (например, до 5 мм для долот диаметром 190−214 мм, до 8 мм для долот диаметром 243−295 мм); тела качения не обнажены;

П3 − износ большой: «качка» торца шарошки значительная (например, 5 мм для долот диаметром 190−214 мм; больше 8 мм для долот диаметром 243−295 мм); значительный износ или разрушение части тел качения; имеется опасность их выпадения; «заедание» шарошки при вращении от руки;

П4 − отказ (разрушение) опор: разрушение и поворот роликов; разрушение шариков, козырьков лап и тыльной части шарошек с выпадением тел качения; трещины и «лыски» на шарошках.

В случае повреждения узла герметизации маслонаполненной опоры (выход из строя уплотнения или его выпадение) добавляется индекс У, количество поврежденных узлов указывается в скобках. Например: У(2).

В случае заклинивания, шарошек добавляется индекс К, количество заклиненных шарошек указывается в скобках. Например: К(2).

В случае повреждения гидромониторного узла (размыв гнезда, выпадение насадок) добавляется индекс Г, количество поврежденных узлов указывается в скобках. Например: Г(3).

Износ по диаметру. Уменьшение диаметра долота обозначается индексом Д и выражается в мм. Например: Д6.

Аварийный износ:

Ав − «оставление» вершин шарошек на забое;

Аш − «оставление» шарошек на забое;

Ас − «оставление» секций на забое;

Ац − «оставление» цапфы с шарошкой на забое.

Количество «оставленных» на забое лап, шарошек и их вершин указывается римскими цифрами в скобках. Например:

Ав(I); Аш(I, II); Ас(I); Ац(III).

Примеры применения кода для оценки износа долот

1. Вооружение «сработано» на 10 %, опоры имеют средний износ, «заклинены» две шарошки, диаметр долота сохранился: В1П2К(2)Д0.

2. Вооружение изношено на 3/4, 50 % зубцов имеют сколы, калибрующие кромки зубцов периферийных венцов закруглены, опоры имеют большой износ, «качка» торца шарошки 10 мм, диаметр долота уменьшился на 7 мм: В3С(50)РП3Д7.

3. Вооружение «сработано» полностью, опора разрушена, часть тел качения выпала, первая шарошка «оставлена» на забое: В4П4Аш(I).

4. В скважине оставлены все шарошки: Аш(III).

Примеры записи износа долот с помощью кода в буровом журнале и суточном рапорте:

269,9 С-ГНУ № 8639 – В2С(30)РП3Д6Г(2)У3;

190,5 С-ГВ № 1642 – В1П1К(I)Ав(I)Д0;

215,9 С-ГВ № 2894 – В4П4Ас(II);

244,5 Т-ЦВ № 6785 – В2П3Ац(I);

244,5 С-ГН № 9735 – В1П2К(2)Д3Г(1).

В современной России работают зарубежные фирмы, а наши буровые предприятия используют импортные буровые долота, чаще с инженерным сопровождением. В связи с эти возникла потребность в оценке износа по системе IADC, применяемой за рубежом.

Кодирование износа шарошечных породоразрушающих инструментов по кодам IADC

25 лет назад Международная ассоциация буровых подрядчиков (IADC) ввела стандартизированную систему описания износа породоразрушающих инструментов всех видов, в том числе и шарошечных долот.

За рубежом износ долот кодируют по трем параметрам: износ вооружения, износ опор, износ диаметра. Кроме того, в примечаниях приводятся повреждения других видов, причины подъема долота и прочие сведения (рис.2.112, 2.113.).

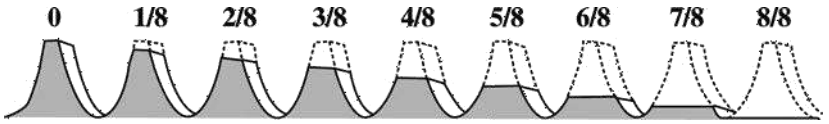


Рис.2.112. Структурная схема кодирования износа долот по IADC

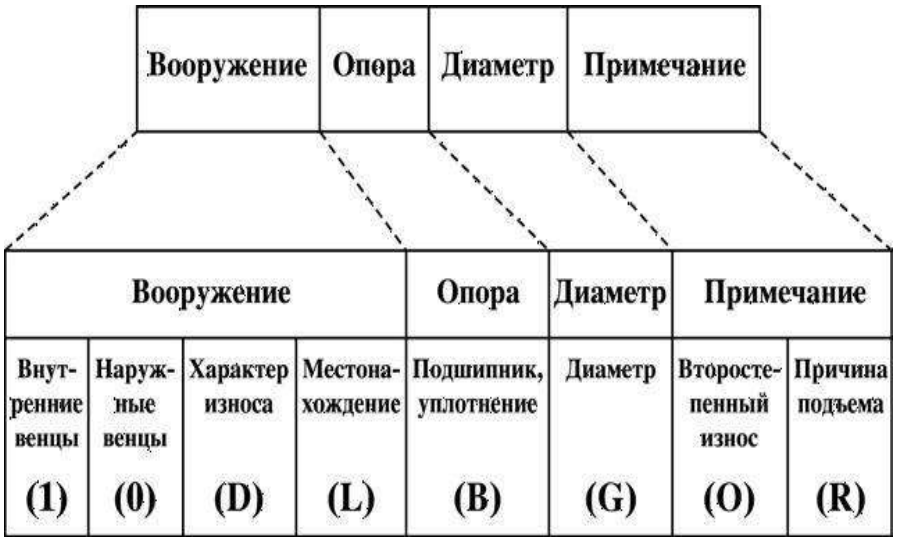


Рис. 2.113. Схема оценки износа вооружения долот с фрезерованным вооружением

1. Износ вооружения:

(I) – износ внутренних венцов;

(O) – износ наружных венцов;

(D) – характер износа;

(L) – местонахождение.

Пример определения кода износа твердосплавного (штыревого) вооружения: (Пу · 8) + (Пи · Ки) = Кд, где Пу − количество сломанных и/или утерянных зубков, в долях; 8 − оценка их износа (8/8); Пи − количество изношенных (вследствие истирания) зубков в долях; Ки − оценка их износа, в восьмых долях высоты зубка; Кд − код износа.

Например, у долота отсутствует половина зубков вследствие слома или утери, тогда остальные зубки имеют 50%-ный износ по высоте (4/8) вследствие истирания, код износа такого долота равен шести (6), т.е. (0,5 · 8) + (0,5 · 4) = 6.

D − харак те р износ а:

BC − слом шарошки;

CR − кернение долота;

LN − потеря насадки;

RO − кольцевой износ;

BF − отлом алмаза, пластины;

CT − скол зубков;

LT − потеря зубков (резцов);

SD − повреждение козырька;

BT − скол зубков (резцов);

ER − эрозия;

OC − эксцентричный износ;

SS − самозатачивание зубков;

BU − образование сальника;

FC − затупление вершины зубка;

PB − механическое повреждение при спуско-подъемных операциях (СПО);
TR − трекинг;
CC − трещина в шарошке;
HC − трещины перегрева;
PN − закупорка насадки;
WO − промыв инструмента;
CD − истирание заклиненной шарошки
JD − метал на забое; (промывочного канала);
WT − износ зубков (резцов);
CI − взаимозацепление шарошек;
LC − потеря шарошки;
RG − износ по диаметру;
NO − отсутствие износа.
L − место нахождение износ а:
N − носовый венец (центральный);
M − средние венцы;
G − наружный венец;
A − все венцы. Шарошка №: 1; 2; 3.

2. Износ опоры (B) − износ подшипников или уплотнений.
Открыта я опора:
0 − ресурс опоры не использован;
8 − ресурс использован полностью (шарошка заклинена или утеряна).
Герметизированная опора:
E − работоспособная опора (уплотнение);
F − отказ уплотнений (разрушены, утеряны);
N − невозможность определения состояния опоры (уплотнения).

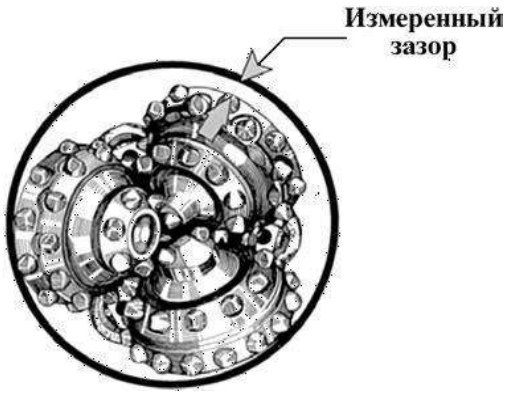


Рис. 2.114. Схема измерения износа по диаметру

3. Износ долота по диаметру:
G − уменьшение диаметра долота, в долях дюйма (1/16 (1,5875 мм)).
При оценке износа по диаметру применяют специальный шаблон (измерительный инструмент) и правило 2/3.
Износ по диаметру равен зазору, измеренному при помощи шаблона (рис.2.114) и умноженному на 2/3 (0,75).
4. Примечание:
O − второстепенный износ; описываются любые другие виды износа долота в дополнение к ранее приведенным в колонке D;
R − причина подъема долота:
BHA − смена компоновки низа бурильной колонны (КНБК);

RIG − ремонт бурового оборудования;
HR − подъем по времени;
DST − пластовые испытания;
CM − обработка. бурового раствора;
TD − проектный забой (колонна);
LIH − потеря инструмента на забое;
DTF − отказ инструмента;
CP − отбор керна;
TQ − рост момента;
LOG − геофизическое исследование скважин (ГИС);
FM – смена геологической обстановки;
PP − изменение давления на стояке;
TW − отворот инструмента (трубы);
DP − разбуривание цементного стакана;
HP − авария;
PR − падение механической скорости проходки;
WC − погодные условия;
DSF − повреждение бурильной колонны.

Приведем практические примеры описания износа шарошечных долот по кодам IADC.

Пример 1. Долото выглядит изношенным в процессе бурения пород тверже предела, на который это долото было рассчитано (рис.2.115). На этот факт указывают сильный износ зубков внутреннего ряда, а также подъем по причине падения механической скорости, вызванной сломом зубков при бурении слишком твердых для данного долота пород. Слишком высокая осевая нагрузка на долото также может привести к подобному внешнему виду долота после подъема. Правильным подбор долота был в случае, если долбление продолжалось не слишком долго, и при этом отсутствуют второстепенные характеристики износа, состояние уплотнения рабочее, и долото не изношено по диаметру. Однако если долбление продолжалось по времени меньше ожидаемого, подбор долота был ошибочным. Долото могло быть слишком «мягким» для пород данного типа, либо осевая нагрузка превышала допустимые значения. Далее приведена оценка его износа по коду IADC: 7.1.BT.M.E.I.WT.PR.

Рис.2.115. Общий вид отработанного долота, описанного в примере

Пример 2. Долото выглядит изношенным в процессе бурения пород тверже предела, на который это долото было рассчитано (рис.2.116). На этот факт указывают сильный износ зубков внутреннего ряда, а также подъем по причине падения механической скорости, вызванной сломом зубков при бурении слишком твердых для данного долота пород. Слишком высокая осевая нагрузка на долото также может привести к подобному

внешнему виду долота после подъема. Правильным подбор долота был в случае, если долбление продолжалось не слишком долго, и при этом отсутствуют второстепенные характеристики износа, состояние уплотнения рабочее, и долото не изношено по диаметру. Однако если долбление продолжалось по времени меньше ожидаемого, подбор долота был ошибочным. Долото могло быть слишком «мягким» для пород данного типа, либо осевая нагрузка превышала допустимые значения. Далее приведена оценка его износа по коду IADC: 5.8.WT.A.3.2.FC.HRS.

Рис.2.116. Общий вид отработанного долота, описанного в примере 2.

2.11. Алмазные долота, долота ИСМ и PDC

Главной особенностью алмазных (классических) долот является наличие в них алмазных режущих элементов (натуральных или искусственных алмазов). В буровых долотах обычно используют наименее ценную разновидность натуральных алмазов − борт, баллас и карбонадо. В производстве долот используют только карбонадо (бразильские технические алмазы) или черные алмазы.

Перед использованием в буровых долотах природные алмазы обычно окатывают путем трения алмаза об алмаз. В результате такой обработки получают более прочные овализованные алмазы, подверженные раскалыванию в меньшей мере, чем остроугольные. Искусственные (синтетические) алмазы по прочности близки к естественным алмазам. Технические показатели алмазных долот во многом зависят от качества и размеров алмазов. Качество алмазов определяют группой и категорией. К высшим группе и категории относятся крупные алмазы диаметром 2−3 мм (от 3 до 12 зерен на карат) и мелкие (до 1000 зерен на карат). Карат равен 0,2 г.

Стальной корпус с присоединительной резьбой по всей поверхности контакта спаян с матрицей. Матрицы изготавливают из композиционного материала, называемого шихтой, состоящей из кобальта и зерен карбида вольфрама, являющегося основным износостойким компонентом. Промывочные отверстия в матрице выходят на торцовую часть долота и переходят в промывочные каналы. Последние делят поверхность матрицы на секторы. На рабочей и калибрующей поверхностях секторов матрицы по определенной схеме размещены и закреплены алмазы. Алмазы закрепляют в процессе изготовления матрицы методами порошковой металлургии. После изготовления долота вылет алмазов над рабочей поверхностью матрицы должен составлять 0,10−0,25 их диаметра.

По форме и направлению пазов, промывочных каналов, рабочих органов и всей рабочей части выделяют алмазные долота двух типов, производимых в России: долота спиральные (ДС) (см. рис. 2.117. а) и радиальные (ДР) (см. рис. 2.117., б).

По размещению алмазов в матрице различают долота с поверхностной вставкой алмазов (однослойные) (рис. 2.118.) и импрегнированные (рис. 2.119.).

Долота с поверхностной вставкой алмазов получают при однослойной укладке относительно крупных алмазов в специальную огнеупорную форму, а импрегнированные

− равномерным перемешиванием мелких и невысокого качества алмазов в поверхностном слое толщиной от 6 до 10 мм.

Диаметры алмазных долот несколько (примерно на 2 мм) меньше диаметров шарошечных долот.

По профилю рабочих поверхностей алмазные долота подразделяются на:

− долота с системой мелких торовидных выступов (ДР, ДИ) (см. рис. 2.117, д);

− долота с системой крупных торовидных выступов (ДК, ДИ, ДУ) (см. рис. 2.117., г);

− долота с гладким профилем рабочих поверхностей (ДР, ДО, ДЛС) (см. рис. 2.117., в).

По способу армирования изготавливаются алмазные долота трех модификаций:

− однослойные долота (ДЛ, ДР);

− импрегнированные долота (ДИ, ДКСИ);

− комбинированные долота с однослойным и импрегнированным армированием (ДУ, ДУС). Долота с поверхностной вставкой алмазов получают при однослойной укладке относительно крупных алмазов в специальную огнеупорную форму, а импрегнированные − равномерным перемешиванием мелких и невысокого качества алмазов в поверхностном слое толщиной от 6 до 10 мм.

Диаметры алмазных долот несколько (примерно на 2 мм) меньше диаметров шарошечных долот.

По профилю рабочих поверхностей алмазные долота подразделяются на:

− долота с системой мелких торовидных выступов (ДР, ДИ) (см. рис. 2.117, д);

− долота с системой крупных торовидных выступов (ДК, ДИ, ДУ) (см. рис. 2.117, г);

− долота с гладким профилем рабочих поверхностей (ДР, ДО, ДЛС) (см. рис. 2.117., в).

По способу армирования изготавливаются алмазные долота трех модификаций:

− однослойные долота (ДЛ, ДР);

− импрегнированные долота (ДИ, ДКСИ);

− комбинированные долота с однослойным и импрегнированным армированием (ДУ, ДУС).

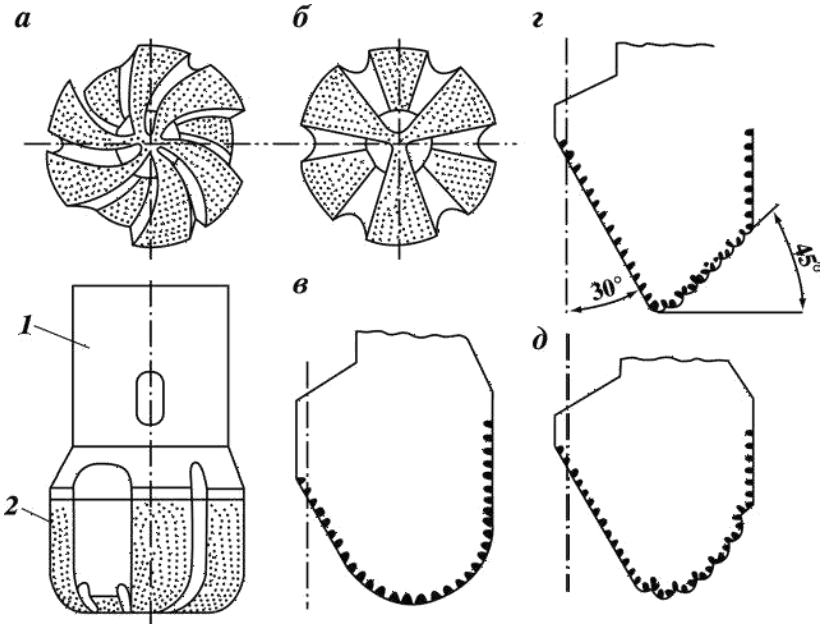


Рис. 2.117. Алмазные долота выпускаемые в России.

Рис. 2.118. Общий вид однослойного алмазного долота, оснащенного крупными натуральными алмазами

Рис. 2.119. Общий вид импрегнированного алмазного долота

Примеры условной записи (шифра) алмазных долот:
ДК-212М6:
Д − обозначение алмазного долота;
К − долото со ступенчатым профилем;
212 − номинальный диаметр, мм;
М − для мягких пород (выполняется однослойным);
6 − номер модели;
ДИ-188С6:
Д − обозначение алмазного долота;
И − импрегнированное долото;
188 − номинальный диаметр долота, мм;
С − для средних пород;
6 − номер модели;
ДР-159СТ1:
Д− обозначение алмазного долота;
Р − радиальное долото;
159 − номинальный диаметр, мм;
СТ − для среднетвердых пород (выполняются только однослойными);
1 − номер модели;
ДКС-138С:
Д − обозначение алмазного долота;
К − долото со ступенчатым профилем;
С − долото с синтетическими алмазами;
138 − номинальный диаметр, мм;
С − для средних пород;
ДЛС-267С1:
Д − обозначение алмазного долота;
Л − однослойное радиальное лопастное;
267 − номинальный диаметр, мм;
С − для средних пород;
1 − номер модели.

2.12. Кодирование износа алмазных (классических) долот

Кодирование износа проводится по системе, принятой в России (ВНИИБТ). Виды износа алмазных долот записывают буквой и цифрами, обозначающими расположение и размер выработки.

Буквами обозначают вид и форму износа:

О − обнажение алмазов;

Ц − выработка в центральной части долота;

Т − кольцевая выработка на торцовой рабочей поверхности;

П − выработка периферийной рабочей поверхности;

d − износ кернообразующего отведения бурильной головки;

D − износ по диаметру.

Результаты общего состояния долота записывают словами:

«в работе» или «отработано».

«В работе» − это значит, что долото после очередного рейса осталось работоспособным и может быть использовано повторно.

«Отработано» − долото непригодно для дальнейшего использования из-за:

− выработки в центральной части долота;

− кольцевой выработки в центральной, торцовой или периферийной частях долота;

− износа долота по диаметру более чем на 3 мм;

− выпадения алмазов в результате эрозионного износа матрицы долота;

− других видов износа.

Примеры записи видов износа алмазных долот:

Ц40 · 20 − выработка в центральной части долота диаметром 40 мм и глубиной 20 мм;

Т140 · 150 · 5 − кольцевая выработка на торцовой поверхности долота между диаметрами 140 и 150 мм глубиной 5 мм;

П208 · 35 − выработка периферийной части долота от края долота до диаметра 208 мм глубиной 35 мм;

О 1/2.Д212.d82 − обнажение зерен алмазов торцовой поверхности на 0,5 размера зерна, износ долота по диаметру до 212 мм, увеличение диаметра кернообразующего отверстия до 82 мм.

Примеры записи износа алмазных долот в буровом журнале: отработано, Д212Т140 · 150 · 5 − долото непригодно к дальнейшему использованию, долото по диаметру сработано до 212 мм (номинальный диаметр был 214,3 мм), на торцевой поверхности образовалась кольцевая выработка между диаметрами 140 и 150 мм глубиной 5 мм; в работе, Д214,3Т140 · 150 · 2Т70 · 80 · 1 − долото пригодно к дальнейшему использованию, диаметр долота не изменен, имеет две торцовые выработки: первую между диаметрами 140 и 150 мм глубиной 2 мм; вторую между диаметрами 70 и 80 мм глубиной 1 мм.

2.13. Долота ИСМ

Конструкция долота ИСМ, разработанного Украинским научно-исследовательским институтом сверхтвердых материалов, приведена на рис. 2.120,2.121, 2.122.

Рис.2.120. Общий вид долота ИСМ радиального типа.

Рис.2.121. Общий вид долота ИСМ торцового типа.

Рис.2.122. Общий вид долота ИСМ секторного типа.

Стальной корпус с присоединительной замковой резьбой на торцовой профильной рабочей поверхности и калибрующей поверхности имеет вставки из сверхтвердого материала «Славутич», обладающего высокой износостойкостью . Вылет вставок над рабочей поверхностью корпуса составляет 3−5 мм. На калибрующей поверхности вставки утоплены, т.е. их вылет равен 0. Для оснащения долот применяют цилиндрические вставки диаметром 8−12 мм с плоскими, полусферическими и клиновыми рабочими торцами.

Рабочие элементы крепятся к стальному корпусу методом пайки.

На обратном конусе вставки размещены по спирали, на его поверхности проточена спиральная канавка для дополнительной циркуляции бурового раствора, выноса шлама и охлаждения вставок.

Буровой раствор из промывочных отверстий поступает в основные и дополнительные промывочные каналы. Основные промывочные каналы делят всю рабочую и калибрующую поверхность долота на секторы.

Долота ИСМ могут быть как с обычной промывкой (отверстия без насадок), так и гидромониторными (с насадками). При этом насадки изготавливаются из твердого сплава согласно ТУ 88 УССР ИСМ-472−75 и ГОСТ 3882−74. Их форма обычно такая же, как и форма насадок для шарошечных долот.

Долота ИСМ с обычной промывкой используют, как правило, при турбинном бурении, а гидромониторные − при роторном способе бурения.

Форма рабочей поверхности вставок марки «Славутич» и количество вставок

определяются физико-механическими свойствами горных пород.

Долота ИСМ выпускаются трех разновидностей: режущие, торцовые и истирающие.

Режущие долота ИСМ предназначены для бурения в мягких и средних пластичных породах. Количество вставок минимально возможное, обеспечивающее не более чем полутора кратное перекрытие забоя. Это позволяет при относительно небольших нагрузках на долото создавать значительные удельные нагрузки. Общее содержание вставок марки «Славутич» в долоте режущей разновидности в 6−10 раз меньше, чем в истирающем ИСМ. Оно возрастает от центра к периферии долота.

Форма рабочей части лопасти может быть либо выпуклой, либо выпукло-вогнутой.

Торцовые долота ИСМ предназначены для забуривания нового ствола при бурении направленных скважин, а также для ликвидации аварий. Кроме того, они применяются в среднемягких горных породах.

Истирающие долота ИСМ предназначены для бурения мягких и средних малоабразивных пород. Они могут быть либо радиальными, либо секторными. Первая конструкция применяется для турбинного бурения, вторая − для роторного и турбинного.

Секторные долота имеют комбинированное вооружение. Их наружный ступенчатый корпус оснащен вставками с клиновидной рабочей головкой, а внутренний − вставками с круглой рабочей головкой. Такое вооружение применяется в долотах, предназначенных для бурения пород перемежающейся твердости.

Примеры условной записи долот ИСМ:

ИСМ-188-РГ-10:
ИСМ − вид долота;
188 − номинальный диаметр, мм;
Р − режущее;
Г − гидромониторное;
10 − номер модели;
ИСМ-292-А-МС:
ИСМ − вид долота;
292 − номинальный диаметр, мм;
А − для аварийных работ;
МС − мягкие и средние породы.
ИСМ-267-МС-2:
ИСМ − вид долота;
267 − номинальный диаметр, мм;
МС − мягкие и средние породы;
2 − номер модели.

2.14. Долота PDC

Общий вид долота PDC (P − polycrystalline, D − diamond, C − cutter) представлен на рис. 2.123.. Долото состоит из корпуса с присоединительной замковой резьбой и рабочей части долота − матрицы с лопастями, оснащенными резцами. В матрице между лопастями в промывочных каналах смонтированы гидромониторные промывочные узлы.

Резцы долот PDC двухкомпонентные. Тело резца состоит из прессованного карбида вольфрама. Рабочая кромка резца упрочнена поликристаллическими синтетическими алмазами толщиной 0,5−0,7 мм.

Упрочнение резцов поликристаллическими алмазами повышает износостойкость резцов, а наличие карбидовольфрамового тела (подкладки) увеличивает пластичность резцов в целом (рис.2.124.).

Размеры резцов и их формы показаны на рис.2.125, 2.126.

Резцы вручную впаиваются в гнезда лопастей специальным припоем, как показано на

рис. 2.127., 2.128.

После оснащения лопастей резцами проводят балансировку долота на специальном стенде, добиваясь минимального дисбаланса сил, действующих на долото при разрушении горной породы. При балансировке минимизируются вибрации долота, что приводит к увеличению скорости бурения, срока службы долота и достижению высокого экономического эффекта. Долота PDC изготавливают двух видов: долота с цельным стальным корпусом и матричные, с твердосплавной матрицей, припаеной к стальному корпусу.

Рис. 2.123. Общий вид долота PDC.

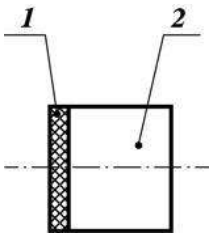


Рис. 2.124. Схема резца долота PDC:
1 − алмазный слой; 2 − твердосплавная основа.

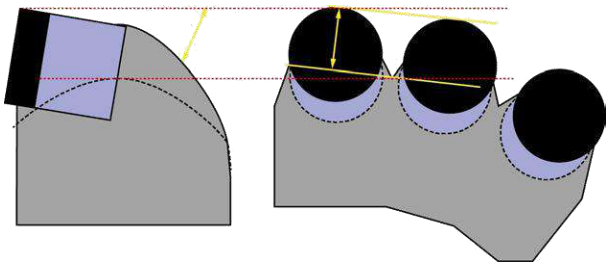


Рис. 2.125. Формы резцов долот PDC.

В долотах PDC первого вида целиковый корпус изготавливается резанием на специальных станках, там же высверливаются гнезда под резцы, в которые их впаивают по специальной технологии. При работе таких долот вместе с резцами изнашивается корпус долота, который не подлежит реставрации.

В матричных долотах корпус с присоединительной резьбой изготавливается из стали резанием, а импрегнированная матрица – методом порошковой металлургии, т.е. в водородной печи шихта (смесь порошкообразного карбида вольфрама и кобальта) спекается при температуре 1300 ^{0}C.

В форму под матрицу (опоку) по шаблону в места, предназначенные под резцы,

вставляют графитовые стержни. После спекания матрицы стержни извлекают, а на их место впаивают резцы. Готовую матрицу по всей плоскости припаивают к стальному корпусу. После этого долото балансируется. При работе таких долот импрегнированная матрица не изнашивается.

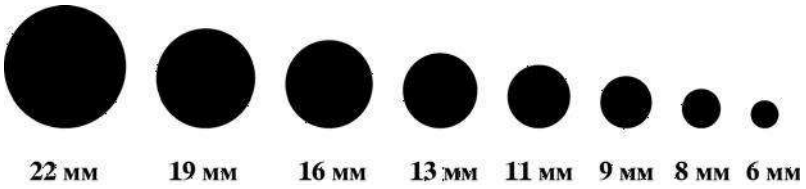


Рис. 2.126. Диаметры резцов долот PDC.

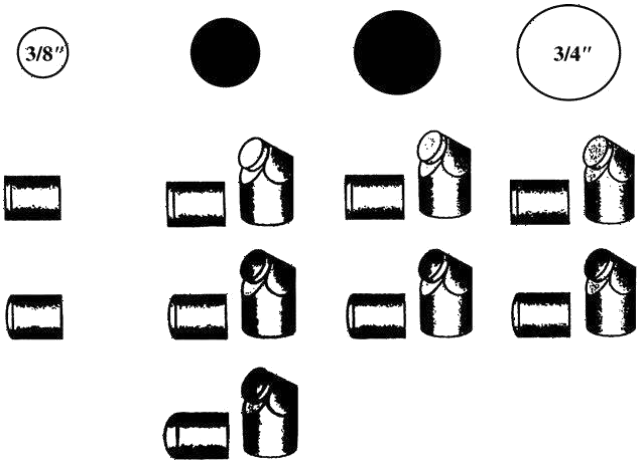


Рис. 2.127. Положение резца в лопасти долота PDC.

Рис. 2.128. Общий вид готового к работе долота PDC.

Изнашиваются в основном резцы. Поэтому такие долота подлежат реставрации. При реставрации изношенные резцы выпаивают, а на их место впаивают новые. За счет реставрации существенно снижается стоимость таких долот.

Особую группу долот PDC составляют бицентричные долота (рис. 2.129, 2.130).

Особенность работы бицентричных долот заключается в том, что при бурении они образуют новый ствол большего диаметра, чем проходной ствол.

Схемы спуска и бурения бицентричными буровыми долотами показаны на рис. 2.131, 2.132, 2.133, 2.134.

Рис. 2.129. Общий вид бицентричного долота

Рис. 2.130. Элементы бицентричного долота

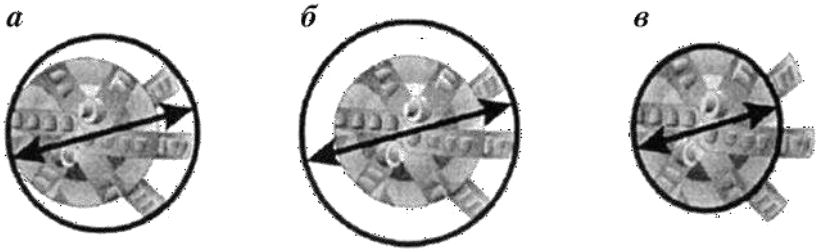


Рис.2.131. Схемы формирования диаметра скважины бицентричным долотом: а − проходной диаметр; б − разбуриваемый диаметр; в − диаметр «пилота»

Рис. 2.132. Схема спуска бицентричного долота в скважину

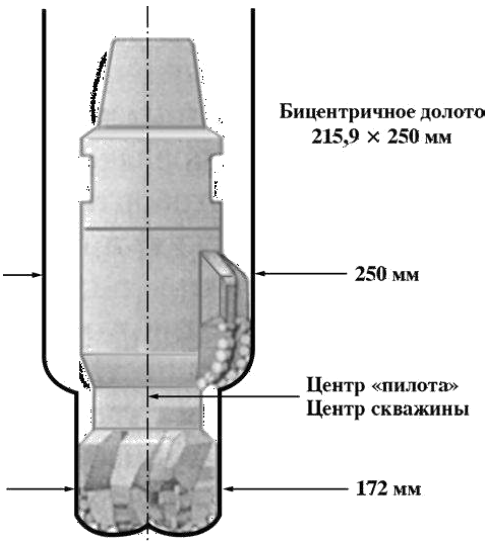


Рис.2.133. Схема бурения скважины бицентричным долотом

Бицентричные долота используют при бурении вторых стволов, при необходимости намывки гравийных фильтров в зоне продуктивного пласта.

В последние годы буровые долота PDC получили широкое применение во всем мире, в том числе и в России за счет их высокой стойкости (тысячи метров на долото) и высоких механических скоростей бурения. На сегодня в России имеется шесть производителей породоразрушающих инструментов PDC: ООО «Азимут», ООО НПП «Буринтех», ОАО НПП «Бурсервис», ОАО «Волга-бурмаш», ЗАО «Проммашсервис», СП ЗАО «Удол», что указывает на повышенный спрос данного инструмента.

Основными мировыми производителями породоразрушающих инструментов PDC являются фирмы США и Китая. Они же являются изготовителями шарошечных и алмазных (классических) породоразрушающих инструментов.

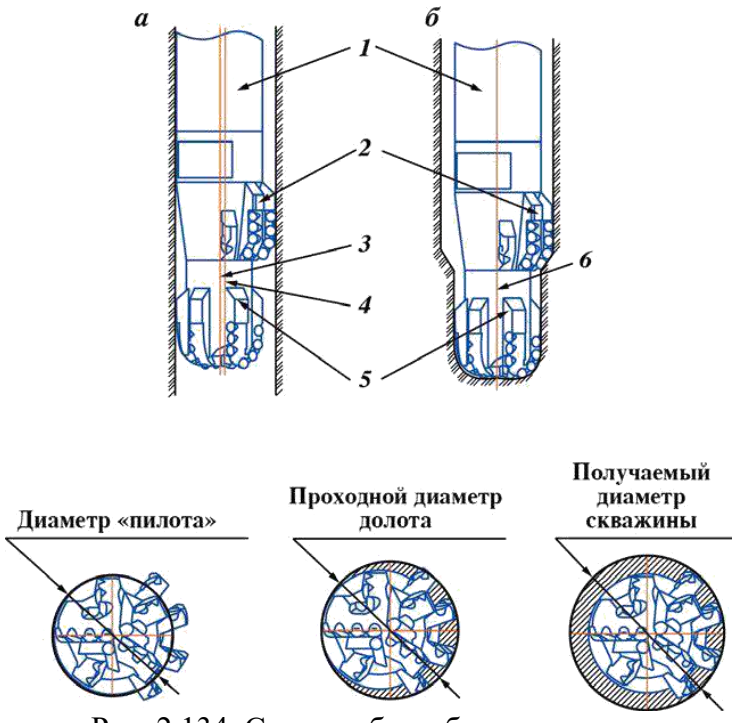


Рис. 2.134. Схема работы бицентричного долота:
а − при спуско-подъемных операциях; б − при бурении; 1 − гидра-влический забойный двигатель; 2 − расширитель; 3 − ось «пилота»; 4 − ось скважины; 5 − «пилот»; 6 − оси «пилота» и скважины (совпадают)

Буровые долота PDC классифицируют по системе IADC (табл.2.2).
Пример условной записи долота PDC S121:
S − стальной корпус;
1 − для мягких пород;
2 − диаметр резцов 19 мм;
1 − короткий профиль.

Таблица 2.2.

Классификация долот PDC по коду IADC

Тип корпуса	Тип горных пород		Диаметр резцов, мм		Тип профиля долота
M – матричный корпус	1	Очень мягкие	2 3 4	19 13 8	1 − короткий «рыбий хвост»
	2	Мягкие	2 3 4	19 13 8	2 − короткий профиль
S – стальной корпус	3	Мягкие средние	2 3 4	19 13 8	3 − средний профиль
	4	Средние	2 3 4	19 13 8	4 − длинный профиль

В связи с широким применением буровых долот PDC в России приведем некоторые общие рекомендации по их эксплуатации:

по осевой нагрузке:

0,25−1,0 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 1,1 тс) при бурении в мягких породах;

0,5−1,1 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 1,4 тс) при бурении в породах средней твердости;

0,7−1,8 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 2,0 тс) при бурении в твердых породах;

0,9−1,8 тс на 1 дюйм диаметра долота (но не более 2,0 тс) при бурении в крепких породах.

по частоте вращения:

100−180 об/мин в неабразивных породах; 60−80 об/мин в абразивных породах;

по гидравлической мощности, подводимой к долоту, на 1 дюйм^2 площади забоя скважины:

2−7 л/с на 1 дюйм^2 площади забоя при использовании бурового раствора на водной основе;

1−5 л/с на 1 дюйм^2 площади забоя при использовании бурового раствора на нефтяной основе.

В табл. 6 приведены рекомендуемые подачи бурового раствора для буровых долот различных диаметров.

Таблица 2.3.

Диаметр долота RDC, дюйм (мм)	Подача насоса, л/мин	Удельный расход на 1″ диаметр долота, л/мин
17 1/2 (444,5)	3 000−4 000	170−230
12 1/4 (331,1)	2 300−2 800	190−230
8 1/2 (215,9)	1 200−1 500	140−180
6 (152,4)	600−800	100−135

2.15. Кодирование износа долот PDC

Очень важно ввести аналогичную систему описания износа и для долот с неподвижными резцами, т.е. всех не шарошечных (безопорных).

В 1987 г. такая система была разработана подкомитетом по буровым долотам Международной ассоциации буровых подрядчиков. В 1991 г. система была отредактирована. Систему описания износа можно применять для не шарошечных долот всех типов, включая долота с природными поликристаллическими (PDC) и термостойкими поликристаллическими (TSP) алмазами, а также импрегнированные бурильные головки и долота безопорные, не оснащенные алмазным вооружением (ИСМ).

Система описания износа едина для буровых долот и бурильных головок всех конструкций. Таблица описания износа долот стандарта IADC включает коды для обозначения износа шарошечных долот и долот с неподвижными резцами. Параметры износа вносятся в соответствующие восемь колонок.

Табл. 2.4. аналогична схеме кодирования износа шарошечных долот по системе IADC: колонки 1−4 − код износа вооружения («Вооружение»); колонка 5 (B) − код износа опоры («Подшипник, уплотнение»), так как в безопорных долотах (долотах с неподвижными резцами) нет опор, в этой колонке всегда ставится знак «X»; колонка 6 (G) − износ долота по диаметру («Диаметр»); колонки 7 и 8 − второстепенный износ (или вторичные характеристики износа) и причина подъема («Второстепенный износ» и «Причина подъема»).

Таблица 2.4.

Кодирование износа безопорных долот по IADC

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16″	Второстепенный износ	Причина подъема
2	6			X			

Степень износа внутренних и внешних рядов вооружения долота с поверхностно-вставленными алмазами определяется при помощи линейной шкалы от 0 до 8, аналогично шарошечным долотам. Цифры увеличиваются с ростом степени износа: 0 означает отсутствие износа, 8 − полный износ, 4 − 50%-ный износ.

Износ резца долота PDC определяется по линейной шкале от 1 до 8 от края до края алмазной пластины, независимо от формы, размера, типа или вылета резца.

Степень износа резцов схематично показана на рис. 2.135. Для определения степени износа записывают среднюю величину износа каждого сектора.

Как показано (см. рис. 2.135), 2/3 радиуса представлено внутренними рядами. Пять

резцов имеют степень износа «2».

Проведем расчет путем определения средней степени износа для каждого резца в группе из пяти:

(4 + 3 + 2 + 1 + 0)/ 5 = 2.

Для сектора «Внешние ряды» степень износа рассчитывается аналогично:

(5 + 6 + 7)/3 = 6.

Таким образом, степень износа внешних рядов − «6».

Цифры вносят в таблицу описания износа долот стандарта IADC (табл. 2.5.).

В колонках 3 и 7 указывают характеристики износа, т.е. наиболее заметные изменения физического состояния применяемого долота по сравнению с новым, используя двухбуквенные коды (табл. 2.5) На рис. 2.136, 2.137. показаны характеристики износа.

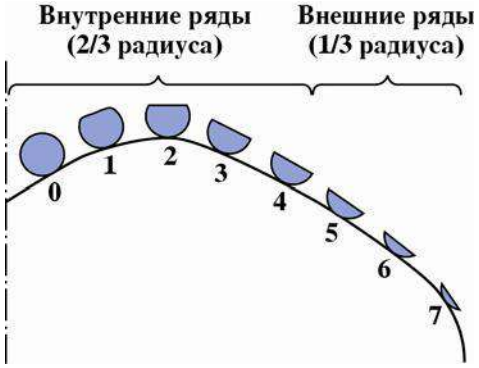


Рис. 2.135. Схема износа вооружения (внутренние и наружные венцы) (для бурильной головки осевая линия будет проходить по внутреннему диаметру).

Таблица 2.5.

Кодирование износа безопорных долот по IADC

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахож-дение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16″	Второстепенный износ	Причина подъема
		WT		X		RO	
П р и м е ч а н и я: 1. В колонке «Местонахождение» укажите номер (а) шарошки (шарошек). 2. При отсутствии износа поставьте Л/О в колонке «Описание износа». 3. При отсутствии второстепенного износа поставьте Л/О в колонке «Второстепенный износ»							

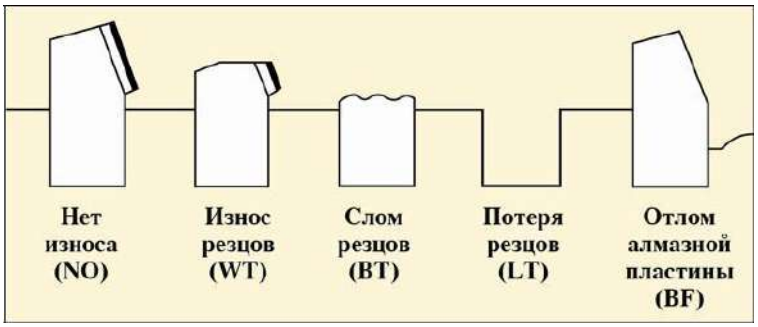


Рис. 2.136 Формы износа твердосплавных резцов, запрессованных в тело полости долота.

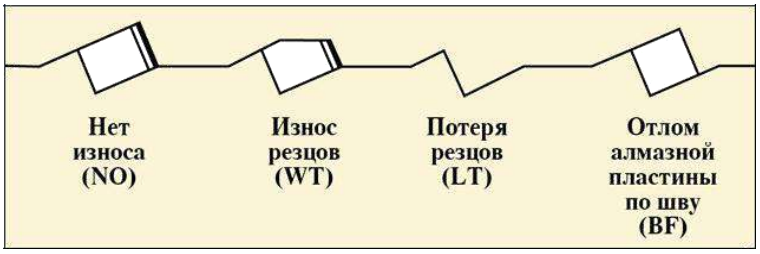


Рис. 2.137. Формы износа твердосплавных резцов

Кодовые обозначения типов второстепенного износа:
∗BC − слом шарошки;
CR − кернение долота;
LN − потеря насадки;
RO − кольцевой износ;
BF − отлом алмазной пластины по шву;
CT − скол зубков (резцов);
LT − потеря зубков (резцов);
SD − повреждение козырька;
BT − скол зубков (резцов);
ER − эрозия;
OC − эксцентричный износ;
SS − самозатачивание резцов;
BU − образование сальника;
FC − затупление верхушек резцов;
PB − механическое повреждение при СПО;
TR − трекинг;
∗CC − трещина в шарошке;
HC − трещины перегрева;
PN − закупорка насадки;
WO − промыв инструмента;
∗CD − истирание заклиненной шарошки (промывочного канала);
JD − метал на забое;
WT − износ зубков (резцов);
CI − взаимозацепление шарошек;
∗LC − потеря шарошки;
RG − износ по диаметру;
NO − отсутствие износа;
RR − подлежит повторному спуску;
NR − не подлежит повторному спуску.
Примеры описания износа долот PDC показаны на рис. 2.138, 2.139, 2.140.

Рис. 2.138. Износ резцов (WT)

Рис. 2.139. Скол резцов (BT)

Рис. 2.140 Кернение долота (CR)

В колонке «Местонахождение» указывается местоположение износа вооружения, описанного в колонке 3.

На рис. 2.141. показаны четыре существующих профиля долота с неподвижными резцами и коды для описания местоположения износа. Один (или больше) из этих кодов используют при указании местоположения характеристики износа.

В колонке G указывают износ диаметра долота по калибру. Буква I означает сохранение диаметра. Уменьшение наружного диаметра измеряется в 1/16″.

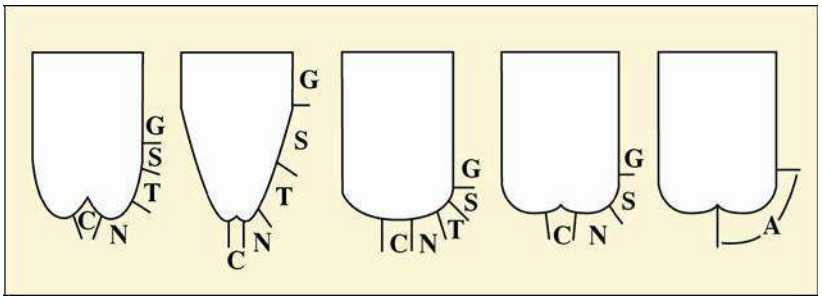


Рис. 2.141. Профили долот с неподвижными резцами:
C − конусный сектор; N − торцевой сектор; T − крыло; S − плечевой сектор; G − наружный диаметр; A − все участки

Приведем обозначения износа долот с фиксированными резцами:
I − сохранение диаметра;
1/16 − износ по диаметру до 1/16″;
2/16 − износ по диаметру от 1/16″ до 1/8″;
3/16 − износ по диаметру от 1/8″ до 3/16″;
4/16 − износ по диаметру от 3/16″ до 1/4″.

Кодовые обозначения причин подъема долота:
BHA − смена КНБК;
DMF − отказ забойного двигателя;
DSF − повреждение бурильной колонны;
DST − испытания пластов;
DTF − отказ инструмента;
LOG − ГИС (каротаж, инклинометр);
RIG − ремонт бурового оборудования;
CM − обработка бурового раствора;
CP − отбор керна;
DP − разбуривание цементного стакана;
FM − смена геологической обстановки;
HP − авария;
HR − подъем по времени;
PP − изменение давления на стояке;
PR − падение скорости проходки;
TD − проектный забой (колонна);
TQ − рост крутящего момента;
TW − отворот инструмента (трубы);
WC − погодные условия;
WO − промыв бурильной колонны.

Приведем практические примеры описания износа долот с фиксированными резцами.

Пример 1. Долото R437GN применялось для горизонтального бурения глинистых сланцев. КНБК включала забойный двигатель 6 3/4" Mach 1 с фиксированным углом перекоса. Во время первого долбления было пробурено 118 м за 8,5 ч. Долото поднято с глубины 1433 м. Механическая скорость бурения составляла 13,9 м/ ч. При обследовании долота после подъема не было обнаружено признаков износа (рис.2.142.).

Рис.2.142. Общий вид долота после подъема. Спецификация долота: тип R437GN; размер 8,5″; общая площадь потока 0,6

Результаты обследования внесены в табл. 2.4.

Таблица 2.4.

Кодовое описание износа долота R437GN (пример 1)

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16″	Второстепенный износ	Причина подъема
0	0	NO	A	X	I	NO	TD

Пример 2. Долото R437GN применялось при бурении интервала от хрупких до вязких глин и песчаника в горизонтальной скважине. Было пробурено 387 м за 29,5 ч со средней механической скоростью 13,1 м/ч.

КНБК включала забойный двигатель 6 3/4″ Mach 1 с изменяемым углом перекоса. Долото поднято с глубины 1820 м по причине низкой механической скорости бурения. После поднятия долота выяснилось, что снижение механической скорости бурения произошло по причине кернения долота и потери всех четырех насадок, а на оставшихся резцах не было обнаружено значительных признаков износа (рис.2.143.).

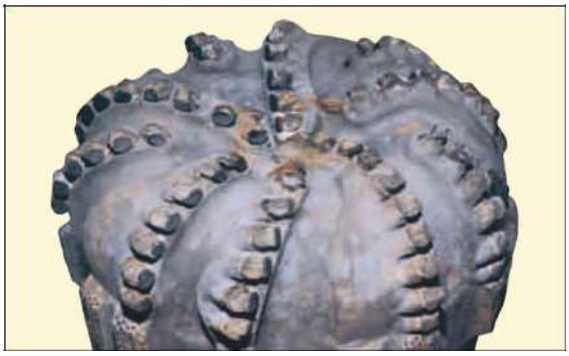


Рис.2. 143. Общий вид долота. Спецификация долота: тип R437GN; размер 8,5″; общая площадь потока 0,6

Результаты обследования внесены в табл. 10.

Пример 3. В районе Северного моря долото R435SG применялось на протяжении четырех СПО. Всего было пробурено 977 м за 166,3 ч в основном в соленых и агидритных породах (цехштейн). В трех из четырех спусков КНБК включала забойный двигатель Mach 1 DTU (210−320 об/мин). При обследовании после двух первых спусков не было выявлено существенного износа вооружения.

Таблица 2.5.

Кодовое описание износа долота R437GN (пример 2)

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16″	Второстепенный износ	Причина подъема
6	2	CR	C	X	T	LN	PR
Примечание. Хотя произошла потеря всех четырех насадок, в колонке «Описание износа» указано «Кернение долота» (CR), так как главной причиной потери насадок является кернение. Потеря насадок (LN) отмечена в колонке «Второстепенный износ».							

В колонке «Причина подъема» в обоих случаях было указано «Отказ инструмента» (DTF).

После третьего спуска (пробурено 389 м за 89,5 ч) долото было поднято по причине смены КНБК. При этом наблюдался равномерный износ ±20 % внутренних и внешних рядов вооружения.

При обследовании долота после четвертого спуска было выявлено 50 % износа внутренних рядов и 60 % износа внешних рядов вооружения. Также наблюдались сильная эрозия и потеря резцов в секторе крыла (рис. 2 .144).

Результаты обследования внесены в табл.2.6. Содержащуюся в описании износа

информацию можно использовать для нескольких целей. С ее помощью изготовители долот могут проанализировать прочность конструкции и область применения своей продукции.

Буровики могут усовершенствовать программы бурения. Систему оценки можно компьютеризировать и создать всемирную базу данных с целью повышения эффективности подбора долот для конкретных условий применения.

Рис. 2.144. Общий вид долота после четвертого спуска. Спецификация долота: тип R435SG; размер 12,25″; общая площадь потока 0,65− 1,60.

Таблица 2.6.

Кодовое описание отработанного долота R435SG (пример 3)

Таблица описания износа долот стандарта IADC							
Вооружение				B	G	Примечание	
Внутренние ряды	Наружные ряды	Описание износа	Местонахождение	Опора. Уплотнение	Диаметр 1/16″	Второстепенный износ	Причина подъема
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
Спуск 1							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
Спуск 2							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
Спуск 3							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF
Спуск 4							
0	0	NO	A	X	I	NO	DTF

Основной причиной введения единой системы оценки является необходимость стандартизации сведений о долоте, независимо от места и конкретных условий его применения.

2.16. Шарошечные и лопастные бурильные головки гост 21210−75

Породоразрушающий инструмент для бурения скважин кольцевым забоем называют бурильными головками.

Бурильные головки предназначены для бурения скважин с отбором керна. Они могут использоваться со стационарными либо съемными керноприемниками.

Бурильные головки могут быть шарошечными, лопастными, фрезерными, алмазными (классическими) ИСМ или PDC.

Шарошечные бурильные головки (рис. 2.145) выполняются с одной, тремя, четырьмя, пятью, шестью, восемью и более рабочими органами. Шарошки в бурильной головке могут быть:

− коническими;

− одно-, двух-, или трехконусными;

− в виде усеченного конуса;

− цилиндрическими;

− цилиндроконическими;

− сферическими;

− чечевицеобразными.

Число и конструкция подшипников в опоре каждой шарошки также могут быть различными в зависимости, главным образом, от формы исполнения, габаритных размеров шарошки и бурильной головки.

Лопастные бурильные головки предназначены для отбора керна в мягких породах роторным способом в комплекте с несъемным керноприемником (табл.2.7).

Промывочный узел состоит обычно из нескольких каналов, просверленных в лапах или корпусе бурильной головки. Выходные промывочные отверстия во избежание размыва керна располагаются между шарошками подальше от центра.

Важными параметрами конструкции бурильной головки являются высота и коэффициент керноприема.

Высотой керноприема принято называть расстояние от зоны образования керна до кернорвателя, а коэффициентом керноприема − отношение к этому расстоянию диаметра керна.

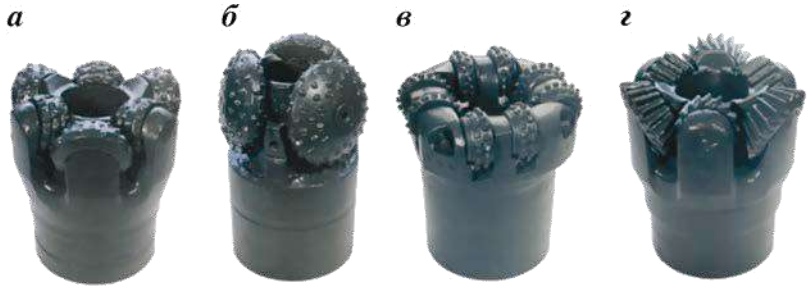


Рис.2.145. Общий вид шарошечных бурильных головок:
а − ТКЗ; б − СЗ; в − МСЗ; г − СТ

Таблица 2.7.

Типы, область применения бурильных головок и исполнение их рабочей части по ГОСТ 21210−75

Тип	Область применения	Исполнение рабочей части
М	Бурение мягких устойчивых пород	Лопасти со вставными твердосплавными зубцами, с наплавкой твердого сплава и без наплавки
МСЗ	Бурение мягких пород с пропластками пород средней твердости	Шарошки со вставными твердосплавными зубками
СЗ	Бурение пород средней твердости	
СТ	Бурение пород средней твердости с пропластками пород твердых	Шарошки со вставными твердосплавными зубками или фрезерованными зубцами с наплавкой или без наплавки твердым сплавом
ТЗ	Бурение твердых пород	Шарошки со вставными твердосплавными зубками
ТКЗ	Бурение твердых абразивных пород с пропластками пород крепких	

Пример условного обозначения бурильной головки для керноприемных устройств без съемного керноприемника (К) с наружным диаметром D = 139,7 мм, внутренним диаметром d = 52 мм для бурения мягких пород:

К 139,7/52 М ГОСТ 21210−75.

Пример условного обозначения бурильной головки для керноприемных устройств со съемным керноприемником (КС) с наружным диаметром D = 187,3 мм, внутренним диаметром d = 40 мм для бурения пород средней твердости:

КС 187,3/40 СЗ ГОСТ 21210−75.

2.17. Алмазные бурильные головки и бурильные головки ИСМ и PDC

Промышленностью выпускаются алмазные (классические) бурильные головки, оснащенные как природными, так и синтетическими алмазами (рис. 2.146, 2.147).

Бурильные головки первого класса изготавливаются трех разновидностей: однослойные радиальные, однослойные ступенчатые и импрегнированные.

Однослойные радиальные бурильные головки выпускаются серийно одного типа СТ двух модификаций в четырех моделях:

Рис.2.146. Общий вид импрегнированной алмазной бурильной головки

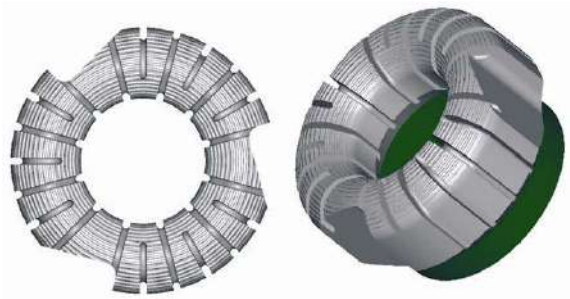


Рис. 2.148. Общий вид однослойной алмазной бурильной головки

КР 159/67 СТ2;

КР 188/80 СТ2;

КР 212/80 СТ2;

КР 188/40 СТ1.

В записи бурильных головок приняты следующие обозначения:

К − бурильная головка;

Р − радиальная разновидность;

159/67 − номинальный наружный диаметр бурильной головки/диаметр керноприемного отверстия, мм;

СТ − тип бурильной головки;

2 − порядковый номер модификации.

Однослойные ступенчатые бурильные головки выпускаются двух типов М и С:

тип М − одной модификации 2 в одной модели:

КТ 188/40 М2;

типа С − двух модификаций 3 и 5 в двух моделях:

КТ 138/52 С3;

КТ 138/45 С5.

Импрегнированные бурильные головки выпускаются только типа С модификации 3 в двух моделях:

КИ 188/80 С3;

КИ 212/80 С3.

В бурильных головках обеих моделей с твердосплавной матрицей перемешаны алмазы XXXIV группы.

Бурильные головки второго класса с синтетическими алмазами изготавливаются двух разновидностей: однослойные и импрегнированные ступенчатые.

Они выпускаются только одного типа С и одной модификации 3.

Однослойные ступенчатые бурильные головки изготовлялись в двух моделях:

КТС 188/80 С3; КТС 212/80 С3.

Импрегнированные − в трех моделях:

КТСИ 138/52 С3; КТСИ 188/8 С3;

КТСИ 212/80 С3.

Алмазные бурильные головки производятся в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 39.026−76.

Бурильные головки для колонковых снарядов со съемным керноприемником изготавливаются с ниппельной наружной присоединительной резьбой, а бурильные головки для колонковых снарядов с несъемным керноприемником − с муфтовой внутренней резьбой.

ОСТ 39.026−76 также предусмотрено выполнение бурильных головок для колонковых снарядов со съемным керноприемником следующих семи размеров, мм:

185,7/40;

188,9/40;

211,1/60;

214,3/60;

242,1/60;

267,5/60;

292,9/60.

Бурильные головки размерами 185,7/40 и 188,9/40 выпускаются с ниппелем З-147, размером 211,1/60 и 214,3/60 − с ниппелем З-161, а остальные − с ниппелем З-171. Бурильные головки для керноприемных снарядов с несъемным керноприемником производятся следующих размеров, мм:

130,4/60;
138,1/60;
141,3/52;
147,6/52;
157,1/67;
163,5/67;
169,8/67;
185,7/80;
188,9/80;
195,3/80;
211,1/80;
214,3/80;
220,7/80;
242,1/100;
267,5/100;
292,9/100;
308,7/100;
317,6/100;
346,8/100.

Бурильные головки ИСМ, вооруженные вставками со сверхтвердым материалом «Славутич», выпускаются в настоящее время одной и той же разновидности (рис. 72) и одного типа МС.

Эти бурильные головки армируются вставками с материалом «Славутич» по

наружной рабочей поверхности шести лопастевидных рабочих органов, составляющих единое целое с продолговатым полым корпусом, а также по внутренней центральной части, обеспечивающей образование керна.

Изготовление таких бурильных головок проводится в соответствии с ТУ 88 УССР ИСМ 472−76. Этими техническими условиями предусматривается изготовление бурильных головок под общим шифром ИСМ трех типов: М, МС и С.

Общий вид бурильных головок ИСМ и PDC представлен на рис. 2.149, 2.150. Бурильные головки, как и буровые долота, имеют стальной корпус с присоединительной резьбой и рабочие органы в виде лопастей, оснащенные резцами из поликристаллических синтетических алмазов.

Бурильные головки могут быть цельнометаллические стальные и матричного типа, аналогично буровым долотам. Технология изготовления бурильных головок PDC аналогична технологии изготовления буровых долот.

Бурильные головки PDC применяют для бурения с отбором керна в породах от мягких до средней твердости.

Рис.2.149. Общий вид бурильных головок ИСМ

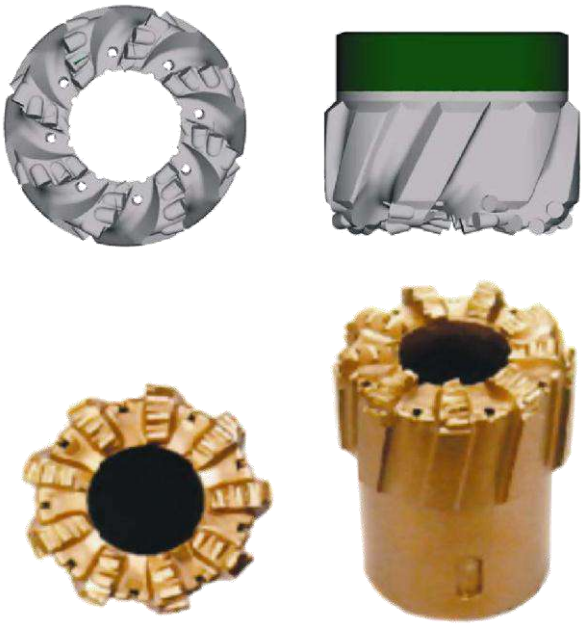


Рис.2.150. Общий вид бурильной головки PDC

МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

В.Н. Калашников, Г.А. Усов,

Л.И. Кралина, Ф.П. Сердюков

Методические указания по выполнению контрольной работы «*Техника разведки*»

для студентов специальности

21.05.03 Технология геологической разведки

очного и заочного обучения

Екатеринбург

2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……....3

Занятие 1. Разработка конструкции скважины……..4

Занятие 2. Выбор типа породоразрушающего инструмента и расчет параметров режима вращательного бурения…….…..5

Занятие 3. Выбор типа породоразрушающего инструмента для канатно-ударного бурения и расчет параметров режима бурения……9

Список литературы…….11

Приложение 1 Исходные данные для составления конструкции скважины…….....12

Приложение 2. Рекомендуемый диаметр керна по полезному ископаемому…….……..…13

Приложение 3. Графическое оформление конструкции скважины……13

Приложение 4. Значения рекомендуемых нагрузок на один основной резец твердосплавной коронки (даН)……...…14

Приложение 5. Удельный расход промывочной жидкости (10^{-3} м^3/с) на 1м диаметра коронки ……14

Приложение 6. Рекомендуемые значения удельной осевой нагрузки для алмазных коронок, 10^4 даН/м^2……14

Приложение 7. Значения удельных нагрузок, окружной скорости вращения долота и скорости восходящего потока промывочной жидкости для бескернового бурения ……..…….....15

Приложение 8. Исходные данные для расчета режимных параметров канатно-ударного бурения……..…….....16

Приложение 9. Удельный расход промывочной жидкости…….……16

ВВЕДЕНИЕ

Успех разведочного бурения во многом зависит от правильного выбора конструкции скважины, которая должна обеспечить ее безаварийную проходку при соответствующем качестве буровых работ.

При бурении разведочных скважин применяется различный породоразрушающий инструмент: твердосплавные и алмазные коронки. При бескерновом бурении – лопастные, шарошечные и алмазные долота. При канатно-ударном бурении – плоские, двутавровые, крестовые и округляющие долота. Применение того или иного вида породоразрушающего инструмента зависит от физико-механических свойств горных пород и назначения скважины. Рациональный выбор породоразрушающего инструмента и параметров режима бурения определяют производительность бурения и его экономическую эффективность.

Занятие 1

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИНЫ

Задание: Разработать конструкцию скважины согласно геологического разреза, приведенного в приложении 1, и дать спецификацию бурового инструмента для спуска обсадных труб.

Цель занятия: изучить типы обсадных труб и буровой инструмент для спуска их в скважину. Освоить методику составления конструкции скважины.

1.1. Назначение обсадных труб.

Обсадные трубы служат для крепления стенок скважин в следующих случаях:

1) для закрепления устья скважины с целью предохранения его от размыва и отвода промывочной жидкости;
2) для закрепления (кондуктором) залегающих сверху наносов и других неустойчивых пород;
3) для перекрытия зон разрушенных и раздробленных пород, которые не закрепляются глинистым раствором, а после проходки не могут быть затампонированы быстросхватывающими смесями;
4) для перекрытия зон интенсивных и катастрофических поглощений промывочных жидкостей;
5) перед пересечением полезного ископаемого (рыхлые руды, бокситы), над которыми залегают неустойчивые породы, дающие осыпи;
6) перед переходом с промывки глинистым раствором на промывку технической водой.

1.2. Требования к конструкции скважины.

Конструкция скважины – это схема изменения диаметров бурения, обсадных труб и их глубин, обеспечивающих безаварийную проходку скважины и выполнение геофизических и гидрогеологических исследований при соответствующем качестве бурения.

Конструкция скважины должна быть наиболее простой – малоступенчатой. В этом случае облегчается бурение, сокращается набор бурового инструмента и расход обсадных труб, снижается стоимость работ. Простота конструкции достигается правильным применением качественных промывочных жидкостей и закреплением маломощных зон осложнений без применения обсадных труб. Конструкция скважины должна обеспечивать получение диаметра керна в соответствии с геологическими требованиями и применения форсированных режимов бурения.

1.3. Выбор конструкции скважины

В основу составления конструкции скважины положены следующие факторы: конечный диаметр бурения, определяемый целевым назначением скважины (диаметр бурения по полезному ископаемому, диаметр фильтра для скважины на нефть и газ), устойчивостью пород геологического разреза и необходимостью их закрепления обсадными трубами (смотри пункт 1.1).

Поэтому конструкция скважины составляется по методу снизу вверх. Вначале определяется конечный диаметр скважины, исходя из требований минимально допустимого диаметра керна по полезному ископаемому (см. приложение 2). Дальше диаметр скважины будет определяться устойчивостью выше залегающих пород и необходимостью их закрепления обсадными трубами.

Для обеспечения нормального спуска обсадных колонн, перекрывающих валунно–галечные отложения или значительные мощности песчано-глинистых пород, а также колонн, подлежащих цементированию, необходимо предусмотреть диаметр скважины на один диаметр больше диаметра колонны. После разработки конструкции скважины

приводится ее описание сверху вниз с обоснованием смены диаметра и установки обсадных колонн.

Конструкция скважины выполняется графически с соблюдением вертикального масштаба. Прилагается спецификация бурового инструмента для спуска обсадных труб в скважину.

Занятие 2

ВЫБОР ТИПА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ

Задание. Выбрать тип породоразрушающего инструмента для вращательного бурения в соответствии с физико-механическими свойствами горных пород (приложение 3), подобрать состав бурового снаряда (компановка колонкового набора, тип и диаметр бурильных труб) и определить параметры режима бурения.

Цель занятия: изучить типы твердосплавных, алмазных коронок и долот для бескернового бурения, а также технологический буровой инструмент: бурильные и утяжеленные трубы, колонковые трубы, переходники, расширители, кернорватели; освоить методику выбора параметров режима бурения.

2.1 Породоразрушающий инструмент для бурения разведочных скважин вращательным способом и область его применения.

Тип породоразрушающего инструмента выбирается с учетом физико-механических свойств горных пород и целевого назначения скважины.

Твердосплавные коронки применяются для бурения горных пород от I до VIII категории по буримости и по конструктивному исполнению подразделяются на ребристые, резцовые и самозатачивающиеся.

Таблица 1

Область применения твердосплавных коронок

Группа коронок	Тип коронок	Категория пород по буримости								Характеристика пород
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Ребристые	М1, М2, М5	х	х	х	х					Мягкие с прослоями пород средней твердости
Резцовые	СМ-4					х	х	х		Монолитные и перемежающиеся породы. Монолитные и трещиноватые
	СМ-5					х	х			
	СМ-6						х	х		
	СТ-2				х	х	х			
Самозатачивающиеся	СА1						х	х	х	Плотные, тонко и мелкозернистые. Слаботрещиноватые. Перемежающиеся по твердости
	СА2						х	х	х	
	СА4						х	х	х	
	СА5						х	х	х	
	СА6						х	х	х	

Алмазные коронки применяются для бурения твердых и крепких абразивных пород VI-XII категории по буримости.

В настоящее время в зависимости от расположения объемных алмазов выпускаются следующие коронки:

а) однослойные – с расположением объемных алмазов в один слой;

б) импрегнированные – объемные алмазы расположены без определенного порядка, т.е. перемешаны с материалом матрицы;

в) зубчатые – режущая кромка зуба армируется по поверхности крупными полированными алмазами, кроме того, вершина каждого зуба армирована по всему объему импрегнированными алмазами с зернистостью 120-200 шт./карат.

Зубчатые алмазные коронки целесообразно использовать в породах VI-VII категории по буримости.

Однослойные коронки дают наилучшие результаты в плотных, монолитных малоабразивных породах VIII-IX категории по буримости.

Импрегнированные коронки рекомендуют использовать в твердых, трещиноватых и абразивных породах X-XII категории по буримости.

Бурение скважин сплошным забоем осуществляется при детальной разведке, по хорошо изученным вмещающим породам. Для бурения применяются лопастные, шарошечные и алмазные долота.

Таблица 2

Область применения долот при бескерновом бурении

Тип долота	Категория пород по буримости									Характеристика пород
	I-IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Лопастные долота	x									Мягкие и пластичные породы
2Д	x									
3Л	x									
ИР		x	x	x						
ИРГ		x	x							
Пикобуры	x	x								
Шарошечные										Мягкие с пропластками пород средней твердости. Средней твердости. Твердые породы
МС	x									
С		x	x	x						
Т				x	x	x				
ТК						x	x			С пропластками крепких пород. Крепкие. Весьма крепкие. Малоабразивные твердые
К							x	x		
ОК								x	x	
ДДА				x	x	x				
Дисковое долото		x	x							Средней твердости
Алмазные долота										Плотные, монолитные породы. Крепкие, абразивные породы
08А3 и										
09А3				x	x	x				
08И3							x	x	x	

Шарошечные долота имеют различную конструкцию. Конструктивные особенности долота указываются в его шифре. Первые цифры в шифре долота указывают количество шарошек (I, II, III), после дефиса указывается диаметр, тип долота, а после второго дефиса – система промывки (Ц – центральная, Г – гидромониторная) и тип опоры (А – с двумя подшипниками скольжения, В – с подшипником качения).

Например, долото II-132 М-ГВ

Долото двухшарошечное, диаметр 132 мм, тип М, с гидромониторной промывкой, опора на подшипнике качения.

2.2. Компоновка бурового снаряда

Колонковый набор – часть бурового снаряда, предназначенная для разрушения горной породы, приема и сохранения керна. Простейший колонковый набор состоит из породоразрушающего инструмента, колонковой трубы и переходника. В колонковый набор могут также входить расширитель (при алмазном бурении), кернорватель и шламовая труба.

При бурении сплошным забоем в зависимости от диаметра бурения могут применяться различные компоновки бурового снаряда. При бурении скважин небольшого диаметра (76-112 мм) компоновка бурового снаряда состоит из долота, утяжеленных бурильных труб (УБТ) и бурильных труб. При бурении скважин диаметром более 151 мм в состав бурового снаряда включают долото, направляющую трубу, УБТ. При бурении хрупких пород большим диаметром буровой снаряд состоит из долота, шламовой трубы закрытого типа, УБТ. Шламовая труба служит для сбора шлама, который не может быть вынесен потоком промывочной жидкости на поверхность.

2.3. Проектирование параметров режима бурения.

При вращательном бурении параметрами режима бурения являются: осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент, частота вращения и расход промывочной жидкости.

2.3.1. Твердосплавное бурение

Осевую нагрузку на твердосплавную коронку определяют, исходя из рекомендуемой нагрузки на один резец (объемный), обеспечивающий объемный процесс разрушения породы, и рассчитывают по формуле

$$P = p_0 * m \quad (2.1)$$

где P – осевая нагрузка на коронку, даН;

p_0 – рекомендуемая нагрузка на один основной резец, даН;

m – число основных резцов в коронке, шт;

При бурении трещиноватых или переслаивающихся пород с резким различием по твердости следует уменьшать рекомендуемую нагрузку на 30-50%.

Частота вращения коронки рассчитывается: исходя из рекомендуемых значений окружной скорости вращения коронки, которые применяются тем больше, чем меньше диаметр коронки.

Частота вращения коронки в об/мин рассчитывается по формуле

$$n = \frac{v_0 * 60}{\pi * D_{\text{ср}}} \quad (2.2)$$

где v_0 – окружная скорость коронки, м/с;

$D_{\text{ср}}$ – средний диаметр коронки, м;

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{н}} + D_{\text{вн}}}{2}$$

где $D_{\text{н}}$ – наружный диаметр коронки, м;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр коронки, м.

Рекомендуемые окружные скорости для твердосплавных коронок приведены ниже:

Коронки	Ребристые	Резцовые	Самозатачивающиеся
v_0, м/с	0,7-1,5	1-2,5	0,7-1,5

При бурении трещиноватых пород и неоднородных по твердости рекомендуется снижать частоту вращения коронки на 20-30%. При увеличении глубины скважины частота вращения должна уменьшаться, так как возрастают затраты мощности на холостое вращение бурового снаряда.

Количество промывочной жидкости выбирается в зависимости от физико-механических свойств горных пород, диаметра бурения. Расход промывочной жидкости можно определить по формуле

$$Q = k * D \quad (2.3)$$

где Q – расход промывочной жидкости, м^3/с

k – удельный расход промывочной жидкости на 1 м диаметра коронки, м^3/с

D – наружный диаметр коронки, м

2.3.2. Алмазное бурение

Экспериментальными исследованиями установлено и практикой бурения доказано, что наибольшее влияние на механическую скорость алмазного бурения оказывает частота вращения. В связи с этим алмазное бурение целесообразно вести при возможно высокой частоте вращения коронки, допускаемой состоянием бурового снаряда, а также характером разбуриваемых пород и при отсутствии вибрации или возможном ее снижении.

Осевая нагрузка на коронку определяется с учетом физико-механических свойств горных пород и заданной частоты вращения коронки. Оптимальная осевая нагрузка может быть рассчитана на основании значений удельной нагрузки на 1 м рабочей площади торца алмазной коронки рекомендуемой для различных категорий пород по формуле

$$P = p_0 * S \qquad (2.4)$$

где P – осевая нагрузка на коронку, даН;

p_0 – удельная нагрузка на 1 м^2 площади торца коронки, даН/м^2;

S – площадь торца алмазной коронки (за вычетом площади промывочных каналов), м^2;

Частота вращения коронки рассчитывается по формуле (2.2)

Рекомендуемые значения окружной скорости коронки, м/с

Для пород VIII-IX категории	3-4
Для пород X-XI категории	2-3
Для пород XII категории	1,5-2

Расход промывочной жидкости можно определить по формуле (2.3). Рекомендуемые значения удельного расхода промывочной жидкости для различных типов алмазных коронок приведены в приложении 9.

2.3.3. Бескерновое бурение

Осевая нагрузка при бурении сплошным забоем оказывает существенное влияние на механическую скорость бурения. При увеличении диаметра бурения и крепости пород осевую нагрузку необходимо повышать. Осевую нагрузку на долото можно рассчитать по формуле

$$P = p_0 * D \qquad (2.5)$$

где P – осевая нагрузка на долото, даН;

p_0 – удельная нагрузка на 1 м диаметра долота, даН;

D – диаметр долота, м;

При больших значениях осевой нагрузки, рассчитанной по формуле (2.5), могут использоваться УБТ, которые передают большую часть осевой нагрузки на долото за счет своего веса, создают направление скважине и улучшают условия работы бурильных труб. В данном случае длина УБТ рассчитывается по формуле

$$L = \frac{k*P}{q*g\left(1-\frac{\gamma_р}{\gamma}\right)*Cos\theta} \qquad (2.6)$$

где L – длина УБТ, м;

k – коэффициент увеличения веса УБТ относительно осевой нагрузки (принимается);

g – ускорение силы тяжести, м/с^2;

q – вес 1 метра УБТ, даН;

γ - удельный вес материала УБТ, кг/м^3;

$\gamma_р$ – удельный вес промывочной жидкости, кг/м^3;

θ – зенитный угол, …°

Число труб в колонне УБТ определяется по формуле

$$n = \frac{L}{l}$$

где L – длина УБТ, м;

l – длина одной трубы, м;

Частоту вращения долота (в об/мин.) можно рассчитать по формуле

$$n = \frac{60v_0}{\pi D} \quad (2.7)$$

где v_0 – окружная скорость долота, м/с;

D – диаметр долота, м.

Расход промывочной жидкости определяется, исходя из скорости восходящего потока промывочной жидкости и площади кольцевого пространства скважины

$$Q = 0{,}785 * (D^2 - d^2) * v \quad (2.8)$$

где Q – расход промывочной жидкости, м^3/с;

D – диаметр долота, м;

d – наружный диаметр бурильных труб, м;

v – скорость восходящего потока промывочной жидкости, м/с;

При оформлении задания дать обоснование выбора типа породоразрушающего инструмента, типа колонкового набора и колонны бурильных труб. Дать эскиз компоновки бурового снаряда, с указанием назначения каждого из его элементов.

Занятие 3

ВЫБОР ТИПА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ КАНАТНО-УДАРНОГО БУРЕНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА БУРЕНИЯ

Задание. Выбрать тип долота и состав бурового снаряда для канатно-ударного бурения в соответствии с физико-механическими свойствами горных пород и рассчитать параметры режима бурения.

Цель задания – изучить типы долот для канатно-ударного бурения и область их применения, а также состав и конструкцию бурового снаряда. Освоить методику расчета параметров режима бурения.

3.1. Область применения канатно-ударного бурения

Канатно-ударное бурение применяется при:

1) сооружении разведочных и эксплуатационных скважин на воду;
2) разведке россыпных месторождений и мелковкрапленных руд;
3) бурение технических скважин: для замораживания водоносных пород, водопонижения, вентиляции подземных выработок и т.д.;
4) бурение взрывных скважин при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

Буровой снаряд при канатно-ударном бурении состоит из долота, ударной штанги, раздвижной штанги, канатного замка. Для чистки скважины от шлама применяют желонки.

При бурении скважин применяют плоские долота, двутавровые, округляющие и крестовые долота. В зависимости от крепости пород угол заострения лезвия долота меняется от 70 до 130° (чем тверже порода, тем больше должен быть этот угол).

Плоские долота служат для бурения в мягких породах. Двутавровые долота применяют при бурении в вязких породах средней твердости. Округляющие долота используют для бурения в твердых породах, а также в трещиноватых породах и валунно-галечных отложениях. Крестовыми долотами бурят в трещиноватых породах.

3.2. Расчет параметров режима бурения

Производительность ударно-канатного бурения зависит от правильно подобранных параметров режима бурения: массы ударного снаряда, высоты его подъема над забоем или высоты сбрасывания, частоты ударов и количества подливаемой воды в скважину.

Вес рабочей части снаряда (в даН) определяется по формуле

$$M_p = D * m_o \quad (3.1.)$$

где D – длина лезвия долота, см;

m_o – относительный вес (даН/см), приходящийся на 1 см лезвия долота, даН/см;

Величина относительного веса бурового снаряда выбирается, исходя из крепости горных пород:

1) по мягким породам (I-III категории по буримости) 15-25 даН/см;
2) по породам средней твердости (IV-V категории буримости) 30-40 даН/см;
3) по твердым породам (VI категории буримости) 40-50 даН/см;
4) по весьма твердым породам (VIII категории буримости) 60-80 даН/см.

Необходимый вес ударной штанги определяется по формулам:

$$M_2 = M_\text{р} - (M_1 + 0{,}5M_3), \text{ даН} \quad (3.2)$$

при работе без раздвижной штанги

$$M_2 = M_\text{р} - (M_1 + M_4), \text{ даН} \quad (3.3)$$

где M_1 – вес долота, даН;

M_2 – вес ударной штанги, даН;

M_3 – вес раздвижной штанги, даН;

M_4 – вес канатного замка, даН

Современные буровые станки канатно-ударного бурения обеспечивают высоту подъема снаряда над забоем на 0,35 – 1 м и частоту ударов от 40 до 60 в 1 мин. В зависимости от характера пород и глубины скважины задаются высотой сбрасывания снарядов, после чего определяют частоту ударов (уд/мин)

$$n_y = 21\sqrt{\frac{b}{S}} \quad (3.4)$$

где b – ускорение падения снаряда в шламовой среде, м/с^2;

S – высота сбрасывания снаряда, м.

При бурении по глинистым породам принимают b=4,5-5 м/с^2, по твердым породам b=6-6,5 м/с^2.

Высота сбрасывания снаряда увеличивается при бурении по твердым монолитным породам, а частота ударов снижается. При бурении пород сильно - трещиноватых или слоистых, перемежающихся по твердости следует увеличивать частоту ударов, уменьшать высоту сбрасывания снаряда. С ростом глубины бурения высоту сбрасывания снаряда нужно увеличивать, а частоту ударов снижать.

При бурении мягких пород рекомендуется на каждый рейс подливать в скважину 35-40 л. воды, а при бурении твердых пород – 10-15 л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.С., Долгов Б.П. Вращательное бурение разведочных скважин.-М.: Недра, 1988, 318с.
2. Волков А.С., Буровой геологоразведочный инструмент.-М.: Недра, 1979, 285с.
3. Володин Ю.И. Руководство к практическим занятиям и сборник задач по бурению скважин.-М.: Недра, 1987, 204с.
4. Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения.-М.: Недра, 1985, 197с.
5. Шамшев Ф.А., Тараканов С.Н., Кудряшов Б.В. Технология и техника разведочного бурения.-М.: Недра, 1983, 564 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1

Исходные данные для составления конструкции скважины

Геологический разрез	Категория пород	Номера вариантов и мощность слоя, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Почвенно-растительный слой	II	2	3	1	1,5	4	2,5	3,5	5	4,5	5
		3	4	2	5	6	4,5	5,5	6	5,5	7
Суглинки	III	5	6	7	8	10	15	20	30	40	50
		8	10	9	12	15	20	30	40	50	60
Песок среднезернистый	II	3	4	5	6	8	9	10	12	14	16
		4	6	7	9	10	12	14	16	18	20
Известняк трещиноватый (зона поглощения)	V	10	15	20	30	40	50	60	70	25	35
		20	30	40	50	60	70	80	90	45	45
Мергель	VI	30	50	60	80	40	25	15	35	45	70
		40	60	70	90	50	30	25	55	60	65
Песок разнозернистый	I	15	40	35	50	45	30	25	55	18	42
		20	25	45	35	60	50	55	65	28	65
Глины плотные	IV	40	50	60	70	65	70	65	75	80	85
		25	35	45	50	60	30	45	55	90	100
Бокситы	VI	1	2	3	2,5	3,5	5	5,5	2,6	2	1,5
		2	3	4	3,5	4,5	6	6,5	3	2,5	4
Глины углистые	IV	1	1,5	2	1,4	1,8	3,4	4,2	2	1,4	2,5
		2,2	2,5	3	1,6	2,2	4,4	5,2	1,8	3	1,6

Таблица П.1.2

Исходные данные для составления конструкции скважины

Геологический разрез	Категория пород	Номера вариантов и мощность слоя, м											
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Суглинок	III	3	5	4	2	3,5	4,6	5	6	7	8	9	5
		4	6	8	3	5,5	7	9	5,5	4	6	7	9
Кварцево-хлоритовый сланец, трещиноватый	V	10	15	20	30	40	25	35	45	50	60	70	80
		15	20	25	23	37	48	52	65	49	86	67	58
Серпентинит сильно трещиноватый	VI	30	40	60	35	55	65	75	35	45	40	38	28
		40	50	70	45	65	80	36	58	26	46	68	84
Метасоматит хлористокарбонатный	VIII	60	80	58	65	76	48	34	28	62	54	58	86
		48	54	68	52	78	86	46	34	62	78	96	100
Туфопесчаник	IX	50	70	80	65	45	38	26	48	54	66	87	96
		34	65	82	54	86	68	76	56	42	75	62	96
Медный колчедан	VII	2	4	3	6	8	10	5	12	8	14	16	3
		3	5	2,5	7	6	8	4	9	4	6	4	2
Альбитофир	XI	4	1	5	6	8	12	14	5	7	9	4	15
		6	12	15	4	10	8	6	4	11	18	6	8

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

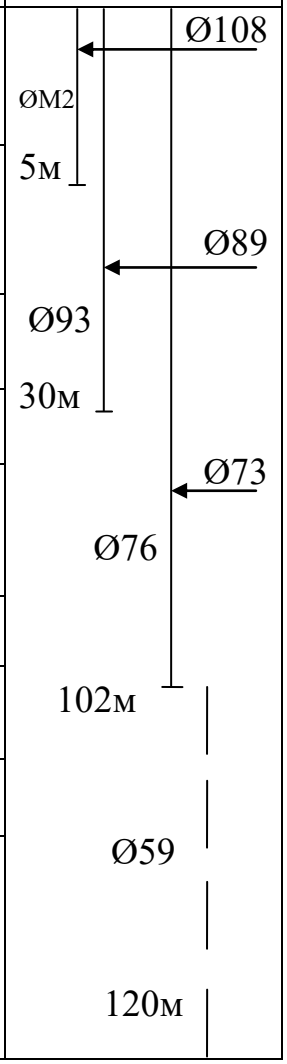
Рекомендуемый диаметр керна по полезному ископаемому

Тип полезного ископаемого	Минимальный диаметр керна, мм	Диаметр скважины, мм
Железный кварцит	32	46
Титаномагнетит	32	46
Медно-никелевые руды	32	46
Медно-колчеданные руды	32	46
Медистый песчаник	22	36
Медно-порфировые руды		59
Бокситы	32-42	46-59
Свинцово-цинковые руды	22-42	46-59
Вольфрамо-молибденовые руды	32-42	46-76
Золотоносные шляпы	32	46
Оловянные руды	32-42	46-59
Редкометальные	42-60	59-76
Уголь	60	76

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Графическое оформление конструкции скважины

Геологический разрез	Можность слоя, м	Конструкция скважины
Почвенно-растительный слой	3	
Суглинки	10	
Песок среднезернистый	16	
Глины плотные	20	
Мергель сильнотрещиноватый (поглощение)	30	
Песок	10	
Глины	20	
Бокситы	5	
Глины углистые	6	



Примечание: Ø - обозначение диаметра;
Вертикальный масштаб
М 1:10 или М 1:20

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Значения рекомендуемых нагрузок на один основной резец твердосплавной коронки (даН)

Группа и тип коронки	Категория пород по буримости				
	I-II	III-IV	V	VI	VII-VIII
Ребристые					
М1	30-50	50-60	-	-	-
М2	-	60-80	-	-	-
М5	-	40-60	-	-	-
Резцовые					
СМ3	-	40-50	50-80	80-100	-
СМ4	-	-	50-60	60-80	-
СМ5	-	-	40-50	50-60	-
СМ6	-	-	-	-	60-70
СТ2	-	40-60	60-80	80-100	-
Самозатачивающиеся					
СА-1	-	-	30-50	40-80	50-100
СА-2	-	-	-	40-60	50-80
СА-4	-	-	-	40-60	50-80
СА-5	-	-	-	40-60	50-80
СА-6	-	-	-	40-60	50-80

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Удельный расход промывочной жидкости (10^{-3} м^3/с) на 1м диаметра коронки

Группа коронок	Категория пород по буримости				
	I-II	III-IV	V	VI	VII-VIII
Ребристые	17-20	20-27	-	-	-
Резцовые	-	-	20-23	17-20	15-17
Самозатачивающиеся	-	-	-	17-20	15-17

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Рекомендуемые значения удельной осевой нагрузки для алмазных коронок, 10^{-4} даН/м^2

Тип коронки	Категория пород по буримости			
	VII	VIII-IX	IX-X	XI-XII
Однослойные	60	60-75	-	-
Импрегнированные	-	-	75-90	100-170

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Значения удельных нагрузок, окружной скорости вращения долота и скорости восходящего потока промывочной жидкости для бескернового бурения

Тип долота	$P * 10^3$ даН/м	v_0, м/с	v, м/с
Лопастные			
2Л	6-7,5	0,8-2,0	0,6-1
3Л	8-12	0,8-1,5	
ИР	8-15	0,8-1,2	
Пикобуры	4,5-9,5	0,8-1,4	
Шарошечные долота			
М	15-25	0,8-1,2	0,6-1 (вода)
С	20-35	0,8-1,4	0,4-0,8 (гл.раствор)
Т	20-40	0,6-1,2	
ТК	20-45	0,6-1,0	
К и ОК	20-30	0,6-0,8	
Дисковые долота	20-30	1,0-1,6	
ДДА	30-40	0,75-1,5	
Алмазные долота			
08А3 и 09А3	24-32	0,8-1,7	0,5-0,8 (вода)
08И3	25-35	1,0-2,0	0,4-0,8 (гл.раствор)

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Исходные данные для расчета режимных параметров канатно-ударного бурения

№ задания		Глубина бурения, м		Описание пород	Диаметр скважины, мм	
				Дресьва III категории	495	445
3	4	80	120	Известняк IV категории	345	148
5	6	100	150	Конгломерат V -"-	248	198
7	8	90	200	Мрамор IV -"-	298	148
9	10	60	150	Мергель IV -"-	395	198
11	12	30	50	Суглинок II -"-	495	445
13	14	10	30	Глина III -"-	345	395
15	16	180	250	Опока IV -"-	198	148
17	18	120	190	Сланец глинистый V -"-	248	148
19	20	250	300	Порфирит VI -"-	198	148
21	22	200	280	Туф VII -"-	248	198
23	24	40	50	Сланец кремнистый V -"-	345	445
25	26	80	100	Серпентинит V -"-	248	198
27	28	50	60	Порфирит VI -"-	345	298
29	30	25	45	Глина III -"-	248	445
31	32	160	280	Песчаник VI -"-	198	148
33	34	100	120	Альбит IV -"-	298	198
35	36	30	40	Галечно-щебенистые отложения IV -"-	495	445
37	38	10	20	Галечник крупный V -"-	345	298
39	40	20	35	Гранит выветренный IV -"-	298	248
41	42	80	120	Гнейс VI -"-	248	148
43	44	110	150	Гранит VII -"-	198	148
45	46	150	230	Диабаз VI -"-	248	198
47	48	200	300	Габбро VI -"-	198	148
49	50	60	130	Песчаник трещиноватый IV категории	298	345

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Удельный расход промывочной жидкости при алмазном бурении ($10^{-3}м^3/с$)

Коронки	Характеристика горных пород	Удельный расход жидкости, $10^{-3}м^3/с$
Однослойные	Малоабразивные	12-17
	Абразивные	13-20
Импрегнированные	Малоабразивные	5-10
	Абразивные	8-13

МИНОБРНАУКИ РФ

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Л. И. Кралина, Г. А. Усов, Ф. П. Сердюков

Исследование процессов разрушения и физико-механических свойств горных пород

Методическое пособие
к комплексу практических занятий
по дисциплине

«Техника разведки»

для студентов специальности
21.05.03 Технология геологической разведки
Очного и заочного обучения

Часть 1

Екатеринбург
2020

Оглавление

Введение…….3
Лабораторная работа № 1. Определение абразивности образцов горной породы методом Барона……4
Лабораторная работа № 2. Определение физико-механических параметров скальных горных пород……..6
Лабораторная работа № 3. Определение энергоемкости процесса распиловки горных пород алмазным диском…….....10
Лабораторная работа № 4. Исследование акустического спектра резания горной породы алмазным диском…….....15
Библиографический список…….....18

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по профилирующим дисциплинам для студентов специальности 21.05.02 Прикладная геология. Предложенные в учебно-методическом пособии лабораторные работы выполняются с целью закрепления теоретических знаний, приобретения практических навыков в выполнении работ лабораторного характера, в том числе с элементами НИРС, расчетов, необходимых при изучении студентами профилирующих дисциплин, курсовом и дипломном проектировании. При выполнении работ используются справочные материалы, приведенные в приложении. Большинство работ рассчитано на выполнение и оформление непосредственно на занятиях. Если работа не закончена, то с разрешения преподавателя она может быть оформлена и сдана к следующему занятию.

Структурно, в зависимости от теоретического характера лабораторных исследований, учебно-методическое пособие состоит из трех частей:

Часть 1. Исследование процессов разрушения и физико-механических свойств горных пород;

Часть 2. Исследование буровых промывочных жидкостей и тампонажных растворов;

Часть 3. Методика обработки результатов исследования при выполнении лабораторных работ и справочные материалы.

Список литературы, использованной при написании учебно-методического пособия, приведен в конце каждой части.

Предлагаемые в настоящем методическом пособии лабораторные работы студентами выполняются побригадно по 2-3 человека. Объем данных работ рассчитан в основном на 2-4 часа, реже - на 6-8 часов в случае проведения студентами комплексных исследований повышенной сложности и детальности.

Полученные результаты лабораторных исследований оформляются студентами в виде отчета, содержащего следующие данные и разделы:

1. Полное наименование работы.
2. Состав исполнителей.
3. Руководитель работы.
4. Задание, дата.
5. Исходные данные.
6. Порядок выполнения работы.
7. Выводы и рекомендации по результатам исследований.

Лабораторная работа № 1

Определение абразивности образцов горной породы методом Барона

Настоящие методики определения абразивности горных пород разработаны в Институте горного дела им. А. А. Скочинского, Л. И. Бароном и А. В. Кузнецовым. Сущность ее заключается в истирании о поверхность образца горной породы торца вращающегося стержня из незакаленной стали -серебрянки с последующим определением весового износа стержня во время опыта. За критерий абразивности принимается суммарная потеря в весе стержня за стандартное время опыта 10 минут. Опытное потирание стержня производится при осевой нагрузке 150 Н и скорости вращения 400 об/мин.

Испытания производятся на установке, выполненной на базе обычного сверлильного станка типа НС - 1 2 А.

Образец горной породы устанавливается в зажимном приспособлении таким образом, чтобы истираемая поверхность была перпендикулярна шпинделю станка. В патроне станка закрепляется эталонный стержень из инструментальной калиброванной стали-серебрянки У8А диаметром 8 мм. Изготовление стержней производится на токарном станке, где пруток разрезается на части длиной 70 мм. В одном из торцов каждого стержня высверливается центральное отверстие диаметром 4 мм и глубиной 12 мм.

Определение абразивности породы производят сверлением образца породы эталонным стержнем, предварительно взвешенным на аналитических весах с точностью до 0,1 мг. Исследования производят по схеме парных опытов: сначала сверление осуществляется в течение 10 мин одним концом стержня, затем в течение 10 мин – другим.

После опыта стержень очищается и снова взвешивается на аналитических весах с точностью до 0,1 мг.

Коэффициент абразивности породы вычисляется на основании результатов исследований по формуле

$$A = \frac{\sum q_i}{2n_{\text{п}}}, \tag{1.1}$$

где A - коэффициент абразивности, мг,

q_i - потеря массы эталонного стержня за каждый парный опыт, мг;

$n_{\text{п}}$ - число парных опытов.

На каждом образце горной породы проводится 3-5 парных опытов, а в целом по пробе необходимо провести 9-15 таких опытов

Необходимое число единичных опытов определяется с учетом коэффициента вариации, зависящего от структуры горных пород, на основании величины отношения

$$a = \frac{K_{\text{доп}}}{K_{\text{вар}}} \tag{1.2}$$

где $K_{\text{доп}}$- допускаемое отклонение точности определения коэффициента абразивности;

$K_{\text{вар}}$ - коэффициент вариации, принимаемый согласно табл. 1.1.

Согласно абсолютной величине a, необходимо определить минимальное число единичных опытов, руководствуясь табл. 1.2.

Таблица 1.1

Определение коэффициента вариации $K_{\text{вар}}$

Структура пород	Размер зерен, мм	$K_{\text{вар}}$, %
Крупнозернистая	5	30
Среднезернистая	3-5	22
Мелкозернистая	0,3-0,2	19
Тонкозернистая с включениями	0,2	34

Таблица 1.2

Определение минимального числа единичных опытов

a	2,0	0,98	0,69	0,57	0,49	0,48
n	1	4	8	12	16	20

Запись результатов измерений и вычислений производится в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Определение абразивности горных пород

№ п.п	Порода		Номер образца опыта	Масса стержня. $G_{1,2}$, мг		Потеря массы, мг	Абразивность А, мг				Примечание
	шифр	название		до опыта	после опыта		по опыту	по образцу	среднее по пробе	коэф. вариац, %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Построение графиков и выводы результатов работы

Построение графиков по результатам измерений и вычислений настоящей лабораторной работы. УП1, УП2 - предварительные усилители;

Количественный и качественный анализ зависимостей

$A = f\left(\frac{H_{м,\max}}{H_{м,\min}}\right)$ и $A = f\left(H_{м,\max}\right)$, а также степени зернистости

(крупно-, средне-, мелко-, микрозернистости) исследуемых образцов горных пород.

Обосновать практическое значение полученных результатов лабораторных исследований и дать практические рекомендации.

Лабораторная работа № 2.

Определение физико-механических параметров скальных горных пород

Для оценки прочностных свойств горных пород определяются коэффициент динамической прочности (крепости и дробимости) $F_д$, а для оценки абразивных свойств - коэффициент абразивности $K_{абр}$.

Методика разработана в ЦНИГРИ под руководством Н. И. Любимова и рекомендована для исследований ФМС скальных горных пород.

Отбор н подготовка образцов горных пород

Отбор образцов горных пород производится, как правило, из керна. Можно также отбирать образцы произвольной формы соответствующего размера.

Размеры образцов из керна: длина 20-25 см при бурении коронками диаметром 46-59 мм и 15-18 см при бурении коронками диаметром 76-92 мм.

Подготовка проб из образцов осуществляется в следующем порядке:

- исследуемый образец породы разбивается на куски изометрической формы без острых углов размером 1,5-2,0 см в поперечнике;
- набираются две пробы: каждая проба состоит из 25 кусков и разделяется на пять частей по пять кусков.

Оборудование и материалы, необходимые для исследований

При определении прочностных и абразивных свойств горных пород по методике ЦНИГРИ применяются:

- прибор ПОК для определения динамической прочности (крепости) горных пород;
- прибор ПОАП-2М для определения абразивности горных пород;
- весы типа ВЛКТ-100 г / 5-3.

Прибор ПОК состоит из трубчатой ступы (рис. 2.1, а) и объемомера (рис. 2.1, б). Составными частями трубчатой ступы являются: загрузочный стакан *1*, направляющая труба *2*, удерживающий шплинт *3*, гиря *4*, упор *5*, шнур *6* и рукоятка *7*.

Объемомер состоит из стакана *1* и поршня со шкалой *2*.

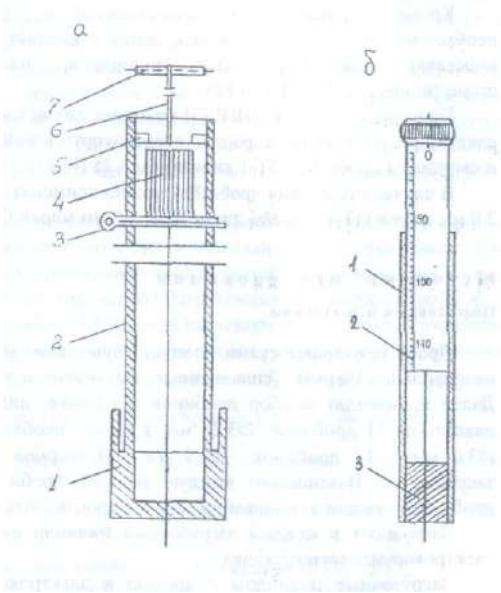


Рис. 2.1. Прибор ПОК для определения динамической прочности горных пород:

а – трубчатая ступа: *1* – загрузочный стакан; *2* – направляющая труба; *3* – шплинт удерживающий; *4* – гиря; *5* – упор; *6* – шнур; *7* – рукоятка; *б* – объемомер: *1* – стакан; *2* – поршень со шкалой; *3* – дно

Прибор ПОАП-2м, схема которого приведена на рис. 2.2, состоит из электродвигателя АОЛБ 22-4 мощностью 0,18 кВт с числом оборотов 1420 об/мин, двух рабочих органов с загрузочными камерами и пульта управления со счетчиком оборотов двигателя.

В приборе ПОАП-2м рабочий орган представляет собой жесткое сварное соединение *8* трех загрузочных камер *4*, шатуна *7* и эксцентрикового вала *2*, совершающего колебательно-вращательное движение в шариковых подшипниках *10*.

Опорой рабочего органа служат маятниковые шатуны *3*, которые с помощью шариковых подшипников *6* шарнирно связывают рабочий орган с плитой прибора.

Загрузочные цилиндры вставляются в камеры *4* прямоугольной формы и закрываются крышками *5* при помощи натяжных замков.

Привод рабочего органа прибора осуществляется от электродвигателя *1* через эксцентриковый вал *2* с насаженным на него маховиком *9*. При помощи вала 2 загрузочные камеры совершают возвратно-поступательное движение, обеспечивающее интенсивное перемешивание помещенного в них материала.

Механический редуктор-счетчик оборотов *12,* который присоединяется к валу электромотора при помощи двух шкивов и приводного ремня, позволяет контролировать число колебаний рабочего органа.

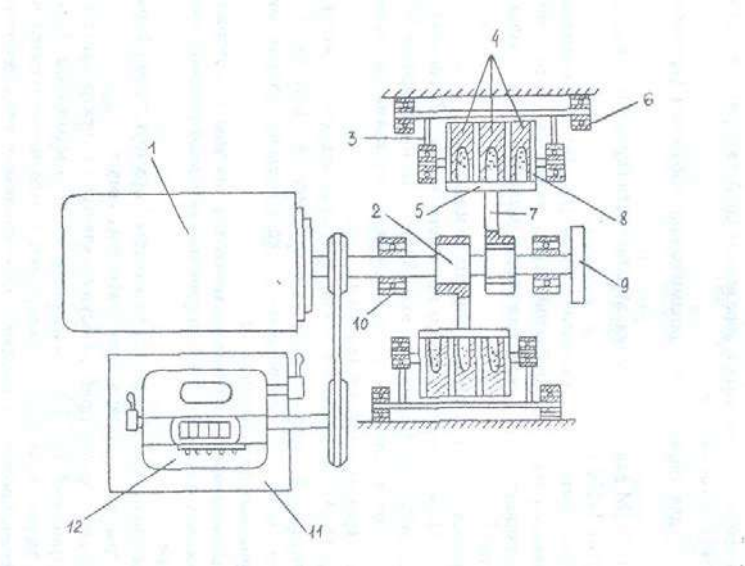


Рис. 2.2. Схема прибора ПОАП-2М для определения абразивности горных пород:
1 – электродвигатель; *2* – эксцентриковый вал; *3* – шатуны; *4* – загрузочные цилиндры; *5* – крышка; *6* – опоры; *7* – шатун; *8* – рабочие органы; *9* – маховик; *10* – подшипники; *11* – пульт управления; *12* – счетчик.

Весы типа ВЛКТ-100 г/5-3 предназначены для определения потери веса эталонного материала при определении абразивности пород с требуемой точностью

Для исследований на приборах ПОК и ПОАП-2м используются:

- загрузочные цилиндры из стекла органического СОЛ (ГОСТ 15809-70) - 18 шт. (6 - для проведения опыта, 6 - для промывки дроби после опыта, 6 - запасные);
- сито из сетки №5 (ГОСТ 3826-66);
- мерка емкостью 1 $см^3$.

Кроме перечисленных принадлежностей, учтенных в ОСТе, необходимо иметь молоток, совок, лоток с шестью
ячейками для дроби, подставку для загрузочных цилиндров, пластинку, лопаточку, штангенциркуль (ГОСТ 166-80).

По разработанной в ЦНИГРИ методике для исследований необходимы следующие материалы: порошок электрокорундовый №12 (ГОСТ 3647-80) и свинцовая дробь №4 ОТ-1 диаметром 3.25 (ГОСТ 7837-76).

В случае отсутствия дроби №4 можно применять дробь №5 диаметром 3,0 мм марки ОТ-1 или №3 диаметром 3,5 мм марки ОТ-П.

Методика исследований
Подготовка к испытаниям

Дробь протирают сухим хлопчатобумажным материалом. Дробинки неправильной формы (сплющенные, вытянутые и т. п.) отбраковываются. Далее производят подбор дробинок в навеске, для чего заготовляют 6 навесок по 21 дробинке Ø 3,25 мм; в случае необходимости 26 дробинок Ø 3,0 мм и 14 дробинок Ø 3,5 мм. Повторное использование дроби запрещается. Взвешивают каждую навеску дроби. Определение массы дроби при каждом взвешивании следует производить с точностью до 5 мг.

Загружают в каждый загрузочный цилиндр навеску дроби и 1 см электрокорундового порошка.

Загрузочные цилиндры с дробью и электрокорундовым порошком помещают в прибор и включают его на 20 минут. При этом электродвигатель должен совершить 28 тыс. оборотов, которые контролируются счетчиком прибора.

Каждую навеску дроби после указанного опыта помещают в сосуд с водой и после перемешивания (всполаскивания) извлекают и протирают насухо чистым хлопчатобумажным материалом.

Промытую дробь взвешивают. Потеря массы дроби в каждой пробирке должна быть 200±10 мг. В случае отклонения потери массы дроби от указанного необходимо изменить количество дробинок в навеске и повторить тарировочные работы вновь.

Проведение испытаний

Каждую часть пробы, состоящую из 5 кусков, помещают в стакан прибора ПОК и производят 10 сбрасываний гири массой 2,4 кг с высоты 600 мм (груз поднимается до упора). Продукт разрушения всех пяти частей каждой пробы породы просеивается через сито с размером стороны ячейки а свету 0,5 мм. Прошедшую через сито фракцию 0,5 мм и менее ссыпают в трубу объемомера (рис. 4.2). В трубу свободно вставляют до упора цилиндр и снимают отсчет "h" по шкале цилиндра в миллиметрах.

Раздробленную горную породу фракции 0,5 мм и менее высыпают из объемомера на лист чистой бумаги в виде конуса, затем конус с помощью пластинки развертывают в диск, который снова пересыпают в конус. Процесс перемешивания повторяют 2 - 3 раза для получения однородной среды. Из противоположных частей диска отбирают пробы объемом 1 см^3 каждая.

Загрузочные цилиндры с дробью и пробами помещают в прибор ПОАП-2м и включают на 20 мин. После испытания дробь промывают. Для этого каждую навеску дроби помещают в чистые загрузочные цилиндры, заполненные на 2/3 объема водой. Загрузочные цилиндры с дробью и водой помещают в прибор ПОАП-2м и включают его на 3 мин. Промытую дробь протирают сухим хлопчатобумажным материалом, взвешивают каждую навеску и определяют потерю массы дроби ΔQ (мг).

Определение физико-механических параметров по результатам испытаний

Коэффициент динамической прочности породы определяет по формуле:

$$F_{\text{д}} = \frac{20n}{h} = \frac{200}{h}, \qquad (2.1)$$

где n=10 - число сбрасываний гири на приборе ПОК;

h - отсчет по шкале цилиндра объемомера, мм.

Коэффициент абразивности исследуемой породы определяют по формуле:

$$K_{\text{абр}} = \frac{\Delta Q}{100}\ , \tag{2.2}$$

где ΔQ - потеря массы дроби, мг.

Коэффициенты динамической прочности и абразивности определяются по двум пробам.

За средние значения $F_{\text{д}}$ или $K_{\text{абр}}$ принимаются среднеарифметические двух определений при условии:

$$Z = \frac{X_1 - X_2}{(X_1 + X_2)/2} \cdot 100 \langle 25\ \%, \tag{2.3}$$

где X_1 и X_2 - значения двух определений $F_{\text{д}}$ и $K_{\text{абр}}$.

В случае отклонения от приведенного условия проводятся дополнительные определения. Из полученных значений $F_{\text{д}}$ и $K_{\text{абр}}$ выбираются те два, для которых выполняется условие (2.3).

На основании определенных опытным путем значений динамической прочности $F_{\text{д}}$ и коэффициента абразивности $K_{\text{абр}}$ можно определить объединенный комплексный показатель бурности $\rho_{\text{м}}$ по формуле:

$$\rho_{\text{м}} = 3F_{\text{д}}^{0.8} \cdot K_{\text{абр}} \tag{2.4}$$

Лабораторная работа № 3.
Определение энергоемкости процесса распиловки горных пород алмазным диском

Распиловка является начальной операцией в обработке каменного сырья. Для распиловки горных пород используют несколько типов алмазных пил и станков, конструкция которых зависит от размеров камней и конкретной цели распиловки.

Процесс распиловки можно контролировать по показаниям электроприборов, которые устанавливаются в системе электропривода для измерения силы тока, напряжения и потребляемой мощности.

Оценка процесса распиловки возможна по удельным затратам электроэнергии на единицу площади распиливания, которая зависит от ФМС горных пород, параметров режущего инструмента и технологических параметров распиливания.

Задачей исследования является определение энергоемкости процесса распиливания горных пород с различными ФМС на камнерезном станке.

Технические средства для определения энергоемкости процесса распиловки

В качестве распиловочного механизма используется серийный камнерезный станок ПТ-44, оснащенный алмазным отрезным диском:

Техническая характеристика камнерезного полуавтомата ПТ-44

Наибольшая высота обрабатываемой заготовки, мм ….	150
Наибольшая длина обрабатываемой заготовки, мм …..	160
Частота вращения шпинделя, об/мин ……..	1500
Инструмент: круг отрезной, 2726-0272 ГОСТ 10110-78	1000
диаметр, мм ……	450
толщина, мм……	2,4
Скорость подачи (продольное перемещение салазок), мм/мин	
при модуле червячной передачи $m = 1$……..	5,4-31,5
$m = 2$……..	10,8-63
Питающая эл. сеть:	
род тока…….	Переменный
частота тока, Гц……	50
напряжение, В……..	220, 380
Электродвигатель	
Тип…….	4А80В (АИР90В)
мощность, кВт……..	1,5 (2,2)
частота вращения, об/мин……..	1500
габариты, мм, не более……	1240 890 940
масса, кг, не более……..	350

Принцип работы камнерезного полуавтомата ПТ-44

Привод станка осуществляется от электродвигателя *1* (рис. 3.1) Вращение от двигателя передается через клиноременную передачу на шпиндель *2*, на котором закреплен алмазный круг *10*. Вращение шпинделя двухскоростное, так как шкив шпинделя имеет два ручья с разными диаметрами.

При распиловке заготовок продольная подача заготовки *11* производится механически от двигателя *1* через клиноременную передачу, червячную передачу *7*, передачу "винт-гайка", гайка *8* которой является разъемной. При разомкнутом положении гайки механическая подача на заготовку не происходит. Заготовка при распиловке надежно закрепляется в зажимном устройстве *9*, которое имеет возможность продольного

перемещения по направляющим *4*. Скорость продольной подачи во время распиловки регулируется бесступенчатым вариатором *6*. При переводе рычага влево подача замедляется, вправо - ускоряется

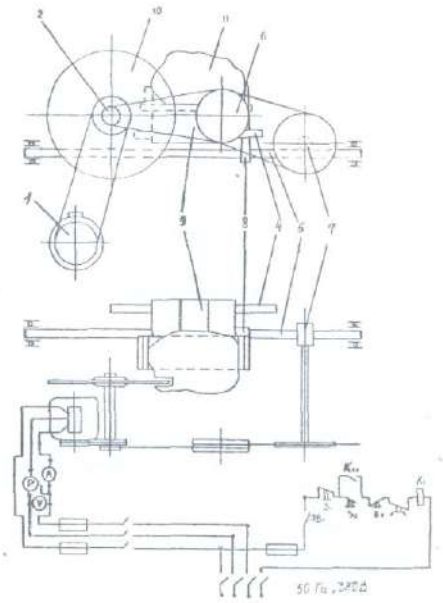


Рис. 3.1. Электромеханическая схема ПТ-44

Приборы для контроля процесса распиловки

Для контроля процесса распиловки камнерезный полуавтомат ПТ-44 имеет электрический щит, оборудованный вольтметром с ценой деления 20 В в диапазоне 500 В, амперметром с ценой деления 0,5 А в диапазоне ЮЛ и ваттметром с ценой деления 0,5 кВт в диапазоне 1,4 кВт.

Для проведения исследований необходимо иметь секундомер.

Методика определения процесса распиловки
Подготовка образцов для распиловки

Для распиловки используются образцы скальных горных пород произвольной формы. Размеры образца следует подбирать из расчета затрат времени на отрезание одной пластины в пределах 4-6 мин. и возможности получения из образца двух пластин толщиной 30 мм и длиной не менее 100 мм. Каждый образец должен быть промаркирован. Полученные при распиловке пластины используются в следующей лабораторной работе.

Подготовка камнерезного полуавтомата ПТ-44

Исследуемый образец закрепляется в зажимном устройстве станка. Для распиловки следует использовать червячное колесо с модулем m=1. Рычагом вариатора устанавливается нужная скорость резания. Рекомендуемая скорость резания при распиловке твердых пород (яшма) -23,4 мм/мин., при распиловке мягких пород (змеевик) – 33,4 мм/мин.

Организация наблюдений за процессом распиловки

В процессе исследований по показаниям ваттметра измеряется потребляемая мощность на холостое вращение алмазного диска и суммарная потребляемая мощность в

процессе распиловки. Потребляемая мощность на распиливание определяется по формуле:

$$P_p = \sum P - P_{xx} \qquad (3.1)$$

где P_p - потребляемая мощность на распиливание, Вт;

$\sum P$ - суммарная потребляемая мощность, Вт;

P_{xx} - потребляемая мощность на холостое вращение алмазного диска, Вт.

Для получения достоверной информации необходимо провести 3 опыта - параллельные распиловки образца, обеспечивающие получение двух пластин.

Каждый опыт начинается с регистрации потребляемой суммарной мощности в момент начала распиловки. Затем суммарная потребляемая мощность регистрируется с помощью секундомера через каждые 30 с до окончания распиловки.

Результаты наблюдений и обработки заносятся в таблицу.

Регистрация результатов наблюдения и расчетов

Номер парал. набл.	P_{xx}	Суммарная потребляемая Мощность ΣP, Вт										Площадь распила S,м^2	Работа A, Втс	Удельная энергоемкость W, Вт·с/м^2
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270			
Образец №1														
1														
2														
3														
Образец №2														
1														
2														
3														

На основании наблюдений при распиловке каждого образца строятся графики, характеризующие изменение P_P во времени. Форма графика приведена на рис. 3.2.

Определение произведенной работы для распиливания образца

Работа распиливания характеризуется площадью фигуры 5 (рис. 3.2), ограниченной кривой, характеризующей изменение суммарной потребляемой мощности $\sum P$ во времени, и линией, ограничивающей мощность холостого вращения P_{xx}.

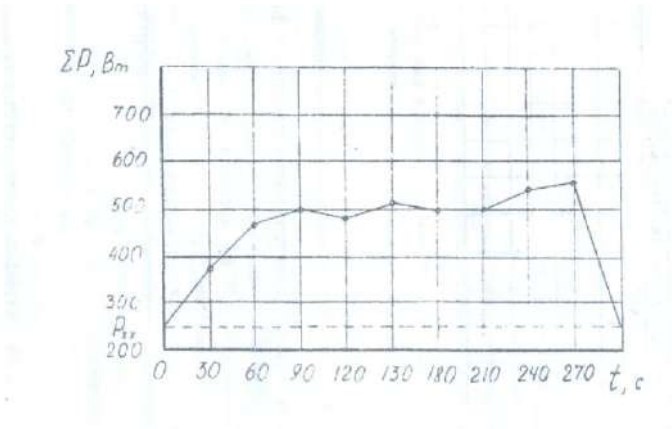


Рис. 3.2. График изменения потребляемой мощности во времени при распиловке яшмы технической.

Площадь S определяется с помощью палетки. Масштаб одной клетки палетки определяется в соответствии с масштабом координат графика:

$$M = P_p t_н, \tag{3.2}$$

где M - масштаб одной клетки, Вт·с;

P_p - масштаб мощности на графике, Вт;

$t_н$ - масштаб времени, с. Приведенный на рис. 4.6 график имеет следующий масштаб:

$M = 100 \cdot 30 = 3000$, Вт·с.

Тогда работа распиливания образца определяется из условия, Вт/с:

$$A = Mm, \tag{3.3}$$

где M - масштаб одной клетки, 3000 Вт·с;

m - количество расчетных клеток палетки в пределах площади, ограниченной кривой изменения $P_Р$ во времени, шт.

Для определения количества расчетных клеток под кривой методом палетки подсчитывается количество полных клеток n_1 и количество неполных клеток n_2. Затем приближенно определяется общее количество расчетных клеток из условия:

$$M=(n_1+n_2)/2. \tag{3.4}$$

Определение площади распила

Площадь поверхности распила образца горной породы определяется также по палетке. В качестве палетки может быть использован лист миллиметровки или разлинованный в клетку тетрадный лист. На палетку накладывается распиленный образец горной породы, и фиксируется площадь распила. Масштаб палетки принимается

$$M= 1 \text{ см}^2 = 0{,}0001 \text{ м}^2.$$

Площадь распила рассчитывается из условия:

$$S=Mm, \tag{3.5}$$

где S - площадь распила, м^2;

M - масштаб палетки, м^2;

m - количество расчетных клеток палетки, шт.

Определение удельной энергоемкости процесса распиливания

Удельная энергоемкость распиливания на единицу площади горной породы рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{A}{S}. \tag{3.6}$$

где W - удельная энергоемкость распиливания, Вт·с/м^2;

A - работа, Вт·с;

S - площадь распила, м^2.

Методика статистической обработки результатов наблюдений

Обобщающими результатами наблюдений, характеризующих энергоемкость процесса распиловки, являются удельные затраты мощности на единицу площади распиловки W_1, W_2, W_3, …, W_n, которые получены при проведении параллельных опытов при распиловке образца определенной горной породы.

Энергоемкость процесса распиловки образца горной породы характеризуется удельными затратами мощности, которые определяются как среднее арифметическое значение удельных затрат мощности при проведении параллельных опытов по формуле:

$$\overline{W} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} W_i \quad . \tag{3.7}$$

Дисперсия удельных затрат мощности параллельных опытов, характеризующих степень разброса вокруг среднего значения, рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{1}{1-n}\sum_{i=1}^{n}(W_i - \overline{W})^2 \, . \tag{3.8}$$

Среднее квадратическое отклонение результата каждого опыта как абсолютный показатель изменчивости удельных затрат мощности определяется из выражения:

$$S = \sqrt{\frac{1}{1-n}\sum_{i=1}^{n}(W_i - \overline{W})^2} \quad . \tag{3.9}$$

Отдельным показателем изменчивости удельных затрат мощности параллельных опытов является коэффициент вариации, который рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{вар}} = \frac{S}{W}100 \ \% \tag{3.10}$$

Лабораторная работа № 4.

Исследование акустического спектра резания горной породы алмазным диском

Отбор и подготовка образцов

Для исследований необходимо использовать образцы горных пород с известными параметрами динамической прочности, абразивности и модуля продольной упругости. Образец должен иметь форму пластины толщиной 30 мм. Рекомендуется использовать пластины, полученные при выполнении лабораторной работы № 3 данного раздела. Каждый образец должен иметь свою маркировку.

Технические средства для регистрации акустического спектра

Для исследования акустического спектра резания горных пород алмазным диском используется анализатор спектра АС-1.

Акустический спектр регистрируется анализатором спектра АС-1 в пределах звуковых колебаний 16 Гц – 20 кГц при распиловке образца горной породы на камнерезном станке ПТ-44, оснащенном алмазным отрезным диском АС-50 315/250 50 М. Для контроля процесса резания станок оснащен ваттметром, вольтметром и амперметром.

Техническая характеристика анализатора спектра АС-1

Прибор состоит из измерительного блока и двух микрофонов МД 52. Измерительный блок предназначен:

- для усиления сигналов, поступающих от микрофонов;
- выделения из шумового спектра основных гармонических составляющих;
- измерения частоты звуковых колебаний в трех диапазонах (I–20-200 Гц, II - 200-2000 Гц, III - 2-16 кГц);
- измерения уровня звукового давления акустического спектра с помощью микроамперметра.

Функциональная схема АС-1 представлена на рис. 4.2. На схеме показаны:

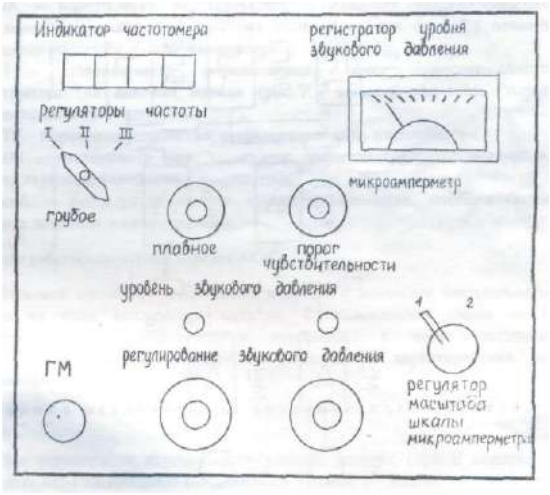


Рис. 4.1. Схема лицевой панели АС-1

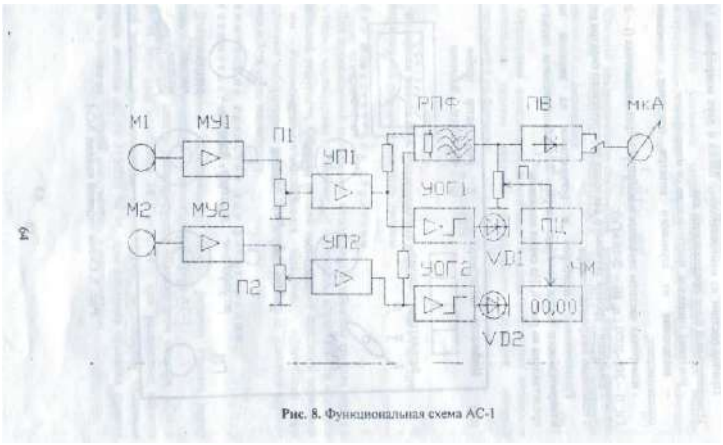


Рис. 8. Функциональная схема АС-1

Рис. 4.2. Функциональная схема АС-1

МУ1, МУ2 -микрофонные усилители 1 и 2 каналов;

П1, П2 - потенциометры установки уровня сигналов с микрофонных усилителей (ручки потенциометров П1 и П2 выведены на лицевую панель (см. рис. 4.2) и обозначены "регулирование звукового давления 1-й канал и 2-й канал");

УОГ1, УОГ2 - усилители-ограничители шумового сигнала с выходом на светоиды VD1, VD2 (на лицевой панели (см. рис. 4.2) светоиды обозначены "уровень звукового давления");

РПФ - режекторный полосовой фильтр с высокой добротностью, (перестройка частоты фильтра осуществляется ручками (см. рис. 4.2) "регуляторы частоты грубое, плавное", расположенными на лицевой панели);

ПВ - прецезионный выпрямитель выделяет положительную полуволну первой гармоники шумового сигнала;

SA - масштабный переключатель - изменяет чувствительность микроамперметра мкА в 2 раза (на лицевой панели (см. рис. 4.2) показан "регулятор масштаба шкалы амперметра");

П - потенциометр, определяющий порог чувствительности частотометра (на лицевой панели (см. рис. 4.2) имеется указатель "порог чувствительности");

ПУ - пороговое устройство, открывающее вход частотометра;

ЧМ - частотометр или "индикатор частотометра", отображающий частоту звуковых колебаний в килогерцах;

мкА - регистратор уровня звукового давления, отображающий звуковое давление в микроамперах.

Принцип работы анализатора спектра АС-1

Звуковой сигнал от микрофонов подается с помощью специального кабеля на вход анализатора спектра. Функциональная схема АС-1 усиливает сигнал, фильтрует и отображает в виде частотной характеристики на частотометре и амплитудной характеристики на амперметре.

Методика исследования акустического спектра на АС-1

Для регистрации акустического спектра резания горной породы с помощью АС-1 необходимо выполнить следующие операции:

Расположение приборов и регуляторов на лицевой панели измерительного блока показано на рис. 4.1,

1. Установить микрофоны в непосредственной близости от режущего инструмента, обеспечив условия предотвращения попадания влаги на микрофоны.
2. Подключить микрофоны к гнезду ГМ прибора.
3. Подключить прибор к сети 220 В.

4. Установить ручки управления прибора в положение, соответствующее готовности прибора к работе. Для этого необходимо выполнить следующие операции.

4.1. Ручки потенциометров "регулирование звукового давления" (П1 и П2) установить в крайнее левое положение (повернуть против часовой стрелки до упора).

4.2. Переключатель "регуляторы частоты грубое, плавное" установить в крайнее левое положение.

4.3. Ручку "порог чувствительности" установить в крайнее левое положение, при этом индикатор частотометра должен показывать 00.00.

4.4. Переключатель ЗА "регулятор масштаба шкалы микроамперметра" установить в крайнее левое положение, при этом стрелочный индикатор мкА должен быть на нуле.

5. Включить камнерезный станок, установить режим подачи с помощью вариатора в зависимости от физико-механических свойств распиливаемого образца и обеспечить работу станка в установившемся режиме резания горной породы.

6. Медленно поворачивать ручки потенциометров П1 и П2 "регулирование звукового давления" по часовой стрелке до включения светоидов УВ1 и УО2. После включения светоидов повернуть ручки П1 и П2 против часовой стрелки, стараясь уловить положение регуляторов уровня сигнала, соответствующее моменту затухания светоидов.

7. Произвести измерения параметров акустического спектра, выполняя последовательно следующие операции.

7.1. Поворачивая ручку "регуляторы частоты плавное" по часовой стрелке, установить по микроамперметру на положение ручки, соответствующее максимальному уровню сигнала в выбранном частотном диапазоне. Точнее можно найти положение ручки, поворачивая ее по или против часовой стрелки.

7.2. Повернуть ручку "порог чувствительности" до включения частотометра в режим счета частоты. Рекомендуется поворачивать ручку не плавно, а дискретно, изменяя угол поворота в связи с некоторым запаздыванием включения счетного устройства.

7.3. Показания частотометра и стрелочного индикатора занести в таблицу. При необходимости взять еще 1-2 отсчета на этом же частотном диапазоне, стремясь отыскать локальный максимум.

7.4. Повернуть ручку "порог чувствительности" против часовой стрелки до сброса показаний индикатора частотометра (до установки 00.00).

7.5. Повернуть ручку "регуляторы частоты плавное" в крайнее левое положение и перейти на следующий частотный диапазон, переключив переключатель «регуляторы частоты грубое» по часовой стрелке в следующее положение.

7.6. Повторить измерения на вновь избранном диапазоне частоты, выполнив пункты 7.1-7.3 Результаты измерений занести в таблицу.

7.7. Выполнив пункты 7.4 и 7.5, перейти на третий диапазон частот, установив переключатель "регуляторы частоты грубое" в положение III (крайнее правое).

7.8. Повторить измерения на III диапазоне частот, выполнив пункты 7.1. - 7.3. Результаты измерений занести в таблицу.

Результаты измерений исследования акустического спектра резания горной породы алмазным диском

Диапазон	I			II			III		
Уровень звукового давления, мкА									
Частота звуковых колебаний, кГц									

Примечания.

1. После выполнения пункта 7.3 положение ручки "регулирование звукового давления" нельзя изменять до окончания работы, в противном случае достоверность характера спектрограммы будет нарушена.
2. В некоторых случаях на одном или двух диапазонах частот могут отсутствовать ярко выраженные основные максимумы, в этом случае рекомендуется ограничиться регистрацией локальных максимумов, стараясь как можно точнее устанавливать порог чувствительности порогового устройства частотомера ручкой "порог чувствительности".
3. Если при измерении локальных максимумов показания стрелочного измерительного прибора весьма малы и отсчет взять затруднительно, можно перевести переключатель SA "регулятор масштаба шкалы микроамперметра" в крайнее правое положение. В этом случае в таблицу следует заносить численное значение, равное 1/2 от показания прибора.

Методика обработки результатов наблюдения

Графическое построение измеренных спектров производится на полулогарифмической бумаге, для того, чтобы весь диапазон измеряемых частот умещался в размерах одного листа формата А4 и при этом масштаб был бы читаемым. Построение спектрограммы (рис. 4.3), характеризующей процесс резания, производится по следующей методике.

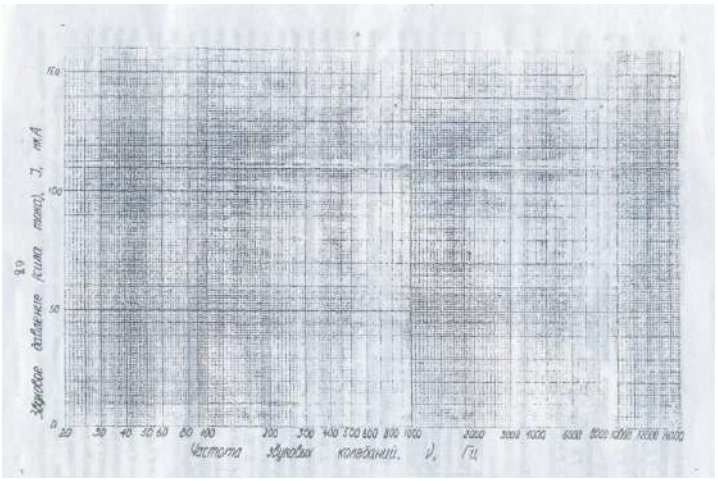


Рис. 4.3. Спектрограмма звуковых колебаний процесса резания

1. На логарифмической шкале абсцисс, соответствующей трем диапазонам АС-1, откладываются частоты в герцах, на линейной шкале ординат – уровни звукового давления акустического спектра резания в микроамперах.
2. На спектрограмме находится уровень звукового давления, соответствующий зарегистрированному максимуму длины полуволны акустического спектра.

Библиографический список

1. Инструкция по применению прибора ПСХ-4 для определения удельной поверхности измельченных материалов/ Госкомитет по промышленности строительных материалов при Госстрое СССР. – М.: 1964. - 14 с.
2. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород: учебник для вузов. – 5-е изд, перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. - 359 с.

3. Спивак А. И., Попов А. Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов. – 4-е изд. Перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. - 208 с.
4. Ямщиков В. С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

Ж. Н. Александрова

ПРАКТИКУМ ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению практических работ
по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Часть 1

Екатеринбург
2020

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии

_____ В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Ж. Н. Александрова

ПРАКТИКУМ ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению практических работ
по дисциплине «Разведочной геофизике» для студентов
специальности 21.05.03 − «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Часть1

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

УДК 550.83
А46

Рецензент: Писецкий В.Б., д-р геол.-мин. наук, профессор,
заведующий кафедрой геоинформатики УГГУ

Александрова Ж.Н.

А46 Практикум по разведочной геофизике: руководство по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки очной и заочной формы обучения. Часть 1 / Ж.Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 54 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Технология геологической разведки»

© Александрова Ж.Н., 2020
© Уральский государственный
горный университет, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. Геофизические методы и физические поля, физические свойства горных пород и минералов……..…5
2. Решение прямой задачи гравиразведки: расчет аномалии силы тяжести над сбросом……..7
3. Палеточный способ решения прямых задач гравиразведки……...9
4. Решение обратной задачи гравиразведки: определение параметров залегания шарообразного тела по измеренному полю…..….11
5. Изучение гравиметра……13
6. Решение прямой задачи магниторазведки для шара…….15
7. Решение прямой задачи магниторазведки для тонкого вертикального стержня……..17
8. Количественная интерпретация данных магниторазведки……...19
9. Измерение вариаций геомагнитного поля……..23
10. Изучение детекторов гамма-излучения……..25
11. Расчет интенсивности гамма-излучения над контактом пород…28
12. Решение прямой задачи аэро-гамма-съемки……..31
13. Решение обратной задачи аэро-гамма-съемки……...34
14. Интерпретация диаграмм гамма-каротажа…….37
15. Оценка качества радиометрической съемки……..41
16. Вертикальные электрические зондирования на модели……...50
17. Симметричное электропрофилирование на модели……..54
18. Изучение геологического разреза по данным СЭП……...57
19. Интерпретация результатов полевых наблюдений методом заряженного тела……..61

Лабораторная работа № 1

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ

1.1. Цель работы: ознакомление с основами геофизических методов – изучаемыми в них физическими полями и дифференциацией соответствующих физических свойств горных пород и минералов.

1.2. Содержание работы

Принципиальная возможность изучения геологического строения Земли по результатам измерения геофизических полей заключается в существенном различии (дифференциации) горных пород по физическим свойствам.

Метод гравиметрии основан на изучении *поля силы тяжести*, которое характеризует **плотностную** неоднородность геологического разреза.

С помощью магнитометрии изучают особенности *стационарного геомагнитного поля*, связанные с различной **намагниченностью** и ***магнитной восприимчивостью*** горных пород и минералов.

Сейсмометрия позволяет определять строение Земли, изучая *поле упругих колебаний*, основными параметрами которого являются ***скорость упругих волн и их поглощение*** в горных породах.

Методами электрометрии изучают *электромагнитное поле*, возникающее в горных породах при прохождении через них электрического тока. Характер этих процессов зависит от ***удельного сопротивления и других электрических и магнитных свойств*** горных пород.

Наглядное представление о возможностях разведочной геофизики дает систематизация геофизических методов по изучаемым полям и дифференциации определяющих их физических свойств для распространенных горных пород и минералов – в форме таблиц и диаграмм.

1.3. Порядок выполнения работы

1. Перепишите в рабочую тетрадь по указанной форме (табл. 1.1) сведения о физических свойствах горных пород и минералов.
2. Запишите в ячейках под названием физических свойств размерность их единиц измерения.
3. Определите и запишите в нижних ячейках таблицы диапазон изменения каждого физического свойства для всех указанных горных пород и минералов.
4. Выберите подходящие типы (линейный или логарифмический) и масштабы шкал для построения прямоугольных диаграмм изменения указанных в таблице физических свойств горных пород и минералов.

5. Постройте диаграммы. В заголовках диаграмм укажите названия соответствующего геофизического метода и изучаемого в нем физического поля. Выделите соответствующей заливкой основные литологические разности: осадочные, метаморфические и магматические.

Таблица 1.1. Физические свойства некоторых горных пород и минералов

№ пп	Горные породы и минералов	Плотность	Магнитная восприимчивость	Скорость продольных волн	Электрическое сопротивление
1	Базальт	2,22…2,85	$1,25 \cdot 10^{-4}$…$1,55 \cdot 10^{-2}$	5,6	10^3…10^5
2	Габбро	2,85…3,05	10^{-3}…$7,5 \cdot 10^{-3}$	6,10…7,80	10^3…10^5
3	Глина	1,06…2,47	$2 \cdot 10^{-6}$…10^{-4}	1,0…2,00	10^0…10^2
4	Глинистый сланец	2,56…2,85	10^{-5}…10^{-4}	2,3…4,7	10^2…10^3
5	Гнейсы	2,58…2,90	10^{-5} …10^{-4}	5,45…6,25	10^2…10^5
6	Гранит	2,52…2,81	0…$4,5 \cdot 10^{-5}$	3,70…6,00	10^3…10^5
7	Диорит	2,72…2,96	$2 \cdot 10^{-4}$…$2 \cdot 10^{-3}$	5,60…6,10	10^4…10^5
8	Известняк	1,51…2,65	$5 \cdot 10^{-6}$…10^{-5}	1,00…5,50	10^2…10^3
9	Магнетит	4,97…5,18	$7 \cdot 10^{-1}$…$2 \cdot 10^{0}$	7,4	10^{-4}…10^{-2}
10	Мел, мергель	1,52…2,22	0…$8,5 \cdot 10^{-4}$	2,00…3,50	10^0…10^3
11	Перидотит	3,15…3,29	$4 \cdot 10^{-4}$…$7,3 \cdot 10^{-2}$	7,85…8,7	10^5…10^6
12	Песок	1,37…2,15	10^{-5}…10^{-4}	0,3…1,6	$6 \cdot 10^1$…$4 \cdot 10^2$
13	Песчаник	1,6…2,77	$2 \cdot 10^{-6}$…$5 \cdot 10^{-5}$	0,8…4,5	10^2…10^3
14	Пирит	4,91…5,02	$2 \cdot 10^{-5}$…$1,6 \cdot 10^{-4}$	7,90…8,05	10^{-4}…10^{-2}
15	Сиенит	2,63…2,90	0…$6,5 \cdot 10^{-3}$	5,8…6,45	10^2…10^5
	Диапазон изменения физических свойств				

Пример диаграммы магнитной восприимчивости, оформленной в приложениях Microsoft Word и Excel, показан на рис.1.1.

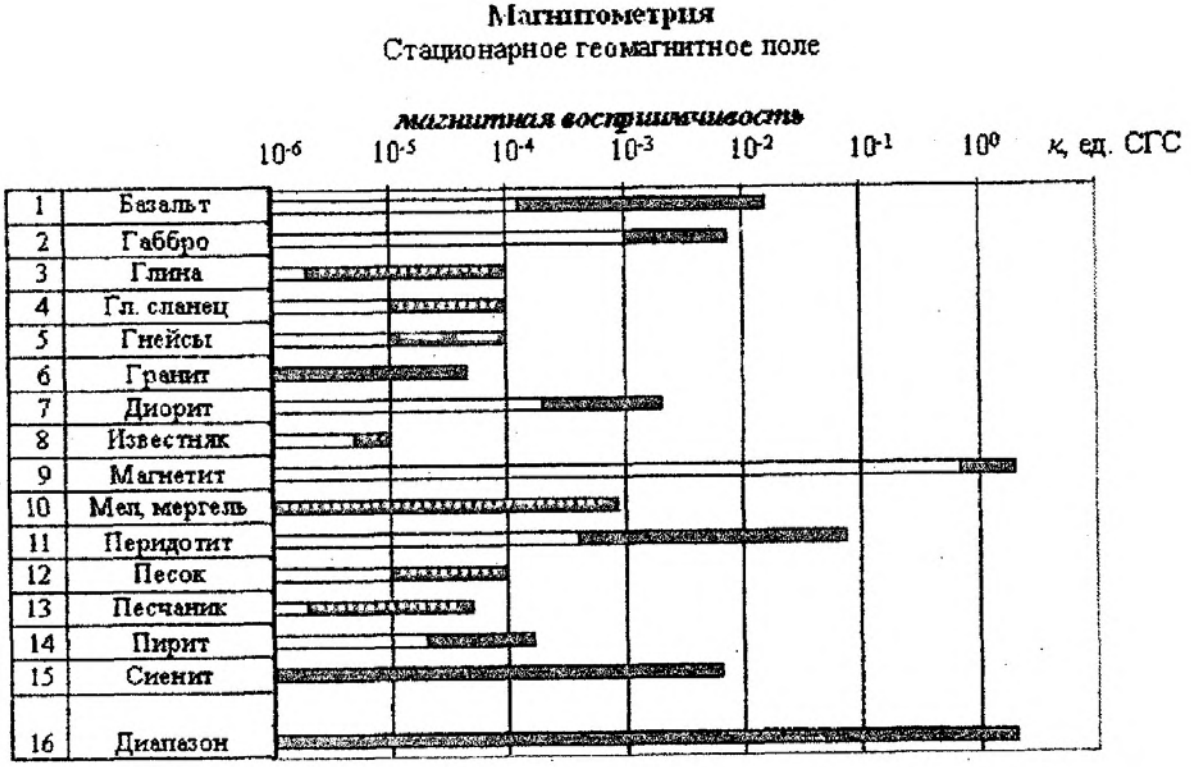


Рис 1.1. Диаграмма магнитной восприимчивости горных пород и минералов

Лабораторная работа № 2

Решение прямой задачи гравиразведки: расчет аномалии силы тяжести над сбросом

Задание:

Рассчитать аномалию силы тяжести для объекта, представляющего собой вертикальный сброс магматических горных пород, перекрытый рыхлыми отложениями (рис 1).

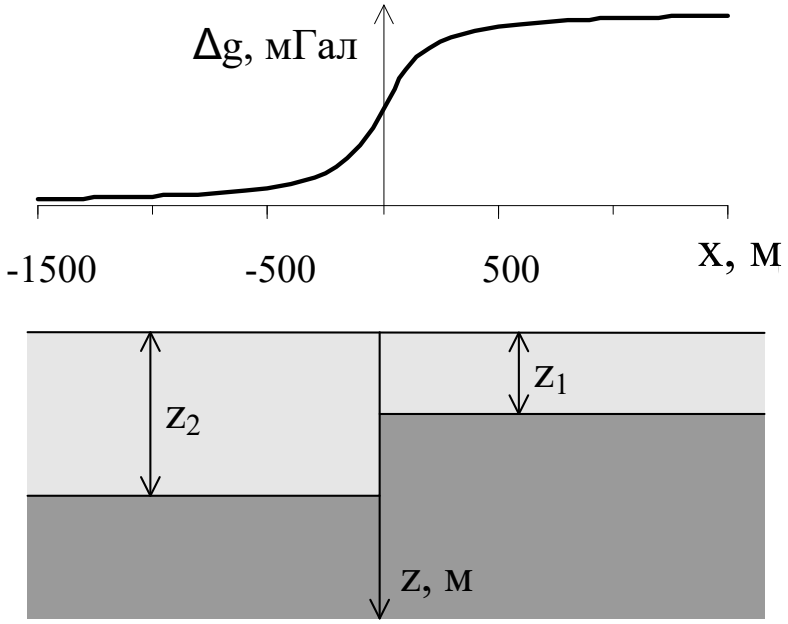


Рис. 1. Гравитационное поле над вертикальным уступом

Исходными данными для расчета являются глубина залегания верхней кромки уступа Z_1 в м, глубина залегания нижней кромки уступа Z_2 в м и избыточная плотность пород уступа $\Delta = \delta_1 - \delta_2$ в г/см^3 (таблица 1).

Расчет выполнить аналитическим способом, используя выражение

$$\Delta g = G\Delta\left[\pi(z_2 - z_1) + 2z_2 arctg\frac{x}{z_2} - 2z_1 arctg\frac{x}{z_1} + x\ln\frac{x^2 + z_2^2}{x^2 + z_1^2}\right],$$

где G = 6,673·10^{-11} Нм^2/кг^2 - гравитационная постоянная (постоянная тяготения), широко используемая в физике, механике, геофизике и астрономии, x – координата точки наблюдения по профилю.

При расчетах избыточную плотность Δ перевести из г/см^3 в кг/м^3, x изменять с шагом 100 м от –1000 м до 1000 м, дополнительно

рассчитать Δg для $x = -50$ м и 50 м. Рассчитанные значения Δg перевести из м/с^2 в мГал, учитывая, что 1 мГал = 10^{-5} м/с^2.

Результаты расчета представить в графическом виде над геологическим разрезом, как это изображено на рис 1.

Таблица 1

Вариант	Z_1, м	Z_2, м	Δ, г/см^3
№ 1	50	100	0,4
№ 2	50	100	0,5
№ 3	50	150	0,2
№ 4	50	150	0,3
№ 5	100	200	0,4
№ 6	100	200	0,5
№ 7	150	250	0,5
№ 8	150	250	0,6
№ 9	200	350	0,5
№ 10	200	400	0,6

Лабораторная работа № 3

Палеточный способ решения прямых задач гравиразведки

Для вытянутых тел сложного сечения и постоянной избыточной плотности расчет Δg можно проводить с помощью палетки Гамбурцева. Палетка приведена на рис.1.

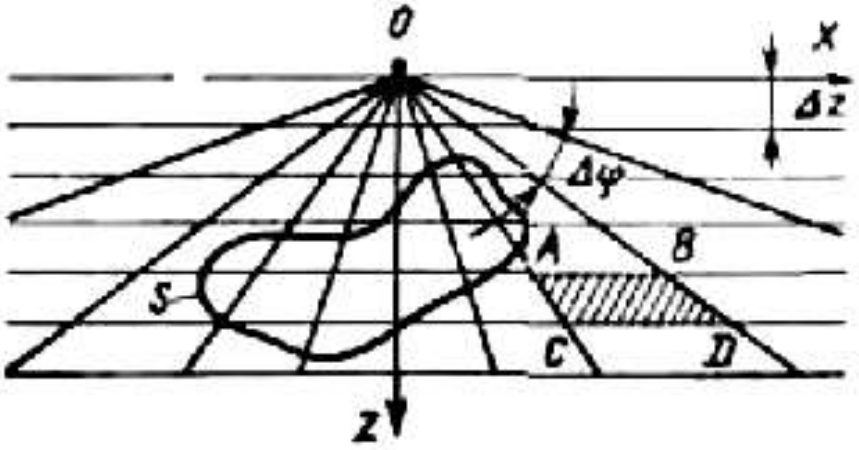


Рис.1. Палетка Гамбурцева для вычисления притяжения двумерными телами с контуром сечения двумерного тела S

Здесь из точки О через один и тот же угол Δφ проведены радиусы, а через равные расстояния Δz — параллельные линии. Оказывается, что значения силы тяжести Δg в точке О за счет притяжения одной бесконечной по оси Y горизонтальной призмой сечением в виде трапеции ABCD одинаково для любой из таких призм и

$$\Delta g_n = 2G\Delta\sigma_n\Delta\varphi\Delta z. \qquad (1)$$

Если на поперечное сечение исследуемого тела приходится m таких элементарных трапеций палетки, то

$$\Delta g(0) = m\cdot\Delta g_n. \qquad (2)$$

Параметр Δg_n представляет собой цену деления палетки и определяется заранее по заданным параметрам разреза, причем Δφ и Δz подбирают так, чтобы цена деления имела какое-либо удобное для расчета постоянное значение, например, 0,1 мГал.

При переходе с одного разреза на другой могут измениться масштаб (и, следовательно, Δz на палетке) и значение избыточной плотности. Чтобы воспользоваться этой же палеткой, необходимо ввести масштабный коэффициент.

Таким образом, аномалию над двумерным телом с помощью палетки Гамбурцева рассчитывают по формуле

$$\Delta g = m\cdot\Delta g_n \qquad (3)$$

Точность расчета Δg палеточным методом зависит от точности аппроксимации поперечного сечения плотностных масс элементарными ячейками па-

летки и может быть повышена путем уменьшения цены деления палетки. Существуют и другие пале-точные способы решения прямых задач гравиразведки, в том числе и трехмерных.

Задание:

1) Рассчитать цену деления палетки Гамбурцева по формуле 1, учитывая, что
$G = 6{,}67\ 10\text{-}11$ м^3 кг$^{-1}$ с$^{-2}$;
Δz=50 м;
$\Delta\varphi$=5°=π/36=0,087;
$\Delta\sigma_n$=0,4 г/см^3=400 кг/м^3.

2) Отметить пикеты на профиле через 100 м.

3) Совмещая начало координат палетки с пикетом, сосчитать количество трапеций палетки, попадающих в контур тела.

4) Процедуру подсчета повторить на всех пикетах.

5) Вычислить $\Delta g(x)$ на каждом пикете, используя выражение (1).
6) Построить график $\Delta g(x)$ в мГал (рис. 2).

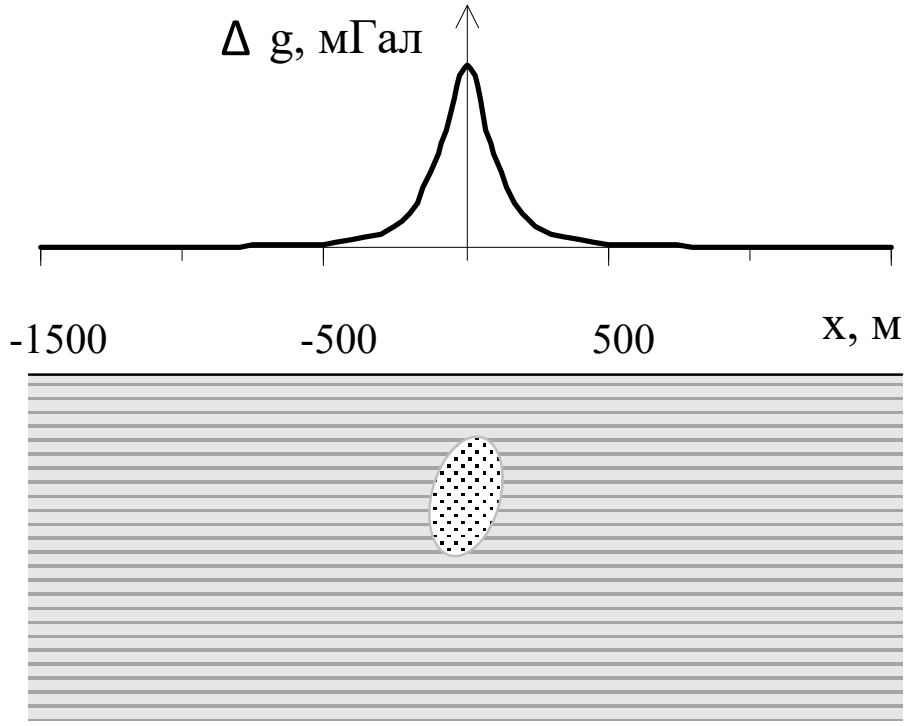


Рис.2. Результат определения аномалии силы тяжести палеточным способом

Лабораторная работа № 4

Решение обратной задачи гравиразведки: определение параметров залегания шарообразного тела по измеренному полю

Задание:

1. Скопировать выданный преподавателем вариант графика Δg.
2. На графике Δg отметить точки, в которых аномалия силы тяжести равна максимальному значению Δg_{max} и половине максимального значения $1/2\Delta g_{max}$.
3. Определить координаты этих точек на профиле в м.
4. Вычислить глубину залегания шарообразного тела.
5. Вычислить аномальную массу шара и его радиус
6. Построить геологический разрез в удобном масштабе.

Форму шара или близкую к нему могут иметь рудные залежи, куполовидные нефтегазоносные структуры, соляные купола, карстовые пустоты и др.

Пусть однородный шар радиусом *r*, объемом *V*, с избыточной плотностью Δσ расположен на оси *Z* на глубине *h* (рис. 1).

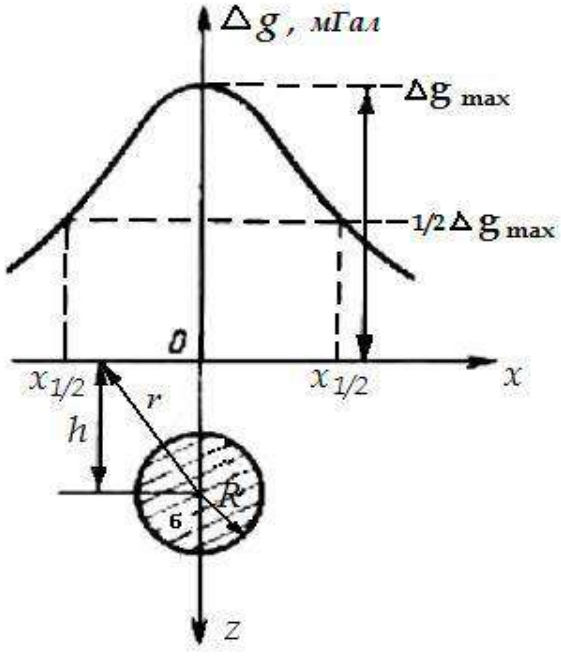


Рис. 1. Гравитационное поле над шаром

По закону всемирного тяготения шар притягивается с такой же силой, как точечная масса, сосредоточенная в его центре. Аномалию над шаром $\Delta g_ш$ можно получить, считая, что аномалия силы тяжести над шаром и аномалия точечной массы, помещенной в его центре, совпадают:

$$\Delta g_ш = \Delta g_1 = G \cdot \Delta\sigma \cdot V \cdot h / r^3 = G \cdot M \cdot h / (x^2 + h^2)^{3/2}$$

График аномалии силы тяжести над шаром приведен на рис 1. Определе-

ние параметров залегания шара выполняют по характерным точкам графика. Используют точки, в которых значение аномалии максимально, а также равно половине максимального значения: Δg_{max} и $1/2\Delta g_{max}$.

Найдем координату x точки, в которой значение поля равно максимальному значению Δg_{max}.

Максимальное значение поля наблюдается над центром шара, при этом $x=0$ и $r=h$. Тогда

$$\Delta g_{\max} = GM / h^2 .$$

Найдем координату x точки, в которой значение поля равно половине максимального значения $1/2\Delta g_{max}$.

$$\frac{1}{2}\frac{GM}{h^2} = \frac{GMh}{(x^2+h^2)^{3/2}},$$

$$\frac{1}{2h^2} = \frac{h}{(x^2+h^2)^{3/2}}.$$

Разделим обе части уравнения на h:

$$\frac{1}{2h^3} = \frac{1}{(x^2+h^2)^{3/2}}.$$

Тогда

$$2h^3 = (x^2+h^2)^{3/2}.$$

Запишем $$(2^{1/3}h)^3 = ((x^2+h^2)^{1/2})^3.$$

Тогда

$$2^{1/3}h = (x^2+h^2)^{1/2}.$$

Возведем в квадрат обе части уравнения:

$$2^{2/3}h^2 = x^2 + h^2.$$

Выразим x:

$$x = \sqrt{(2^{2/3}-1)h^2},$$

Откуда $x=0{,}766h$, а $h=1{,}31x$.

Таким образом, глубину залегания шара можно определить, зная координату x, в которой аномалия силы тяжести равна половине ее максимального значения.

Аномальную массу шара можно найти по формуле:

$$M=\Delta g_{max}h^2/G$$

Если известна избыточная плотность шара, то можно рассчитать его объем V и радиус R:

$$M=V\sigma=4\pi R^3\sigma/3,$$

Откуда

$$R = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi\sigma}}$$

Глубина залегания верхней кромки шара будет равна $H=h-R$.

Лабораторная работа № 5

Изучение гравиметра

В практике гравиразведки широкое применение получил относительный способ измерения силы тяжести, т. е. измерения приращений в двух точках с помощью гравиметров — приборов, в которых сила тяжести сравнивается с силой деформации упругих материалов. Большинство гравиметров построено по принципу пружинных весов.

В качестве уравновешивающей силы в гравиметрах используют силу кручения горизонтальной нити, на которой укреплен рычаг - маятник с массой *m* (рис. 1).

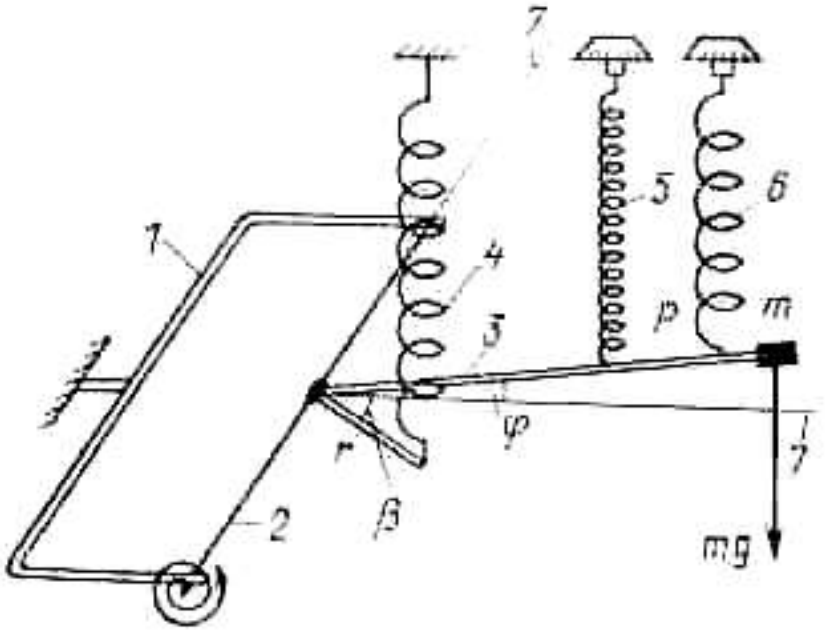


Рис. 1. Принципиальная схема чувствительной системы гравиметра: 1 — рамка; 2 — упругая нить; 3 — рычаг с грузиком; *4*—главная пружина; 5 — измерительная пружина; *6* — диапазонная пружина; 7—линия горизонта

В точке наблюдения момент силы тяжести уравновешивается моментом сил кручения, рычаг отклоняется от горизонта на угол φ и при определенных условиях основное уравнение равновесия упругой системы будет иметь вид (без учета пружин *5* и *6)*

$$m \cdot g \cdot l \cdot \cos\varphi = \tau \cdot (\alpha_0 + \varphi) - k \cdot r \cdot \cos(\beta - \varphi)$$

где l — длина рычага; τ — крутильная жесткость его нитей подвеса; α_0 — начальный угол закручивания нитей; k — коэффициент линейной жесткости главной пружины; r — длина рычага крепления главной пружины; β — угол между рычагами.

Из этого уравнения получается зависимость между изменением угла наклона рычага $\Delta\varphi$ и пропорциональных изменений отсчетов по шкале микрометрического винта гравиметра Δn и приращением Δg*:*

$$\Delta g = C' \cdot \Delta\varphi = C \cdot \Delta n$$

где C′ и *C* — цены деления гравиметра.

При измерении силы тяжести используют компенсационный метод отсчета, при котором микрометрическим винтом меняют натяжение измерительной пружины *5* таким образом, чтобы привести рычаг-маятник *3* в горизонтальное положение. Число оборотов микрометрического винта Δn определяют по специальной шкале с помощью оптической системы. С помощью диапазонного винта и соответствующей пружины *6* перестраивают диапазон прибора, что позволяет расширить интервал измерения в 10 раз и более.

Чувствительная система основных отечественных гравиметров выполнена из плавленого кварца, хотя некоторые, в основном зарубежные, гравиметры имеют металлическую пружину.

Материал пружин подбирают таким, чтобы колебания температуры и другие факторы мало сказывались на величине отсчета. Несмотря на специально принимаемые меры по термостатированию чувствительной системы (помещение ее в сосуд Дюара, изоляция от внешней среды и т. д.), влияние внешних факторов, как и внутренние процессы в упругих элементах системы, приводит к изменению показаний прибора во времени. Поэтому все гравиметры характеризуются дрейфом, или смещением нуль-пункта прибора. Он может достигать нескольких миллигал в сутки.

Время установки и измерения с помощью гравиметра при наземной съемке составляет 2—5 мин. Погрешность измерений *Δg* разными типами гравиметров составляет 0,01—0,5 мГал.

Задание:

1. Изучить устройство гравиметра и принцип взятия отсчетов.
2. Произвести замеры Δ*g* на 1-ом и 5-ом этажах учебного здания. - Δg_{h1} и Δg_{h5}.
3. Используя выражение для поправки за высоту (поправки Фая)

$$\Delta g_h = -0{,}3086h$$

вычислить расстояние между 1-ым и 5-ым этажами здания:

$$\Delta g_{h1} = -0{,}3086h_1,$$

$$\Delta g_{h5} = -0{,}3086h_5,$$

$$\Delta h = h_5 - h_1 = (\Delta g_{h1} - \Delta g_{h5})/0{,}3086.$$

Лабораторная работа № 6

Решение прямой задачи магниторазведки для шара

Прямая задача магниторазведки состоит в вычислении магнитных аномалий по заданному распределению магнитных масс, занимающих объем некоторого тела правильной формы (шара). Предполагается, что известны вертикальная намагниченность *J,* форма, положение и размеры тела. Требуется найти значения полной напряженности магнитного поля T_a, а также вертикальную Z_a и горизонтальную H_a составляющие магнитного поля на дневной поверхности вдоль профиля *x*.

Значения Z_a *и* H_a – компонент магнитного поля от вертикально намагниченного шара вдоль профиля, проходящего над центром шара, определяются по формулам:

$$Z_{\text{а}} = M\,\frac{2h^2 - x^2}{(h^2 + x^2)^{5/2}}, \qquad (1)$$

$$H_{\text{а}} = M\,\frac{3hx}{(h^2 + x^2)^{5/2}}, \qquad (2)$$

где $M = V{\cdot}J = (4\pi R^3 J)/3$ - магнитный момент шара в А·м^2; V - объем шара в м^3; R - радиус шара в м; J - намагниченность шара в А/м; h - глубина до центра шара в м; x - расстояние от начала координат до точки наблюдения в м.

Полная напряженность магнитного поля:

$$T_{\text{а}} = \frac{M(4h^2 + x^2)^{1/2}}{(h^2 + x^2)^2}. \qquad (3)$$

Значения Z_a и H_a определяются в системе СИ в А/м и переводятся в гаммы (γ) и нТл следующим образом:

1 А/м = 10^3 СГС,
1 А/м = $4\pi 10^3\gamma$,
1Э = 79,6 А/м,
1Э = $10^5\gamma$,
1 нТл = 1γ (для воздуха).

<u>Задание</u>.

1. Вычислить значение T_a, Z_a и H_a компонент магнитного поля для вертикально намагниченного шара, используя выражения (1), (2) и (3). Параметры шара, то есть значения *R*, *h*, *J*, выбираются из таблицы 1, согласно заданному варианту.

Значения T_a, Z_a и $H_{\text{а}}$ необходимо рассчитать в следующих точках профиля *x*: 0 м, ±5 м, ±10 м, ±20 м, ±40 м, ±60 м, ±80 м, ±100 м, ±200 м, ±400 м, ±800 м.

Рассчитанные поля T_a, Z_a и H_a необходимо перевести в нТл. Вычисления произвести с точностью до целых единиц нТл и представить в виде таблицы.

2. Результаты расчетов изобразить в виде графиков вдоль профиля с соблюдением всех правил построения графиков. Под графиками привести геологический разрез в масштабе. Образец оформления результатов приведен на рис. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Вариант	h, м	R, м	J, А/м	Вариант	h, м	R, м	J, А/м
1	40	30	0,2	16	50	30	0,22
2	40	50	0,2	17	50	35	0,22
3	50	40	0,2	18	60	40	0,22
4	100	40	0,2	19	55	40	0,22
5	40	30	0,25	20	55	40	0,20
6	70	30	0,2	21	65	45	0,22
7	50	45	0,22	22	60	45	0,24
8	55	45	0,18	23	65	45	0,20
9	50	45	0,19	24	60	45	0,21
10	40	35	0,19	25	50	35	0,21
11	35	30	0,18	26	45	30	0,21
12	45	35	0,18	27	55	35	0,20
13	55	40	0,2	28	55	40	0,20
14	50	40	0,21	29	60	40	0,20
15	50	40	0,21	30	60	40	0,23

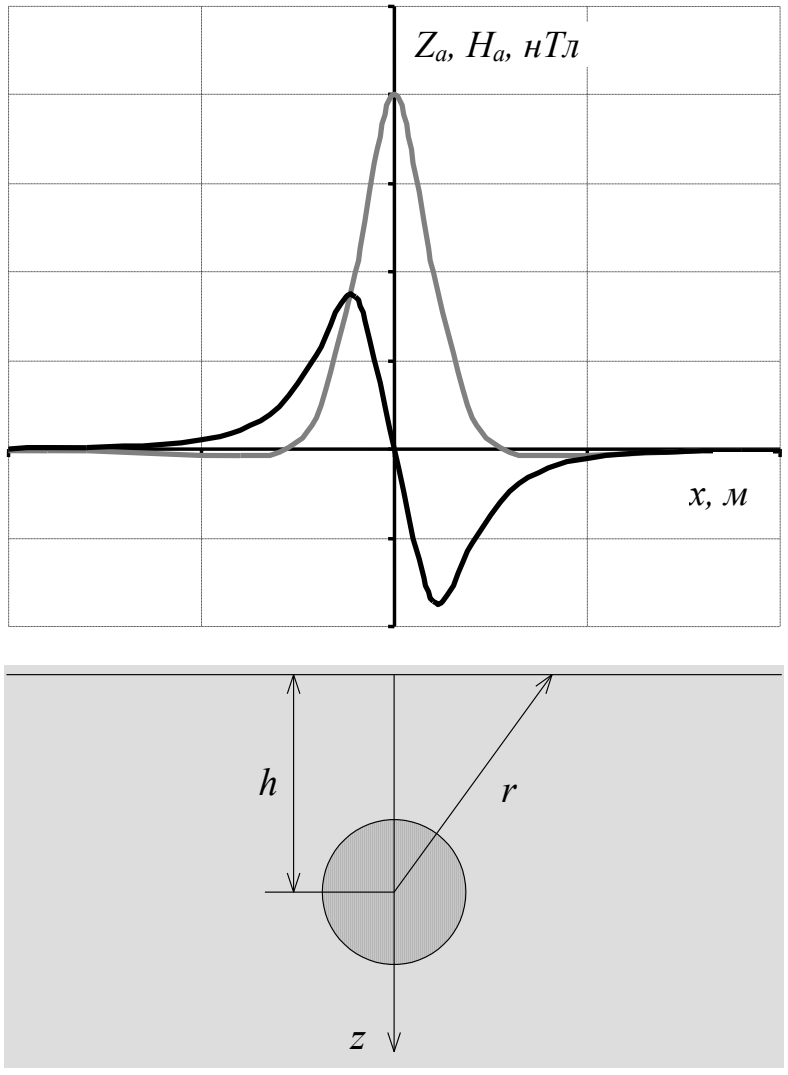


Рис. 1. Магнитное поле над шарообразным телом

Лабораторная работа № 7

Решение прямой задачи магниторазведки для тонкого вертикального стержня

Под "тонким" стержнем понимается геологическое тело, имеющее малый диаметр *d* по сравнению с глубиной залегания *h* верхнего конца стержня. Соотношение *d*/*h* должно быть не больше 0,1-0,2 или глубина залегания должна быть в 10-20 раз больше диаметра тела. Длина тела бесконечно большая, так что нижний конец располагается на большой глубине и его влиянием на магнитную аномалию пренебрегают.

К аномалиям над бесконечным вертикальным стержнем в природных условиях относятся аномалии над кимберлитовыми трубками небольших размеров, над апофизами основной магмы, над мелкими отдельными геологическими образованиями вертикального падения с малой площадью поперечного сечения.

При однородной и вертикальной намагниченности магнитные массы будут располагаться на концах стержня. Модуль полного вектора *T* от такого источника по закону Кулона будет:

$$T = \frac{m}{r^2} = \frac{m}{h^2 + x^2} \qquad (1)$$

где *h* – глубина залегания верхнего конца стержня; *x* – расстояние от проекции конца стержня на дневную поверхность до точки наблюдения.

Уравнения для вертикальной соствляющей *Z*а и горизонтальной составляющей *H*а аномального магнитного поля по профилю, проходящему через центр стержня, будут иметь вид:

$$Z_{\text{а}} = \frac{m}{r^2}\sin\theta = \frac{mh}{(h^2 + x^2)^{3/2}}\ , \qquad (2)$$

$$H_{\text{а}} = \frac{m}{r^2}\cos\theta = \frac{-mx}{(h^2 + x^2)^{3/2}}\ , \qquad (3)$$

где θ - угол, отсчитываемый от положительного направления оси *x* по часовой стрелке до радиуса-вектора *r*; *m* – магнитная масса, сосредоточенная на верхнем конце стержня.

Значения Z_a и H_a определяются в системе СИ в А/м и переводятся в гаммы (γ) и нТл следующим образом:

1 А/м = 10^3 СГС,
1 А/м = $4\pi 10^3\gamma$,
1Э = 79,6 А/м,
1Э = $10^5\gamma$.
1 нТл (для воздуха) = 1γ.

Кривая *Z*а (рис. 1) положительная, имеет максимум при *x*=0 (θ=90°). Магнитное поле над стержнем для вертикальной составляющей *Z*а в силу осевой симметрии будет иметь в плане изометричную форму - в виде концентрических окружностей. Горизонтальная составляющая *H*а слева от стержня положи-

тельная, т.е. по направлению совпадает с осью о*X*; справа от стержня - отрицательная. Над стержнем при *x*=0 *H*а=0 и меняет знак.

Задание:

1. Вычислить значения T_a, Z_a и H_a - компонент магнитного поля для тонкого вертикального стержня, который намагничен вертикально. Исходные данные приведены в таблице 1. Расчет выполнить для *x* = 0 м, ±5 м, ±10 м, ±20 м, ±40 м, ±60 м, ±80 м, ±100 м, ±200 м, ±400 м, ±600, ±800 м.

Таблица 1

Вариант	*h, м*	*m,* А·м	*Вариант*	*h, м*	*m,* А·м
1	40	10	8	110	80
2	50	20	9	120	90
3	60	30	10	130	100
4	70	40	11	140	110
5	80	50	12	150	120
6	90	60	13	160	130
7	100	70	14	170	140

2. Результаты расчетов представить в виде графиков по профилю, проходящему над стержнем. Под графиками привести геологический разрез в масштабе. Образец оформления результатов приведен на рис 1.

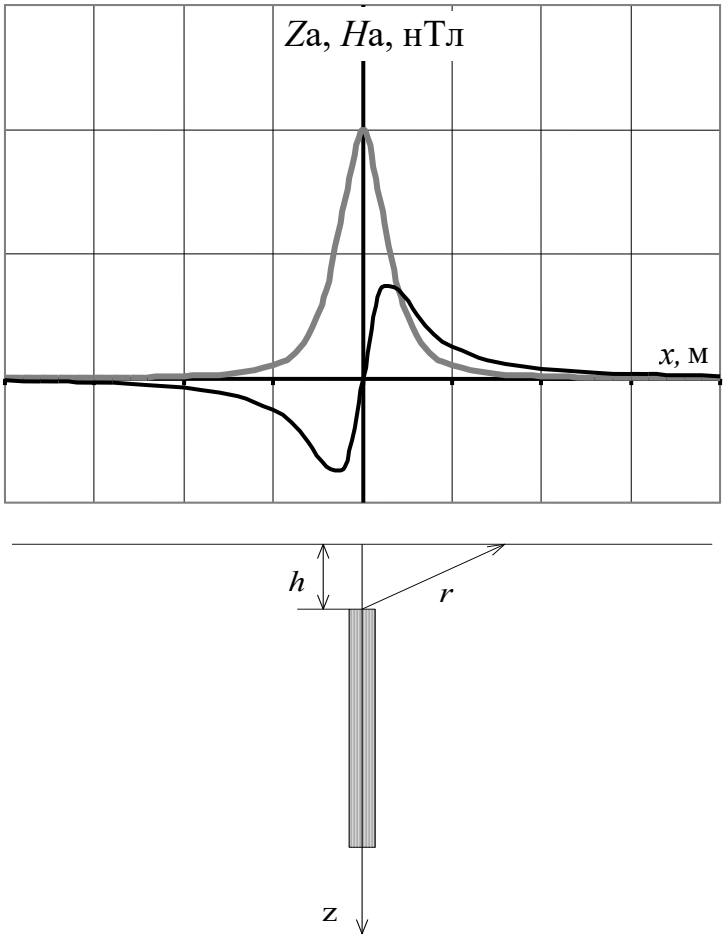


Рис.1. Магнитное поле над вертикальным стержнем

Лабораторная работа № 8

Количественная интерпретация данных магниторазведки

При магниторазведочных работах выполняют измерения вертикальной (Z) и горизонтальной (H) составляющих магнитного поля. Результаты представляют в виде план-графиков и карт.

Изучаемые объекты могут проявляться как положительными, так и отрицательными аномалиями, поскольку их намагничение является двухполярным. Оказывают влияние также направление вектора намагничивающего поля Земли и наличие остаточной намагниченности пород.

Интерпретация материалов магниторазведки может быть количественной и качественной.

Качественная интерпретация позволяет получать информацию о местоположении пород с различными магнитными свойствами, форме аномалиеобразующих объектов, примерном положении их относительно профилей измерений.

Количественная интерпретация дает возможность определить размеры и глубину залегания геологического объекта. Для этого разработаны аналитические, графические и палеточные способы.

В аналитических способах по графикам определяют абсциссы характерных точек: X_{max}, X_{min}, $X_{1/2}$, $X_{1/4}$, X_0, где аномалии равны, соответственно, максимальному и минимальному значениям, половине максимума, одной четверти максимума или нулю (рис. 1).

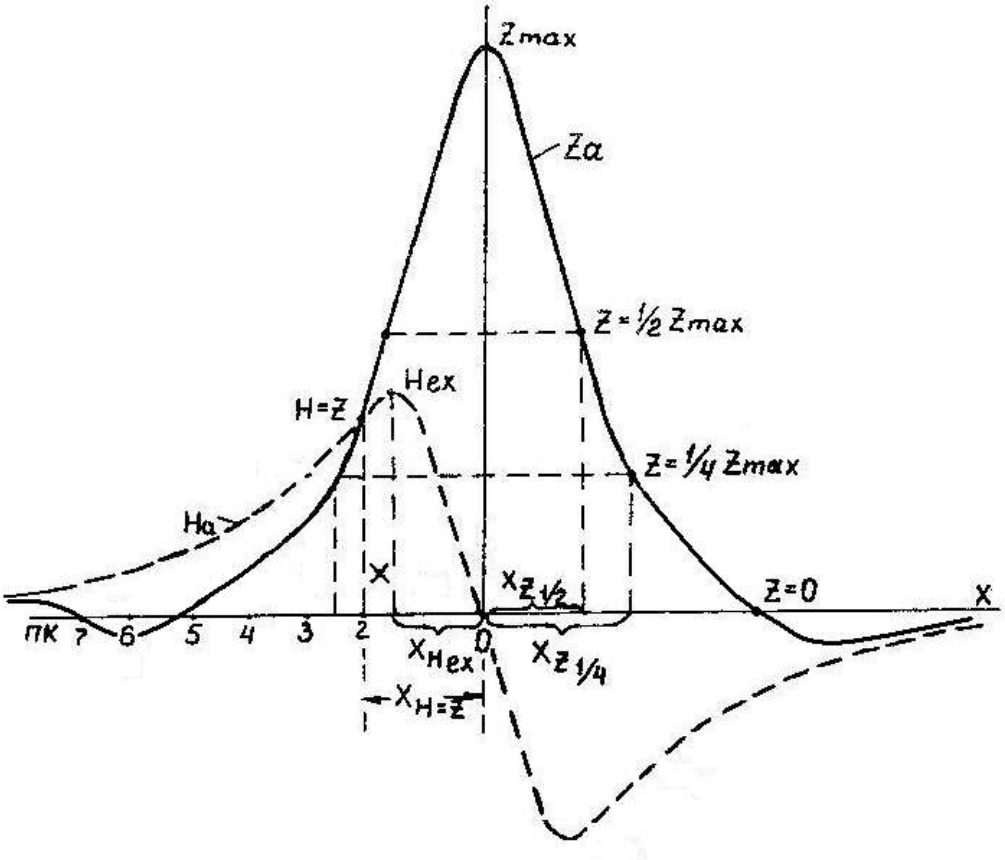


Рис. 1. Интерпретация кривых Z_a и H_a способом характерных точек

Значения абсцисс характерных точек подставляют в формулы, полученные при решении прямых задач. Вычисляют глубину залегания верхней кромки *h*, для объектов "бесконечно" глубоко уходящих вниз, или глубину залегания центра масс *H* для тел ограниченного распространения по глубине. Средняя относительная погрешность определения глубины составляет 20-30%. Ниже показано применение метода характерных точек для интерпретации магнитных аномалий над объектами простой геометрической формы.

Вертикальный пласт ограниченного распространения на глубину.

По характерным точкам графиков Z_a и H_a можно рассчитать следующие элементы: глубину залегания центра пласта $h_ц$, вертикальный размер сечения пласта $2l$, глубину залегания верхней $h_ц - l$ и нижней $h_ц + l$ кромок пласта.

1. Для определения $h_ц$ по графику Z_a определяют абсциссы точек $x_0(Z_a = 0)$ и $x_{0,5}(Z_a = 0{,}5 \cdot Z_{a\max})$. Тогда

$$h_ц = \sqrt{\frac{x_0^4 - x_{0,5}^4}{4x_{0,5}^2}} .$$

2. Если на кривой Z_a точка, где $Z_a = Z_{a\min}$ с абсциссой $x_{\min}$ выражена достаточно четко, то

$$h_ц = \frac{x_{\min}^2 - x_0^2}{2x_0}.$$

3. Величину l вычисляют по абсциссе точки $x_{Z=H}$, в которой $Z_a = H_a$, т.е.

$$l = \sqrt{h_ц^2 - 2h_ц \cdot x_{Z=H} - x_{Z=H}^2} .$$

Горизонтальный круговой цилиндр.

Определение глубины залегания центра поперечного сечения цилиндра $h_ц$ выполняют по характерным точкам на кривых H_a и Z_a:

1) по абсциссе точки, в которой $Z_a = 0$, $h_ц = x_{Z=0}$

2) по абсциссе точки $x_ц = H$, в которой $Z_a = H_a$, $h_ц = \frac{x_{Z=H}}{0{,}7}$

3) по абсциссе точки x_{Hex}, в которой $H_a = H_{aex}$, $h_ц = \frac{x_{Hex}}{0{,}58}$

4) по абсциссе точки $x_{z\min}$, в которой $Z_a = Z_{a\min}$, $h_ц = \frac{x_{z\min}}{1{,}73}$

5) по абсциссе x_i i-х точек графиков Z_a и H_a,

$$h_ц = x_i((\frac{Z_a}{H_a})_i + \sqrt{(\frac{Z_a}{H_a})_i^2 + 1}).$$

В графических способах наиболее широкое применение находит метод касательных, который заключается в проведении на аномалиях графиков Z_a касательных, параллельных оси X в точках максимума и минимума, а также в точках перегиба (точках максимальных градиентов) (рис. 2).

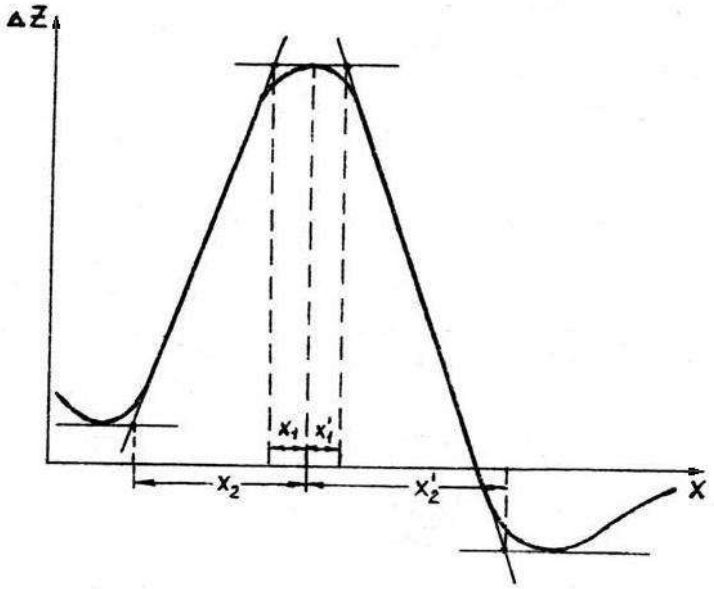


Рис. 2. Интерпретация кривой Z_a способом касательных

Для точек пересечения всех касательных определяют их абсциссы X_1, X_2, X_1', X_2'. Приближенную глубину залегания верхней кромки пласта, создавшего аномалию, рассчитывают по формулам:

$$h = \frac{x_2 - x_1}{2} \text{ и } h' = \frac{x_2' - x_1'}{2}.$$

Среднее из полученных значений h и h′ является оценочной глубиной залегания верхней кромки пласта. При этом, глубина залегания h, вычисленная методом касательных, может отличаться от истинной в зависимости от формы и размеров исследуемых объектов. Поэтому в расчетные формулы вводятся поправочные коэффициенты, которые получены для разных соотношений размеров и глубин залегания тех или иных объектов. Значения этих коэффициентов применительно к примерам задания приведены для каждого варианта в расшифровке выполнения задания.

Задание:

Вариант 1. Способом характерных точек и касательных определить элементы залегания вертикального пласта "бесконечного" простирания и ограниченного распространения на глубину:

а) По данным табл. 1 на миллиметровке построить графики H_a и Z_a в масштабах: вертикальный I см - 0,025 Гс, горизонтальный I см - 20 м.

б) Вычислить элементы залегания вертикального пласта способами для вертикального пласта ограниченного распространения на глубину.

в) При вычислении глубины залегания пласта по способу касательных ввести повышающий поправочный коэффициент 0,7.

Вариант 2. Способом характерных точек и касательных определить элементы залегания горизонтально залегающего цилиндра "бесконечного" простирания:

а) По данным табл.2 на миллиметровке построить графики H_a и Z_a. Расстояние X (в метрах) наносят на ось абсцисс от нулевой точки (которая принимается за начало координат) влево и вправо через 10 м в масштабе I см - 20 м. Значения H_a и Z_a откладывают по оси ординат в масштабе I см - 0,1 Гс.

б) Вычислить глубину залегания центра поперечного сечения цилиндра $h_ц$ способами, описанными для горизонтального кругового цилиндра.

в) При вычислении глубины $h_ц$ по способу касательных ввести повышающий поправочный коэффициент 0,52.

Таблица 1

X,м	Z_a, Гс	H_a, Гс
0	0,280	0
±10	0,254	∓0,068
±20	0,212	∓0,120
±30	0,170	∓0,152
±40	0,119	∓0,162
±50	0,080	∓0,160
±60	0,044	∓0,150
±70	0,026	∓0,139
±80	0,008	∓0,125
±90	-0,005	∓0,112
±100	-0,012	∓0,098
±110	-0,017	∓0,086
±120	-0,022	∓0,070
±130	-0,025	∓0,067
±140	-0,026	∓0,060
±150	-0,025	∓0,054
±160	-0,022	∓0,047
±170	-0,019	∓0,042
±180	-0,014	∓0,037

Таблица 2

X, м	Z_a, Гс	H_a, Гс
0	1,20	0
±10	1,16	∓0,33
±20	1,08	∓0,59
±30	0,96	∓0,74
±40	0,72	∓0,78
±50	0,46	∓0,75
±60	0,20	∓0,69
±70	0	∓0,62
±80	-0,18	∓0,52
±90	-0,20	∓0,44
±100	-0,18	∓0,37
±110	-0,14	∓0,28
±120	-0,10	∓0,24
±130	-0,09	∓0,22
±140	-0,08	∓0,20
±150	-0,07	∓0,16
±160	-0,06	∓0,12
±170	-0,05	∓0,10
±180	-0,04	∓0,09

Лабораторная работа № 9

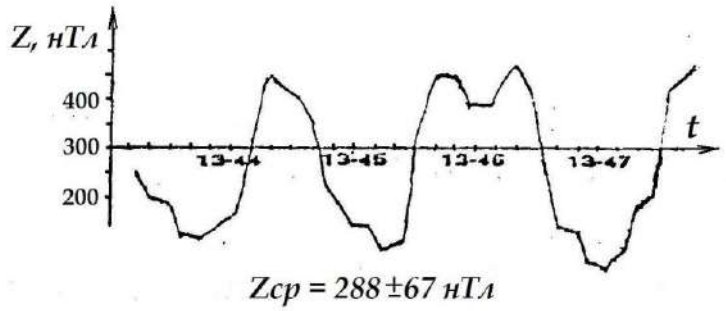
Измерение вариаций геомагнитного поля

Содержание работы : С помощью оптико-механического магнитометра М-27 провести измерение вариаций вертикальной составляющей (z-составляющей) МПЗ в течение 5 минут с интервалом времени 5-10 секунд и результаты измерений записать в журнал.

Обработка результатов измерений.

1. Значения отсчетов по шкале магнитометра умножить на цену деления (10 нТл/дел).

2. Построить вариограмму(рис.1).



Zср = 288 ±67 нТл

Рис. 1. Вариограмма значений вертикальной составляющей МПЗ (время местное)

$$Z_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} Z_i}{N} \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (Z_i - Z_{\text{ср}})^2}{N-1}}$$

3. Рассчитать среднее значение напряженности магнитного поля за время наблюдения и среднее квадратичное отклонение.

4. Оценить интенсивность вариаций в баллах (см. табл.1), осреднив максимальные значения отклонения Δz в течение минуты от общего среднего.

Таблица 1

Шкала балльности вариаций МПЗ

Амплитуда изменения МПЗ, нТл	0 -5.5	11	22	44	77	132	220	363	550	>550
Баллы	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оценка	Норма			Возмущение			Буря			

Журнал измерений Z

t	n	Z	$Z-Z_{ср}$	$(Z-Z_{ср})^2$

Лабораторная работа № 10

Изучение детекторов гамма-излучения

Любой радиометрический прибор имеет в качестве основной части детектор (счетчик), подающий в усилительно-измерительную схему сигналы о поступлении ионизирующих частиц или гамма-квантов.

Существуют различные способы детектирования (регистрации) радиоактивных излучений. Все они основаны на эффектах, прямо или косвенно связанных с ионизацией или возбуждением атомов, возникающих при взаимодействии излучений с веществом. Наиболее широкое распространение получили детекторы, в которых энергия излучения тем или иным способом преобразуется в электрическую.

В настоящее время применение нашли три типа детекторов:

1) ***ионизационные детекторы и газоразрядные счетчики;***

Принцип их работы основан на ионизирующем действии излучения на газы.

Ионизационная камера (рис. 1) представляет собой воздушный конденсатор, состоящий из двух металлических пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, к которым приложена разность потенциалов. В сеть включен гальванометр. В отсутствии радиации тока в цепи не будет, поскольку воздух является изолятором. Радиоактивные частицы, попав внутрь конденсатора, ионизируют воздух, превращая его в проводник электричества. Сила тока измеряется гальванометром. По силе тока определяется интенсивность излучения.

Счетчик Гейгера-Мюллера представляет собой герметичный баллон (трубку), заполненный газовой смесью из аргона и спирта с добавкой галоидов (рис.2). По оси трубки натянута нить, служащая в качестве анода. Катодом является внутреннее металлическое покрытие баллона. На электроды подается высокое напряжение постоянного тока (400÷1000 В). При попадании внутрь баллона бета-частиц или электронов, выбитых из стенок счетчика гамма-лучами, происходит ионизация газа. В результате между электродами возникает лавина ионов и происходит кратковременный электрический разряд. В цепи счетчика регистрируется импульс напряжения. Чувствительность счетчиков зависит в первую очередь от материала катода, из которого гамма-лучи выбивают электроны

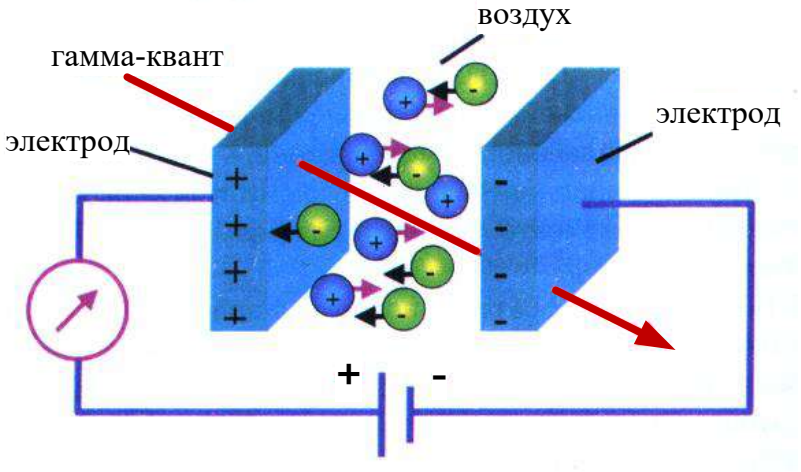


Рис. 1. Устройство ионизационной камеры

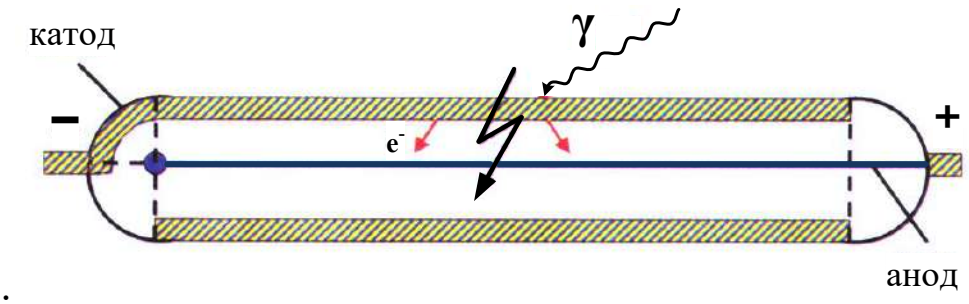


Рис. 2. Устройство газоразрядного счетчика

2) ***полупроводниковые детекторы***;

Они сходны с ионизационным детекторами, но роль ионизационной камеры в этом случае выполняют твердые полупроводники.

Полупроводники - это кристаллические вещества, электропроводность которых при обычной температуре имеет промежуточное значение между электропроводностью металлов (10^{6}-10^{4} Ом$^{-1}$см$^{-1}$) и диэлектриков (10^{-10}-10^{-12} Ом$^{-1}$см$^{-1}$). Под действием радиоактивных частиц в полупроводниковых детекторах происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (рис. 3). В результате образуются свободные носители зарядов: электроны (*n*-проводимость) и дырки (*p*-проводимость). Под действием внешнего электрического поля, приложенного к полупроводнику, электроны и дырки притягиваются к соответствующим электродам, обусловливая накопление заряда. Последний дает импульс напряжения, который подается в усилительно-измерительную схему прибора.

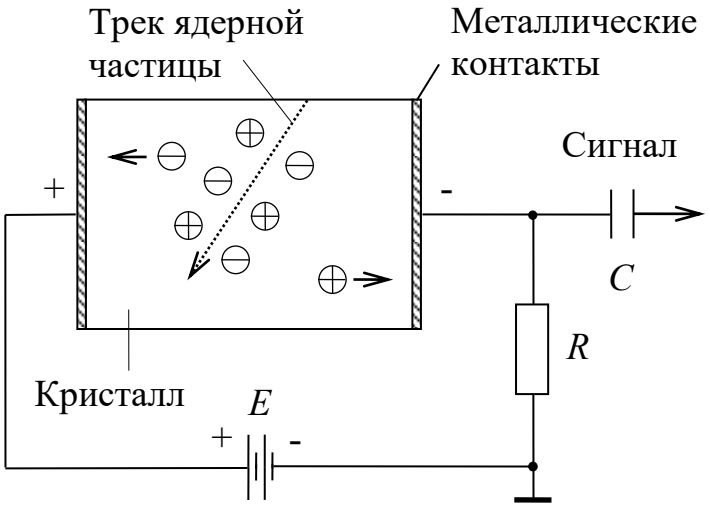


Рис. 3. Принцип работы полупроводникового детектора

В качестве полупроводника в радиометрических приборах чаще всего применяют монокристаллы германия. С его помощью регистрируют высокоэнергетические гамма- и бета-лучи. Для регистрации альфа-частиц, низкоэнергетических гамма-квантов и рентгеновских лучей используют кремниевые детекторы (монокристаллы кремния).

В противоположность металлам, у которых электропроводность умень-

шается с ростом температуры, у полупроводников с увеличением этого параметра электропроводность резко возрастает. Поэтому многие из полупроводниковых материалов требуют сильного охлаждения при работе, что усложняет устройство приборов, их эксплуатацию и удорожает их стоимость. Исследователи находятся в постоянном поиске новых полупроводников, которые могут работать при обычных температурах. К таким материалам относятся теллурид кадмия, арсенид галлия и йодид ртути, которые уже используются в самых современных радиометрах и спектрометрах. Поскольку плотность полупроводниковых материалов намного выше плотности газов, то энергия поглощаемых частиц в них используется полнее, чем в ионизационных камерах. Поэтому полупроводниковые детекторы обладают очень высокой разрешающей способностью.

3) ***сцинтилляционные детекторы;***

Сущность работы сцинтилляционного счетчика заключается в регистрации вспышек *люминесценции,* возникающих в некоторых кристаллах, органических жидкостях или пластмассах при попадании в них заряженных частиц или гамма-квантов.

Вспышки в кристалле фиксируются *фотокатодом*, и в цепи возникает импульс электрического тока (рис.4).

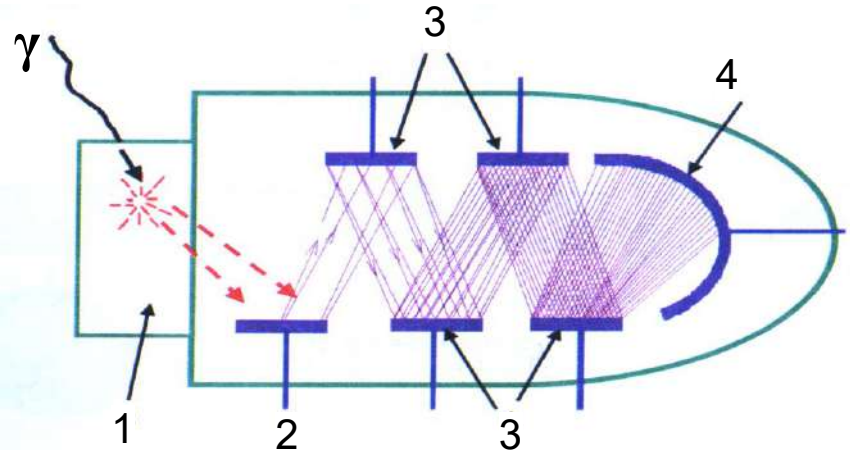


Рис. 4. Сцинтилляционный детектор: 1 - сцинтиллятор, 2 - фокусирующий электрод, 3 - система динодов, 4 - анод ФЭУ

Однако сами по себе вспышки могут быть очень слабыми. Для их фиксации применяются *фотоэлектронные умножители* (ФЭУ). Они представляют собой вакуумные электронные приборы с системой умножения электронов, выбитых световой вспышкой с поверхности фотокатода (рис.4). Умножительная система состоит из нескольких последовательно расположенных *динодов* (эмиттеров), покрытых специальным слоем. Электроны, бомбардирующие диноды, выбивают из них вторичные электроны, количество которых минимум в 2 раза превышает число первичных электронов. Таким образом, каждый последующий динод увеличивает количество электронов. С последнего динода в усилительно-измерительную схему прибора поступает лавина электронов. Благодаря ФЭУ сцинтилляционные счетчики обладают гораздо большей чувствительностью по сравнению с газонаполненными счетчиками.

Лабораторная работа № 11

Расчет интенсивности гамма-излучения над радиоактивным пластом, выходящим на дневную поверхность

Допустим, что вертикальный активный пласт мощности ΔH выходит на дневную поверхность. Найдем распределение γ-поля по профилю x на высоте h от границы раздела земля-воздух.

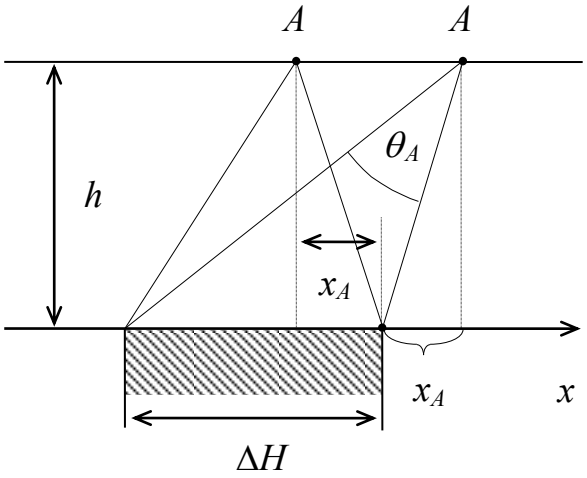


Рис. 1.

Начало координат поместим на границу раздела пласт–вмещающая неактивная среда. При рассмотрении этой задачи ограничимся расчетом γ-поля в произвольной точке A профиля x (рис.1). Если высота h такая, что можно пренебречь ослаблением γ-лучей в воздухе, то формула расчета поля через телесный угол будет выглядеть следующим образом:

$$I_A = K\sigma_0\omega_A \qquad (1)$$

где ω_A - телесный угол, под которым видна излучающая поверхность однородно-активного пласта из точки наблюдения A, K – пересчетный коэффициент радиометра в ((мкР/ч)·см^2)/г, σ_o – эквивалентная поверхностная плотность источников гамма-излучения в гU/см^2.

Эквивалентная поверхностная плотность источников гамма-излучения σ_o зависит от содержания радиоактивного элемента Q и массового коэффициента поглощения гамма-излучения $\bar{\mu}$:

$$\sigma_o = \frac{Q \cdot 10^{-2}}{\bar{\mu}}. \qquad (2)$$

Для уран-радиевого ряда $\bar{\mu}$=0,032 см^2/г.

Если простирание пласта бесконечно, а съемочный профиль проложен вкрест простирания, то можно показать, что телесный угол ω_A будет равен двум плоским углам θ_A (рис. 1), т.е.

$$I_A = 2K\sigma_0\theta_A, \qquad (3)$$

Поскольку

$$\theta_A = \operatorname{arctg}\frac{x_A + \Delta H}{h} - \operatorname{arctg}\frac{x_A}{h},$$

то

$$I_A = 2K\sigma_0\left(\operatorname{arctg}\frac{x_A + \Delta H}{h} - \operatorname{arctg}\frac{x_A}{h}\right). \qquad (4)$$

Таким образом, расчет γ-поля по съемочному профилю в данном случае сводится к расчету плоских углов θ_i, которые легко находятся в любой точке с заданными параметрами ΔH, h и x_i.

Задание.

1. Используя выражение (4), рассчитать интенсивность гамма-излучения над радиоактивным пластом, выходящим на дневную поверхность.
2. Координату x менять от 0 до 100 м с шагом $\Delta x = 5$ м. Начало координат поместить на правую границу пласта.
3. Пересчетный коэффициент радиометра K принять равным 2860 ((мкР/ч)·см^2)/г.
4. Высоту точки измерения h и содержание урана Q_U взять согласно заданному варианту (табл. 1).

Таблица 1

вариант / данные	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Q_U, %	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
h, м	0,5	1	1,5	2	2,5	3	0,5
ΔH, м	40	40	40	50	50	50	60

продолжение табл. 1

вариант / данные	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**
Q_U, %	0,008	0,009	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
h, м	1	1,5	2	2,5	3	1	2
ΔH, м	60	60	50	50	50	40	40

4. Результаты расчета привести в виде графика, под которым поместить разрез в соответствующем масштабе (рис. 2).

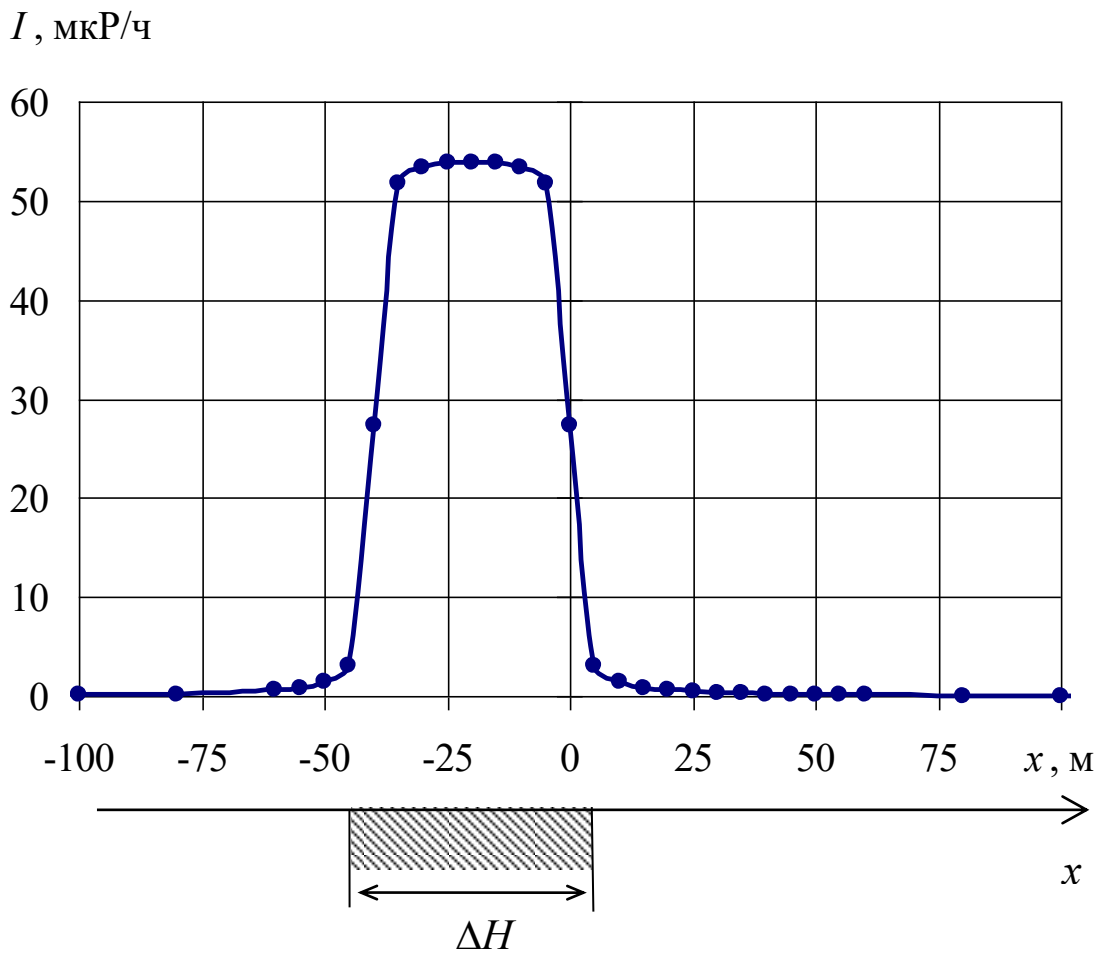


Рис. 2. Интенсивность гамма-излучения над радиоактивным пластом, выходящим на дневную поверхность

Лабораторная работа № 12

Изучение характера инерционных искажений при аэро-гамма-съемке

Радиометры для регистрации гамма-поля обладают инерционностью, т.е. запаздыванием показаний прибора во времени. Инерционность обусловлена наличием в усилительно-регистрирующей схеме интегрирующего контура – *RC*-цепочки. При неподвижном радиометре, например при пешеходной гамма-съемке , это обстоятельство не влияет на показание прибора. Однако при съемке в движении (авто-, аэро-гамма-съемка) записанная кривая интенсивности искажается – она смещается в сторону движения радиометра, а максимум уменьшается по амплитуде. Поэтому записанная кривая не соответствует фактической интенсивности. При авто-гамма-съемке искажениями обычно пренебрегают из-за невысокой скорости премещения радиометра, зато при аэро-гамма-съемке искажения необходимо учитывать.

Для выяснения характера инерционных искажений необходимо перестроить теоретически рассчитанную кривую в кривую, которую записал бы аэро-гамма-радиометр при съемке.

Расчет теоретической кривой интенсивности точечного источника для высоты *h* производится по формуле

$$I_i^{\text{теор}} = I_o \frac{e^{-\mu_в \sqrt{h^2 + x_i^2}}}{h^2 + x_i^2}, \qquad (1)$$

где I_o – интенсивность гамма-поля на поверхности земли, $\mu_в$ – коэффициент ослабления гамма-излучения в воздухе, x_i – координата *i*–ой точки по профилю.

Записанная интенсивность гамма-излучения в *i*-ой точке профиля:

$$I_i^{\text{зап}} = (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}) \cdot I_i^{\text{теор}} + e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \cdot I_{i-1}^{\text{зап}}, \qquad (2)$$

где $I_i^{\text{теор}}$ – теоретическая интенсивность гамма-излучения в *i*-ой точке профиля; $I_{i-1}^{\text{зап}}$ – записанная интенсивность гамма-излучения в предыдущей точке, т.е. в точке с номером *i*-1; τ – постоянная времени радиометра, определяемая произведением *R* на *C*; Δt – интервал времени между соседними отсчетами интенсивности гамма-излучения.

Интервал времени Δt между соседними отсчетами интенсивности гамма-излучения можно найти, зная расстояние Δx меду соседними отсчетами в м и скорость движения самолета *v* в м/с:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v}. \qquad (3)$$

Задание

1) Рассчитать по формуле (1) и построить с шагом Δx=50 м теоретическую кривую интенсивности гамма-поля точечного источника, находящегося на дневной поверхности. Расчет кривой провести для точек с координатами *x*, из-

меняющимися от -300 до 300 м.

2) По формуле (2) перестроить полученную кривую в записанную, приняв τ=2 с, v=180 км/ч, Δx=50 м. При вычислении первого значения $I_i^{\text{зап}}$ $I_{i-1}^{\text{зап}}$ принять равной нулю.

3) Результаты вычисления $I_i^{\text{теор}}$ и $I_i^{\text{зап}}$ привести на графике (рис 1, 2).

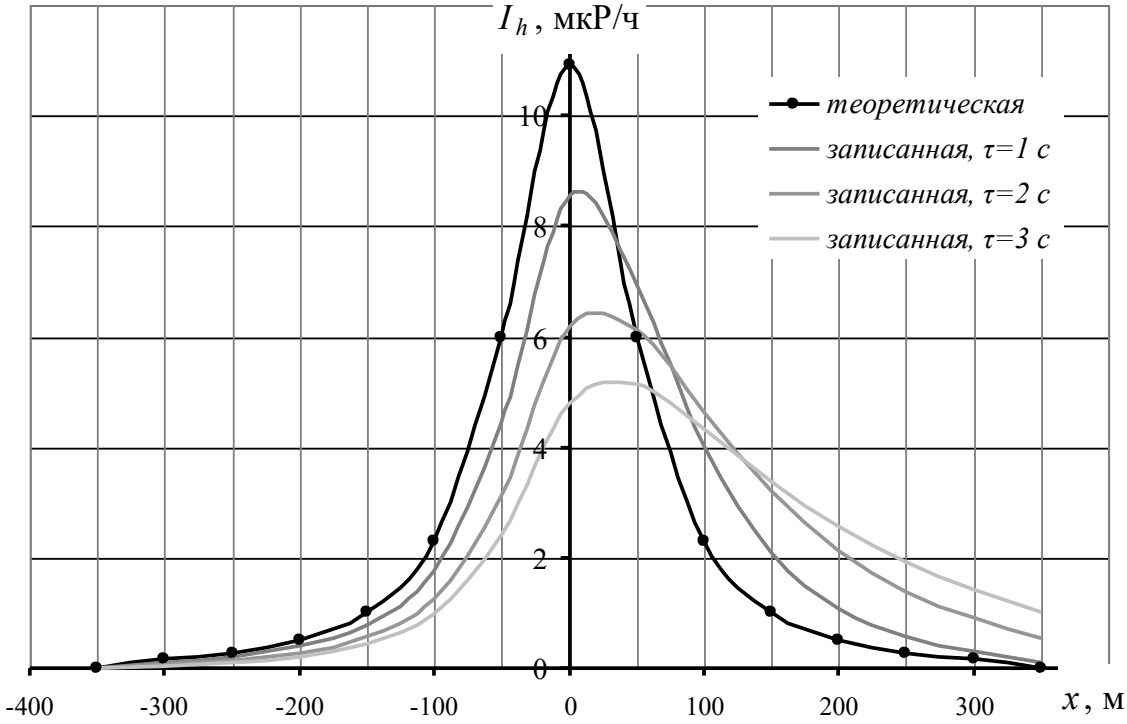


Рис. 1. Теоретическая кривая интенсивности гамма-поля точечного источника, находящегося на дневной поверхности, и записанная при аэро-гамма-съемке со скоростью самолета 180 км/ч

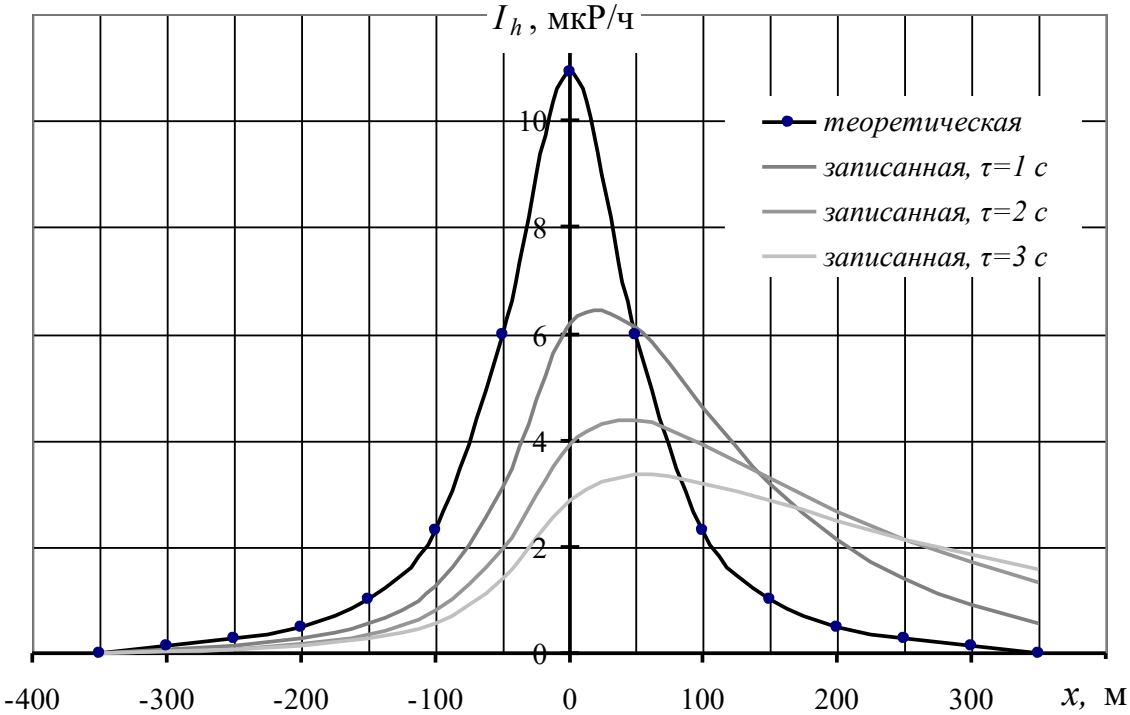


Рис. 2. Теоретическая кривая интенсивности гамма-поля точечного источника, находящегося на дневной поверхности, и записанная при аэро-гамма-съемке со скоростью самолета 360 км/ч

4) Определить коэффициент инерционных искажений Q радиометра по формуле

$$Q = \frac{I_{\max}^{\text{ист}}}{I_{\max}^{\text{зап}}} \ . \qquad (4)$$

таблица 1

Условия расчета:

вариант / параметр	*Вариант 1*	*Вариант 2*	*Вариант 3*	*Вариант 4*	*Вариант 5*	*Вариант 6*	*Вариант 7*	*Вариант 8*	*Вариант 9*	*Вариант 10*
I_o, мкР/ч	$6 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
$\mu_в$, м$^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$									
h, м	70	60	50	40	30	70	60	50	40	30

Лабораторная работа № 13

Обработка результатов аэро-гамма-съемки

Вследствие инерционности радиометрической аппаратуры кривые изменения интенсивности гамма-излучения, регистрируемые при движении самолета, искажаются. Форма аномалии сглаживается и растягивается в направлении движения, максимальные амплитуды уменьшаются. Особенно велико влияние инерционности для измерений гамма-поля на маломощных активных участках.

При обработке результатов аэро-гамма-съемки необходимо вводить поправки за инерционные искажения, то есть восстанавливать действительный вид кривой.

Действительные значения интенсивности гамма-излучения можно вычислить по записанным данным в движении следующим образом:

$$I_i^{\text{действ}} = \frac{I_i^{\text{зап}} - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \cdot I_{i-1}^{\text{зап}}}{1\text{-}e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}} \qquad (1)$$

где $I_i^{\text{зап}}$ – записанная интенсивность гамма-излучения в *i*-ой точке профиля; $I_{i-1}^{\text{зап}}$ – записанная интенсивность гамма-излучения в предыдущей точке, т.е. в точке с номером *i*-1; τ – постоянная времени радиометра, определяемая произведением *R* на *C*; Δt – интервал времени между соседними отсчетами интенсивности гамма-излучения.

Интервал времени Δt между соседними отсчетами интенсивности гамма-излучения можно найти, зная расстояние Δx меду соседними отсчетами в м и скорость движения самолета *v* в м/с:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} \ . \qquad (2)$$

Задание

В таблице 1 приведены результаты измерения интенсивности гамма-излучения над вертикальным радиоактивным пластом, выходящим на дневную поверхность, записанные при аэро-гамма-съемке. При этом скорость движения самолета *v* соответствовала 180 км/час, расстояние между соседними отсчетами Δx соответствовало 50 м, постоянная времени прибора τ соответствовала 2 с.

1) По заданному варианту зарегистрированной при аэро-гамма-съемке кривой (таблица 1) восстановить действительные значения интенсивности гамма-излучения над пластом, используя формулу (1).

2) Построить графики $I_i^{\text{зап}}$ и $I_i^{\text{действ}}$, как показано на рис 1.

таблица 1

№ варианта	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*	*13*	*14*
x, м	$I^{зап}$, мкР/ч													
0	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1
50	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1
100	3	4	3	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	2
150	3	5	4	4	4	4	3	3	3	4	4	2	2	2
200	4	5	5	4	4	5	4	3	3	4	5	3	3	3
250	4	6	5	5	5	5	4	4	3	5	5	3	3	3
300	4	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	3	3	3
350	4	7	7	5	5	6	6	7	5	6	6	3	3	4
400	4	7	7	5	6	7	8	11	7	6	8	3	4	5
450	5	8	9	6	6	7	9	20	12	6	9	3	4	6
500	5	8	10	7	6	8	13	122	62	7	14	3	4	7
550	5	9	13	17	7	10	21	279	141	8	64	4	5	9
600	5	11	22	33	8	13	122	380	192	10	143	4	6	15
650	6	13	123	43	9	21	279	444	224	15	193	4	7	85
700	7	21	279	49	12	122	380	483	243	75	225	5	12	195
750	9	121	380	53	19	278	443	507	255	169	245	6	72	265
800	16	277	442	55	119	378	481	521	262	229	256	9	165	309
850	114	376	479	56	272	439	503	527	265	265	262	58	225	335
900	262	431	495	57	366	470	510	525	264	284	263	132	258	346
950	263	370	410	47	329	394	418	428	215	238	215	133	221	286
1000	170	238	262	32	212	252	267	273	138	153	139	86	142	183
1050	108	151	166	22	134	160	169	172	88	98	89	55	90	116
1100	69	97	106	16	86	102	107	109	56	63	58	36	57	74
1150	45	63	68	12	56	66	69	70	36	41	38	23	37	47
1200	29	42	45	9	37	43	45	45	24	28	26	16	24	31
1250	20	29	30	8	25	29	30	30	17	20	18	11	17	21
1300	14	20	21	7	18	21	21	21	12	14	14	8	12	14
1350	11	15	16	6	13	15	15	15	9	11	11	6	9	10
1400	8	12	12	6	10	12	11	11	7	9	9	5	7	8
1450	7	10	10	6	9	10	9	8	6	8	8	4	5	6
1500	6	9	8	5	7	8	8	7	5	7	7	4	5	5
1550	5	8	7	5	7	7	7	6	4	6	6	4	4	5
1600	5	7	7	5	6	7	6	5	4	6	6	3	4	4
1650	5	7	6	5	6	6	5	4	4	6	6	3	4	4
1700	4	7	6	5	6	6	5	4	4	5	5	3	3	4
1750	4	6	6	5	5	6	5	4	3	5	5	3	3	3
1800	4	6	5	5	5	5	4	4	3	5	5	3	3	3
1850	4	6	5	5	5	5	4	3	3	5	5	3	3	3
1900	4	6	5	5	5	5	4	3	3	5	5	3	3	3

3) Определить координаты границ пласта x_1 и x_2 в м по половине максимального значения интенсивности гамма-излучения I_{max} над пластом.

4) Определить мощность пласта в м: $h = x_2 - x_1$.

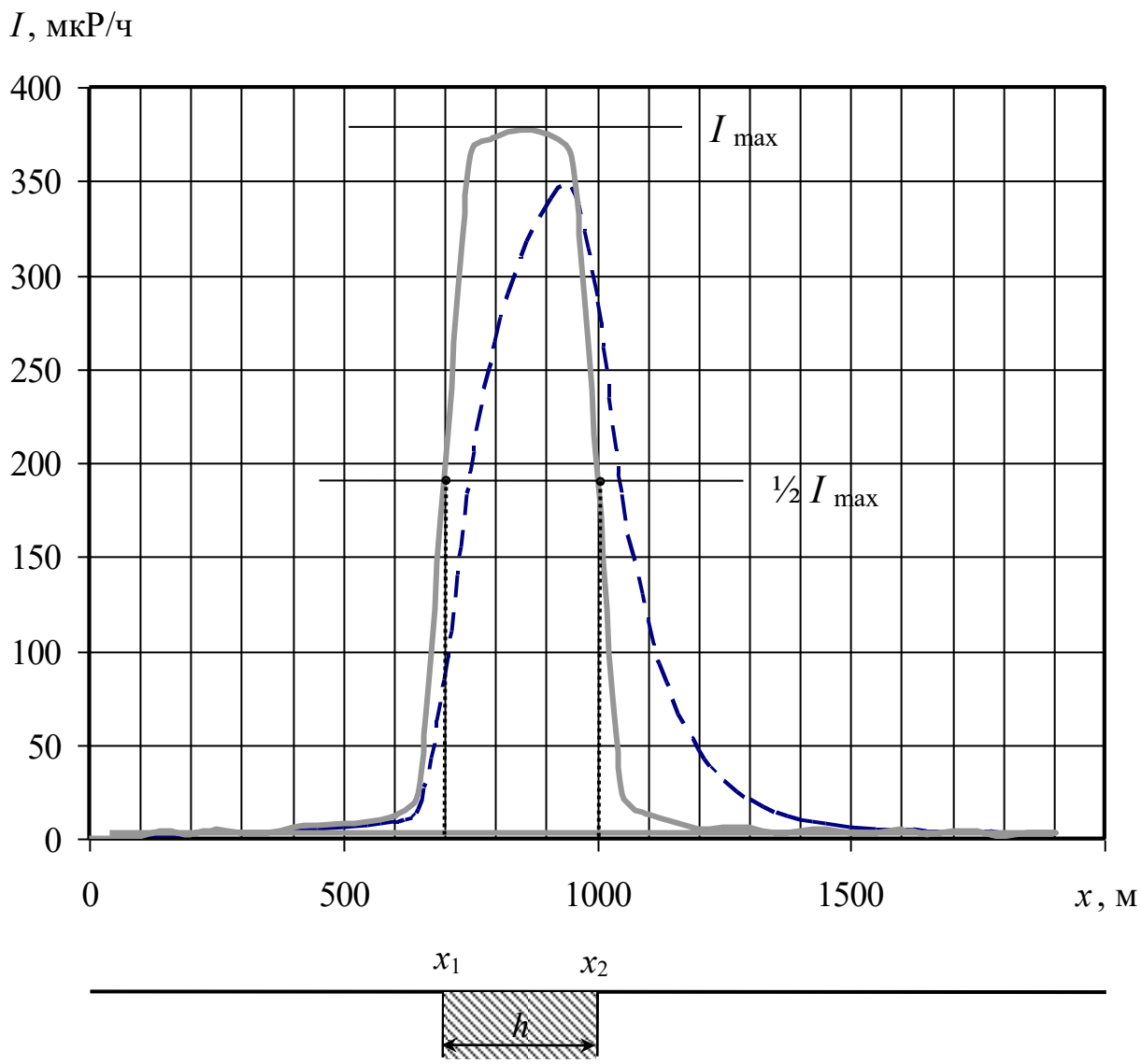


Рис.1. Интенсивность гамма-излучения над радиоактивным пластом, зарегистрированная при аэро-гамма-съемке (пунктирная линия), и действительная (сплошная линия)

Лабораторная работа № 14

Интерпретация диаграмм гамма-каротажа (ГК) скважин графическим способом

При количественной интерпретации диаграмм гамма-каротажа определяют два параметра:

- положение границ радиоактивного пласта и его видимую мощность $h_в$;
- концентрацию радиоактивного элемента Q_U.

Во всех известных способах интерпретации используется пропорциональная зависимость между интенсивностью гамма-излучения и концентрацией радиоактивного вещества.

Способ определения границ пласта зависит от того, резкие или нерезкие у него границы.

Резкость границ пласта оценивают по величине проекции на ось глубин «прямолинейного» участка крыла графика гамма-аномалии p, продолженного до пересечения с уровнем фона (рис. 1).

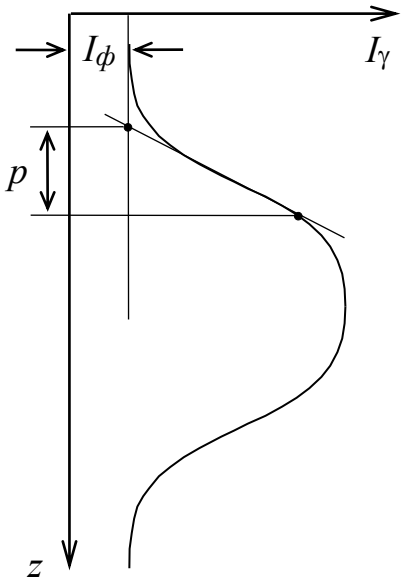


Рис. 1. Определение резкости границ пласта

Если величина отрезка $p < 100/\delta$ (где δ - плотность руды в г/см^3), то граница пласта резкая, если величина отрезка $p \geq 100/\delta$, то граница пласта нерезкая.

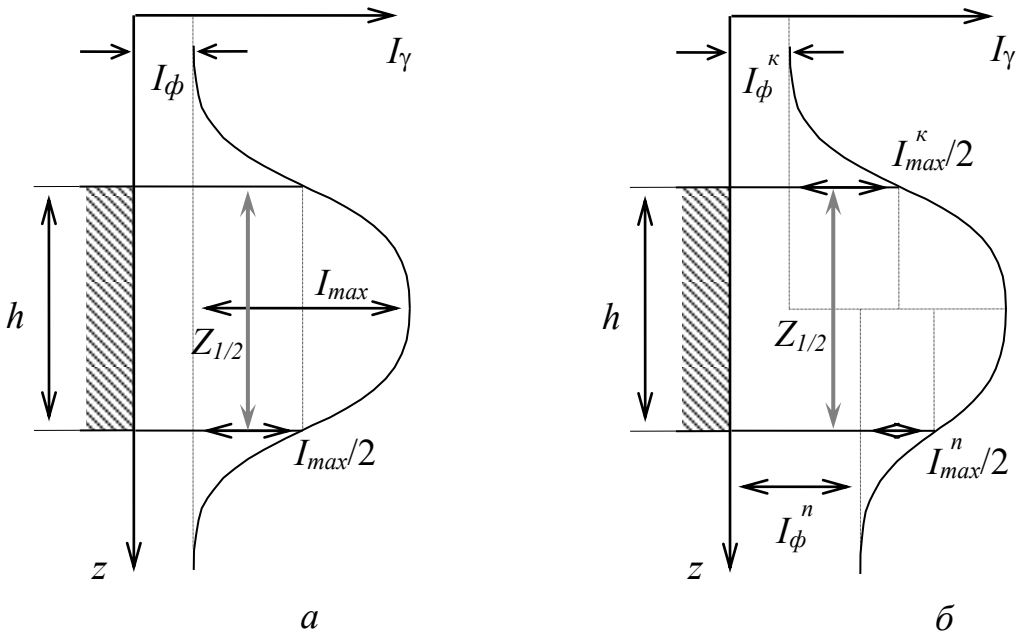
В зависимости от того, резкие или нерезкие границы у пласта, насыщен ли пласт по гамма-излучению или нет, для определения его мощности используют один из трех способов.

Если пласт имеет резкие границы, т.е. когда концентрация радиоактивного элемента от вмещающих пород к руде меняется резко или скачком, то используют один из следующих способов:

1) *Способ «1/2 I_{max}»*, если пласт насыщен по гамма-излучению, т.е. если ширина аномалии ГК на ее полувысоте $Z_{1/2} \geq 50$ см;

2) *Способ «4/5 I_{max}»*, если пласт не насыщен по гамма-излучению, т.е. если ширина аномалии ГК на ее полувысоте $Z_{1/2} < 50$ см.

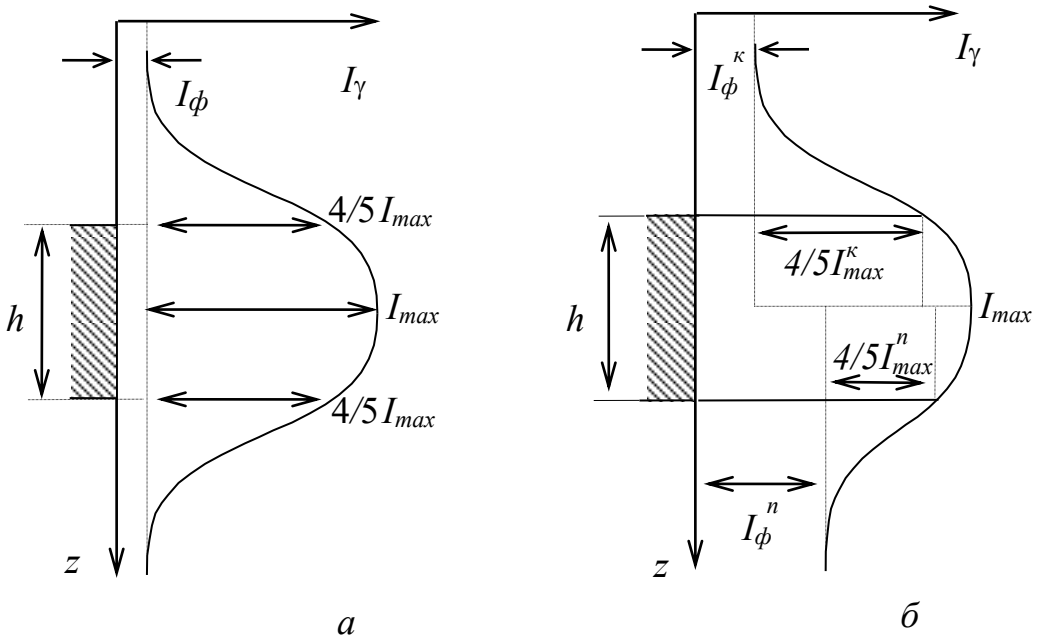
Суть способа «1/2 I_{max}» проиллюстрирована на рис. 2, где приведены примеры определения мощности для случая, когда фоновое гамма-излучение со стороны кровли и подошвы пласта одинаково (*а*) и разное (б).



а *б*

Рис. 2. Определение границ пласта и его мощности по способу «1/2 I_{max}»

Суть способа «4/5 I_{max}» проиллюстрирована на рис. 3., где приведены примеры определения мощности для случая, когда фоновое гамма-излучение со стороны кровли и подошвы пласта одинаково (*а*) и разное (б).



а *б*

Рис. 3. Определение границ пласта и его мощности по способу «4/5 I_{max}»

Если пласт имеет нерезкие границы, т.е. когда концентрация радиоактивного элемента от вмещающих пород к руде меняется постепенно, то используют способ «*заданной интенсивности*»:

3) *Способ «$I_{зад}$»*.

По способу *«$I_{зад}$»* границы рудных интервалов находят по проекциям на ось глубин точек диаграммы, в которых интенсивность гамма-излучения равна заданной. Заданная интенсивность определяется бортовым (заданным) содержанием урана:

$$I_{зад} = 100 \cdot K_0 \cdot Q_U^{зад} \qquad (1)$$

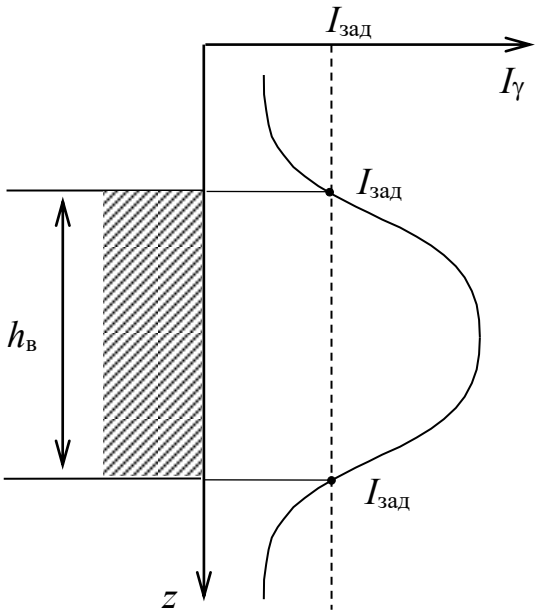


Рис. 4. Определение границ пласта и его мощности по способу *«$I_{зад}$»*

Если скважина, в которой проводилась запись диаграммы ГК, не обсажена и не заполнена промывочной жидкостью, то содержание урана Q_U в пласте вычисляют по формуле:

$$Q_U = \frac{S}{100 \cdot K_0 \cdot h_в}, \qquad (2)$$

где S – площадь гамма-аномалии на диаграмме ГК в см·мкР/ч; K_0 - пересчетный коэффициент прибора в (мкР/ч)/0,01 % U; $h_в$ - видимая мощность пласта в см.

На рис. 4 приведены примеры определения площади аномалии по диаграмме ГК для случая одинаковых (*а*) и разных величин (*б*) фонового гамма-излучения со стороны кровли и подошвы пласта.

Площадь гамма-аномалии S определяется путем подсчета количества клеточек N внутри аномалии и умножением полученного значения на масштаб диаграммы по оси глубин C_Z и и масштаб диаграммы по оси интенсивности C_I:

$$S = N \cdot C_Z \cdot C_I \qquad (2)$$

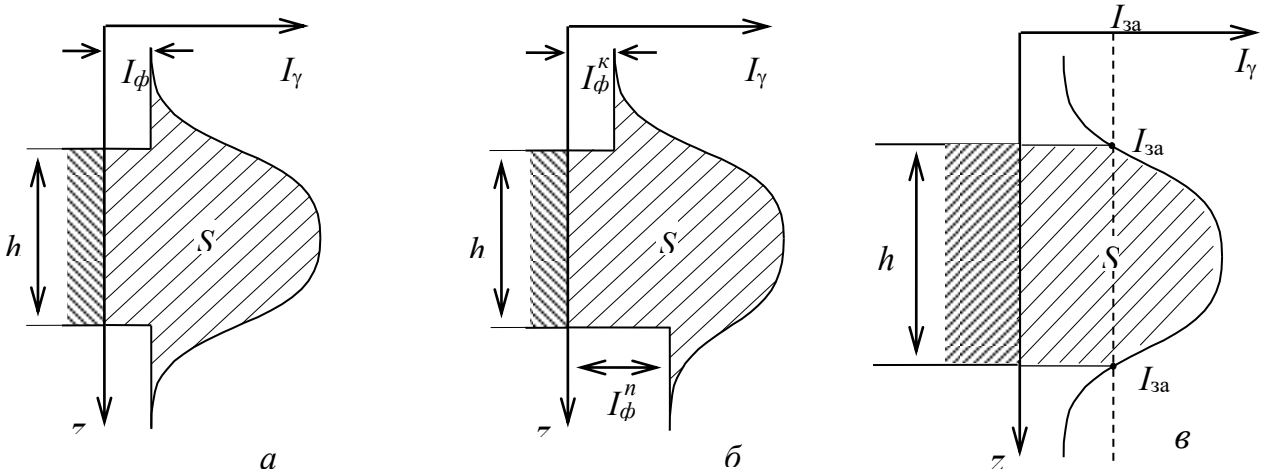


Рис. 5. Определение площади гамма-аномалии от радиоактивного пласта: *а* – с резкими границами и одинаковым уровнем фона со стороны кровли и со стороны подошвы пласта, *б* – с резкими границами и разным уровнем фона со стороны кровли и со стороны подошвы пласта, *в* – с нерезкими границами

Задание

По выданной преподавателем диаграмме ГК, зарегистрированной в сухой необсаженной скважине на одном из урановых месторождений, определить:

1) резкость границ пласта со стороны кровли и подошвы, как показано на рис. 1, сравнив величину отрезка *p* с величиной 100/δ (где δ - плотность руды в г/см^3 указана на диаграмме ГК);

2) по величине отрезка $Z_{1/2}$ (рис. 2) определить, насыщен ли пласт по гамма-излучению;

3) в зависимости от того, резкие или нерезкие границы у пласта, насыщен ли пласт по гамма-излучению или нет, определить его границы и мощность *h*, правильно выбрав способ определения;

4) используя формулу (2), вычислить содержание урана в пласте Q_U и сравнить его со средним содержанием урана в земной коре ($3 \cdot 10^{-4}$ %). Сделать выводы.

Лабораторная работа №15

Оценка качества радиометрической съемки

Цель работы: получить практические навыки выявления грубых, систематических и случайных ошибок наблюдений при анализе результатов полевой гамма-съемки (γ-съемки).

Надежность, а иногда и принципиальная возможность изучения тех или иных особенностей геологического строения, зависит от того, с какой погрешностью выявлены физические поля, несущие геологическую информацию. Эта погрешность может возникать как за счет неточности самих измерений, так и за счет того, что результаты измерений содержат составляющие, не связанные с геологическим строением, которые не удается полностью исключить при обработке наблюдений. Поэтому при проектировании и оценке выполненных геофизических работ всегда обсуждается вопрос о допустимой погрешности измерений.

Погрешностью измерения называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Погрешности измерений обусловливаются различными факторами. При радиометрических и ядерно-геофизических измерениях они включают:

1) ошибки, связанные со статистической природой радиоактивности (статистика счета);

2) аппаратурные ошибки, связанные с нестабильностью работы отдельных блоков аппаратуры (инструментальные ошибки);

3) методические ошибки, связанные с эталонированием, непостоянством вещественного состава, плотности и других характеристик горных пород, руд, наличием «мешающего» фона;

4) ошибки, связанные с отбором и подготовкой проб;

5) ошибки оператора, включая ошибки округления при взятии показаний прибора.

Изучение всех возможных источников ошибок и закономерностей их возникновения позволяет разделить все ошибки на три вида: *грубые*, *систематические* и *случайные*.

Грубые ошибки возникают чаще всего из-за неопытности наблюдателя. Это неправильно взятые отсчеты, ошибки при записи, описки и т.д. Такие ошибки подлежат исключению и в дальнейшем не рассматриваются.

Систематические ошибки возникают главным образом из-за неправильных показаний прибора или ошибок, допущенных при градуировании радиометров и т.д. Примером таких ошибок являются ошибки, возникающие при измерениях неправильно проградуированным прибором или при пользовании загрязненных или разубоженных эталонов (разубоживание - снижение содержания радиоактивных элементов в эталоне за счет смеше-

ния с пустой породой). Систематические ошибки необходимо выявить. Причины их возникновения должны быть устранены.

Существует несколько способов выявления систематических ошибок путем анализа результатов основных и повторных измерений (число повторных измерений обычно составляет 5-10 % от общего числа наблюдений).

1. Корреляционный способ. Сущность этого способа сводится к сравнению результатов основных и контрольных измерений. Для этого на координатную сетку (рис. 1) наносятся результаты основных x_o и контрольного $x_к$ измерений.

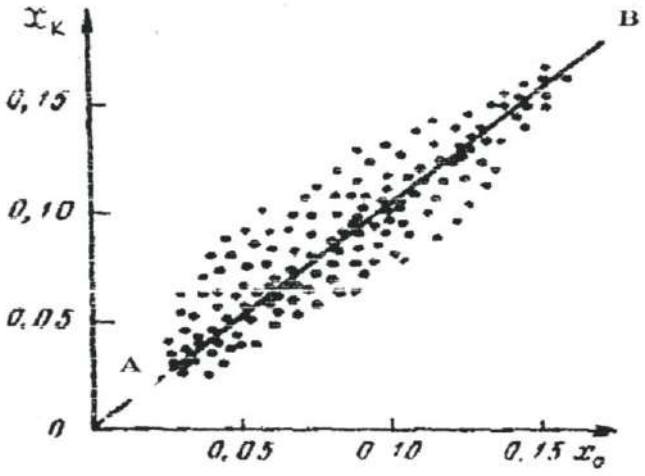


Рис.1. Корреляционный способ выявления систематической ошибки измерений

Через совокупность точек проводится линия *AB* так, чтобы точки располагались симметрично относительно этой линии. Если линия *AB* проходит через начало координат под углом 45^0, систематическая ошибка отсутствует. Другие случаи будут свидетельствовать о ее наличии.

2. Способ вариационной кривой. В этом способе расхождения между первичным и повторным наблюдениями принимают за величину ошибки каждого измерения. Затем подсчитывают количество случаев, когда ошибка лежит в определенном интервале, и определяют процент случаев от общего числа повторных наблюдений:

$$n = \frac{n_i}{N} \cdot 100\%,$$

где n_i – число случаев в i-м интервале; N – число повторных наблюдений. Результаты вычислений изображают графически в виде вариационной кривой (рис. 2).

При наличии систематических ошибок максимум кривой может сместиться с нуля. По величине смещения максимума можно определить величину систематической ошибки.

Случайные погрешности измерений по абсолютной величине невелики и связаны с различными факторами при производстве работы. По характеру распределения случайных ошибок удается объективно оценить качество проведенных измерений.

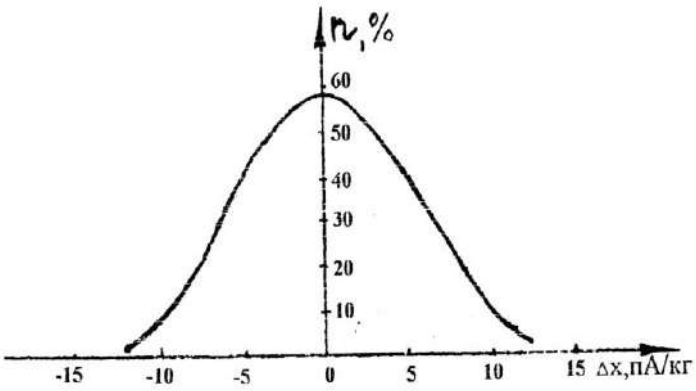


Рис. 2. Вариационная кривая ошибок измерения

Оценка случайных погрешностей производится при обработке измерений. Математическая теория погрешностей опирается на следующие свойства случайных ошибок:

- появление ошибок со знаком «+» и со знаком «-» равновероятно;
- появление ошибок больших (по абсолютной величине) менее вероятно, чем появление малых ошибок;
- сумма всех ошибок (с учетом знака) при числе измерений $n \to \infty$ равна 0.

Случайные ошибки имеют нормальное распределение при $n \to \infty$ и графически выражаются колоколообразной кривой, характер которой оценивается либо дисперсией, либо средним квадратическим значением.

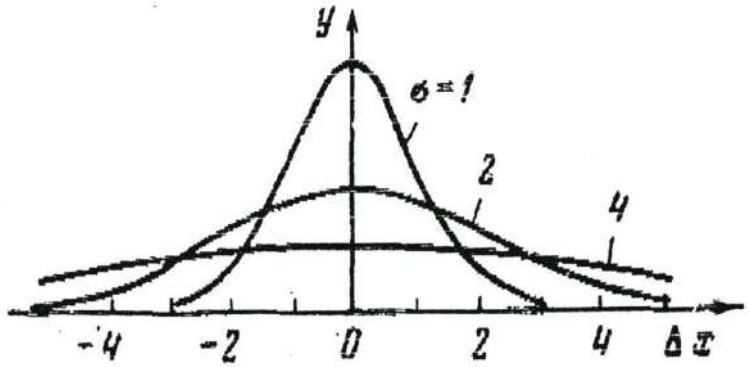


Рис. 3. Кривая нормального распределения случайных ошибок измерений

На рис. 3 показан характер распределения ошибок в виде вариационных кривых, построенных с различной степенью достоверности.

Как видно из рисунка, распределение погрешностей симметрично относительно Δx по оси абсцисс с центром в точке 0, а качество измерений определяется величиной дисперсии σ – чем она меньше, тем качество измерений выше, т.к. наибольшая часть ошибок приходится на малые значения σ.

Для определения закона распределения параметра и степени надежности такого распределения пользуются понятием доверительного интервала от $X + \Delta X$ до $X - \Delta X$, в который попадает истинное значение величины X. Надежность такого определения (α) зависит от числа измерений n и от величины доверительного интервала (табл. 1).

При обработке полевых материалов радиометрических методов доверительный интервал выбирается в пределах от $(\chi - 3\sigma)$ до $(\chi + 3\sigma)$.

Таблица 1

Доверительный интервал	Надежность α,%
От $(\chi - \sigma)$ до $(\chi + \sigma)$	68,3
От $(\chi - 2\sigma)$ до $(\chi + 2\sigma)$	95,0
От $(\chi - 3\sigma)$ до $(\chi + 3\sigma)$	99,7

Достоверность приведенных радиометрических съемок оценивают путем расчета средней квадратической погрешности съемки по результатам контрольных наблюдений

$$\sigma = \pm\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{i_1} - x_{i_2}\right)^2}{2n-1}}$$

где x_{i_1}, x_{i_2} – соответственно рядовое и контрольное измерение гамма-поля; n - число контрольных измерений.

Точность съемки считается удовлетворительной, если $\sigma \le P$, где P - точность используемого прибора.

Задание

1. Из полевого журнала (прил. 1) выписать в табл. 2. результаты основных P_1 и контрольных P_2 измерений гамма-поля.

Таблица 2

Результаты измерений гамма-поля

№ замера	P_1, пА/кг	P_2, пА/кг	$\Delta = P_1 - P_2$, пА/кг	Δ^2, пА/кг
1.				
2.				
….				
				$\sum_{i=1}^{n}\Delta^2$

2. Вычислить расхождение значении гамма-поля между основными P_1 и контрольными P_2 замерами с соответствующими знаками $\Delta = P_1 - P_2$

3. По величине расхождения выявить наличие грубых ошибок и исключить их из дальнейшей обработки.

4. Оценить наличие систематической погрешности одним из описанных способов (корреляционный способ, способ вариационной кривой).

6. Вычислить среднюю квадратическую погрешность:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta^2}{2n-1}}$$

7. Оценить качество выполненной гамма-съемки.

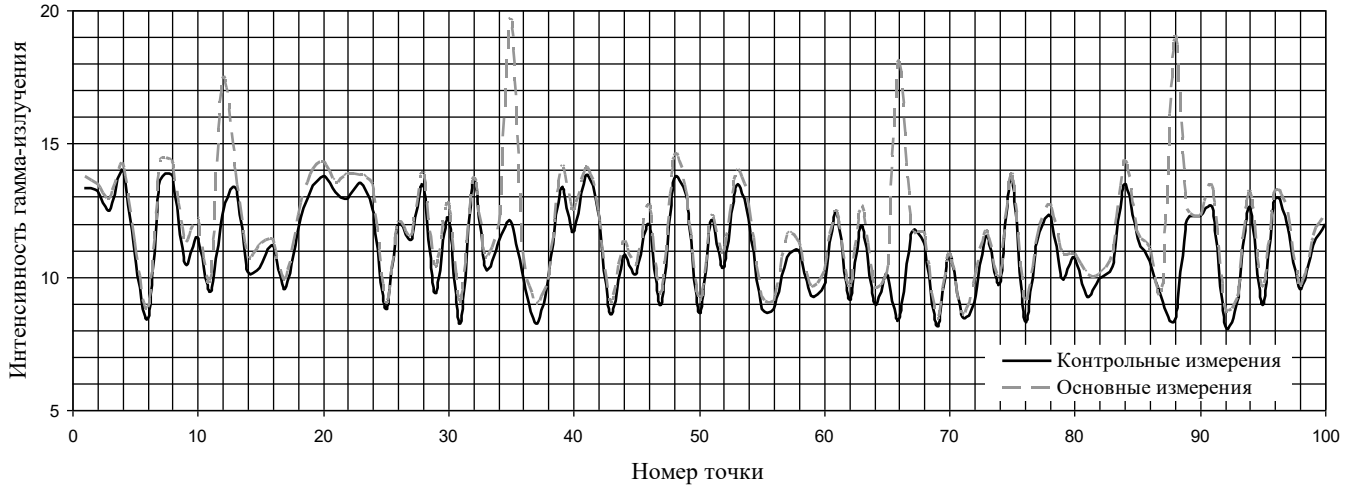


Рис 4. Графики основных и контрольных измерений

На рис. 4 хорошо видны 4 грубые ошибки – на пикете 12, 35, 66, 88. Эти значения при обработке результатов подлежат исключению.

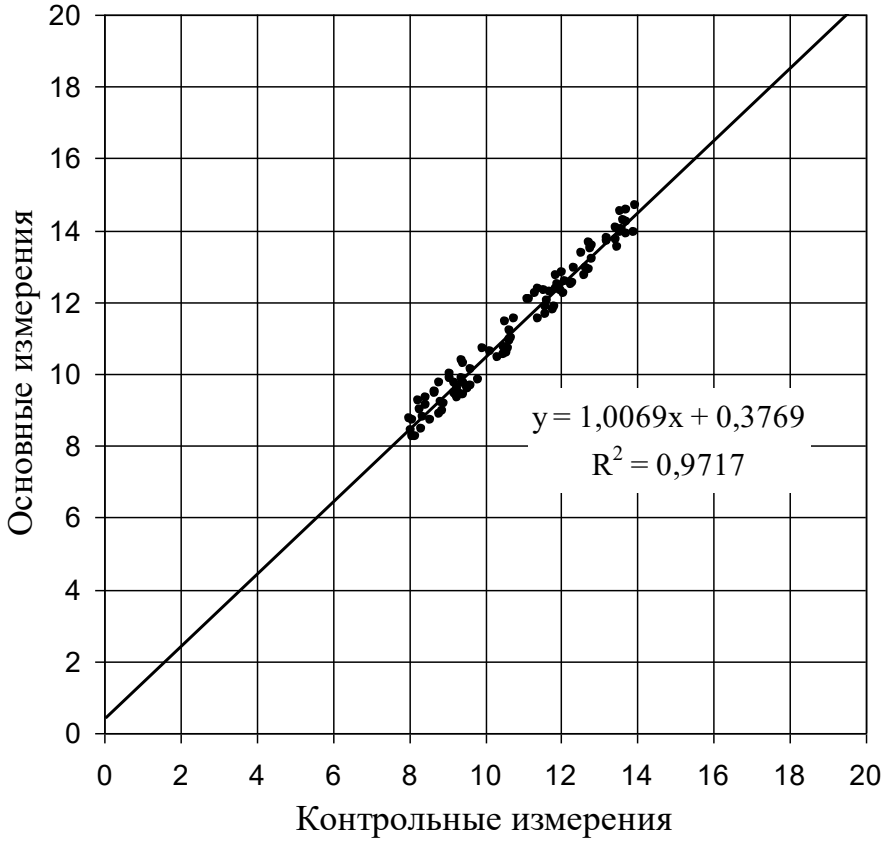


Рис. 5. Корреляция между основными и контрольными измерениями

На рис. 5 линя тренда не выходит из начала координат и угол ее наклона отличается от 45°. Это означает, что в результатах измерений гамма-поля присутствует систематическая ошибка. Это видно и на рис.4 – все точки графика контрольных наблюдений лежат ниже точек основных наблюдений, т.е. основные наблюдения завышены по сравнению с контрольными наблюдениями. Свободный член в уравнении регрессии (0,38) указывает на величину завышения показаний при основных измерениях.

Вариант 1					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	11,7	12,1	51	13,1	14,0
2	11,6	11,7	52	11,9	12,5
3	12,2	12,8	53	10,4	10,9
4	9,7	9,7	54	12,2	12,5
5	9,0	9,3	55	12,0	12,3
6	9,2	9,2	56	12,2	13,1
7	13,1	13,3	57	12,6	12,9
8	8,7	9,3	58	11,3	11,6
9	11,7	12,0	59	14,0	14,8
10	13,0	13,9	60	11,3	11,4
11	12,8	13,3	61	12,5	13,4
12	11,3	17,4	62	13,9	14,0
13	8,0	8,9	63	10,7	10,8
14	13,5	13,5	64	13,5	14,5
15	12,8	12,9	65	12,4	12,8
16	11,3	12,0	66	9,6	18,1
17	10,3	10,4	67	9,8	9,8
18	10,3	11,1	68	13,1	13,4
19	12,9	13,8	69	11,3	11,6
20	9,5	10,0	70	11,9	11,9
21	13,8	14,0	71	11,0	11,2
22	11,7	12,5	72	11,2	12,0
23	11,8	11,8	73	8,4	9,3
24	9,6	10,4	74	11,1	11,2
25	8,2	8,4	75	9,5	10,1
26	8,4	9,0	76	11,0	11,9
27	11,3	12,1	77	9,5	10,2
28	10,3	10,7	78	12,2	13,0
29	11,4	12,0	79	11,7	11,9
30	10,5	10,5	80	10,7	11,3
31	12,7	13,2	81	12,3	12,4
32	8,1	8,6	82	8,9	9,0
33	10,5	10,7	83	11,7	12,2
34	11,6	12,0	84	10,5	11,4
35	8,1	19,7	85	8,2	8,9
36	12,3	12,8	86	13,0	13,5
37	11,3	11,5	87	9,6	10,3
38	13,2	13,4	88	11,5	20,0
39	11,3	11,8	89	9,8	10,1
40	12,2	12,9	90	8,6	9,1
41	10,3	11,2	91	11,4	11,5
42	9,4	9,6	92	8,2	8,4
43	12,7	13,1	93	9,4	9,9
44	9,3	9,4	94	10,9	11,0
45	11,6	12,3	95	12,4	12,8
46	11,2	11,5	96	13,2	14,2
47	11,8	12,2	97	12,6	13,1
48	13,7	14,5	98	8,9	9,5
49	9,8	10,8	99	10,2	10,9
50	11,7	12,1	100	8,8	8,8

Вариант 2					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	10,5	12	51	10,4	11,7
2	11,8	12,8	52	11	10,5
3	13,5	12,6	53	12,2	9,75
4	12,8	12	54	10,8	11,25
5	11,7	11	55	13,3	12,5
6	11,8	11,4	56	11	12,5
7	14	12,5	57	12,5	14,5
8	12,3	13,4	58	11,2	10
9	12	11,75	59	10	11,5
10	10,8	13,5	60	10,2	8,75
11	12,1	12,5	61	9,8	10,25
12	12,5	12,5	62	10,3	10,25
13	10,7	11,75	63	9,5	8,75
14	14,2	14	64	11	9,8
15	11,5	14,5	65	10,5	11,25
16	11,3	10,5	66	9,5	10
17	12	11,5	67	12	11,25
18	10,5	12	68	13	12
19	12,2	11,25	69	9,5	10
20	11,5	12,2	70	11	9,5
21	10,3	13,5	71	9,5	10,5
22	11,3	10,2	72	9,8	9,25
23	12	13	73	9,5	8,75
24	12,5	12	74	10,2	12
25	12,5	13,3	75	11,8	12,5
26	21,3	12,5	76	10,5	11,5
27	10,7	11,5	77	11	11,25
28	9,3	10,5	78	10	12,25
29	10,7	9,5	79	11	10,75
30	11,3	12,5	80	10,3	11
31	11,2	13,5	81	10,5	11,25
32	12,5	13,2	82	9,5	10,5
33	14,5	12,5	83	9,6	10,75
34	13,8	11,5	84	10,2	11,5
35	10,5	11,5	85	9,5	11,25
36	11	10,5	86	10,5	12,5
37	12,6	12	87	10,2	11,25
38	11,7	10,5	88	9,5	11,25
39	12,5	13,5	89	10,3	12
40	10	10,7	90	11	12,5
41	10	11,2	91	10	11,5
42	11,3	10	92	11,3	14,25
43	12,5	11,2	93	11,3	14,25
44	11,8	11,5	94	10,8	13,25
45	11,3	12,5	95	10	11,5
46	9,5	11,2	96	10,3	11
47	10	10,75	97	7,9	9,25
48	9,5	11,2	98	9,2	11
49	11,8	12	99	11,3	12
50	12,2	12,5	100	10,3	13,5

Вариант 3					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1			*1*	*2*	*3*
1	13,4	13,4	51	19,5	20,0
2	19,4	19,5	52	19,1	20,0
3	15,5	16,3	53	16,4	16,5
4	17,5	18,1	54	15,6	15,6
5	19,7	19,9	55	14,5	15,3
6	14,7	15,4	56	14,9	15,9
7	17,0	22,2	57	13,6	13,8
8	13,0	13,9	58	15,2	15,9
9	14,7	15,2	59	14,2	15,0
10	14,6	15,2	60	19,1	19,8
11	17,8	18,3	61	15,0	15,1
12	16,7	17,4	62	14,1	14,1
13	15,9	16,4	63	15,5	15,9
14	18,7	19,3	64	15,7	15,8
15	16,7	16,8	65	18,0	18,4
16	16,6	16,9	66	18,9	18,1
17	15,0	15,1	67	17,5	18,3
18	17,7	18,2	68	18,7	18,7
19	17,5	17,9	69	14,9	15,2
20	19,1	20,1	70	14,2	14,8
21	15,9	16,8	71	19,1	23,5
22	13,2	13,4	72	19,7	20,0
23	16,7	17,6	73	16,0	16,6
24	15,8	16,4	74	13,1	13,5
25	16,0	16,1	75	14,8	15,3
26	16,5	16,7	76	13,6	14,1
27	18,6	18,9	77	13,4	13,5
28	16,0	16,5	78	19,2	19,5
29	14,3	15,1	79	15,5	16,0
30	13,5	14,5	80	17,8	18,6
31	13,8	14,2	81	14,9	15,7
32	13,6	14,3	82	14,6	15,6
33	18,0	26,1	83	16,1	16,2
34	18,0	18,2	84	14,5	15,5
35	13,4	19,7	85	14,7	15,5
36	16,1	16,9	86	14,5	15,4
37	16,0	16,1	87	13,3	13,5
38	14,7	15,1	88	17,9	20,0
39	17,2	17,6	89	16,3	16,5
40	18,9	19,0	90	18,6	19,6
41	19,3	19,9	91	19,7	20,2
42	13,5	14,3	92	14,7	15,0
43	18,2	18,5	93	19,2	20,2
44	17,6	17,9	94	19,3	20,1
45	17,3	17,8	95	16,3	17,0
46	16,2	16,4	96	17,0	17,6
47	13,1	13,7	97	17,5	31,4
48	17,2	17,9	98	13,4	13,8
49	15,7	15,9	99	15,6	16,1
50	14,3	15,3	100	19,3	20,2

Вариант 4					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	15,9	16,6	51	11,4	10,2
2	15,1	15,6	52	15,8	16,8
3	16,5	17,3	53	11,0	11,6
4	17,5	17,9	54	11,3	11,4
5	17,6	15,6	55	13,5	13,6
6	13,3	12,0	56	15,4	16,3
7	16,9	15,6	57	11,8	12,3
8	14,4	12,7	58	12,5	12,5
9	15,6	13,8	59	17,7	18,3
10	13,0	11,1	60	11,9	12,7
11	17,0	15,5	61	12,5	11,1
12	13,7	14,4	62	16,4	15,2
13	16,0	16,5	63	17,1	7,4
14	16,4	26,1	64	12,5	10,7
15	14,7	15,6	65	17,7	15,8
16	17,1	17,9	66	14,5	12,6
17	14,8	15,0	67	11,2	9,5
18	13,6	13,9	68	16,3	15,3
19	15,3	15,3	69	13,3	14,2
20	18,0	18,1	70	14,7	15,3
21	13,9	14,2	71	11,7	23,5
22	12,7	13,0	72	14,2	14,5
23	14,2	12,8	73	14,4	14,7
24	14,0	12,0	74	11,8	12,5
25	11,8	10,3	75	15,9	16,1
26	14,1	13,0	76	12,0	12,4
27	13,9	12,3	77	11,8	12,3
28	13,4	11,9	78	14,6	15,3
29	11,8	12,0	79	14,9	15,5
30	14,8	15,3	80	11,2	12,0
31	13,3	24,7	81	14,8	15,8
32	12,6	12,6	82	14,7	14,7
33	13,7	26,1	83	15,8	14,7
34	13,9	13,9	84	15,1	13,5
35	12,8	19,7	85	11,9	10,3
36	15,4	16,1	86	15,1	13,2
37	18,0	18,7	87	12,9	11,5
38	15,1	15,1	88	17,6	16,5
39	13,8	14,0	89	13,8	14,7
40	12,8	13,7	90	14,8	24,9
41	16,7	16,9	91	17,6	17,8
42	13,2	13,4	92	17,3	17,5
43	16,4	16,6	93	12,6	13,1
44	12,6	13,2	94	11,2	11,9
45	15,6	13,8	95	12,8	13,3
46	15,1	13,5	96	11,3	11,3
47	13,7	11,9	97	13,5	31,4
48	13,1	11,9	98	14,0	14,1
49	17,4	16,3	99	11,0	11,3
50	15,8	14,1	100	16,7	17,3

Вариант 5					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	23,2	23,3	51	16,7	15,6
2	15,4	16,4	52	14,1	14,5
3	16,7	17,0	53	13,1	13,6
4	14,4	15,2	54	12,0	12,7
5	13,8	12,6	55	14,7	15,4
6	17,2	15,6	56	14,6	15,5
7	14,7	12,8	57	15,0	15,9
8	15,6	13,8	58	14,9	15,0
9	11,3	9,5	59	14,6	14,9
10	11,3	10,0	60	13,8	14,3
11	16,8	15,5	61	17,8	16,5
12	15,6	15,7	62	13,5	12,0
13	12,8	13,6	63	14,4	13,2
14	15,8	16,3	64	15,4	14,3
15	14,2	24,6	65	15,0	13,1
16	14,5	14,7	66	12,9	11,2
17	15,3	15,8	67	14,7	13,0
18	11,2	11,7	68	13,2	11,3
19	12,6	13,1	69	12,7	13,6
20	14,2	14,4	70	15,7	19,6
21	17,8	17,8	71	13,4	23,5
22	14,1	14,7	72	17,6	18,2
23	16,4	14,5	73	14,1	14,9
24	11,8	10,1	74	14,5	15,1
25	15,3	14,1	75	16,9	17,7
26	14,0	12,7	76	13,1	13,2
27	12,7	11,2	77	17,5	17,8
28	17,5	15,9	78	14,9	15,9
29	16,9	17,1	79	11,1	11,2
30	17,6	18,0	80	12,3	12,6
31	11,3	11,7	81	17,5	17,8
32	16,2	16,3	82	14,0	14,8
33	14,1	26,1	83	14,1	13,0
34	11,5	12,1	84	12,1	10,6
35	12,1	19,7	85	11,1	9,9
36	18,0	18,2	86	12,3	11,0
37	13,7	14,0	87	18,0	16,0
38	17,4	18,0	88	15,2	13,3
39	11,2	11,2	89	17,3	18,1
40	13,1	13,9	90	17,6	17,6
41	14,7	15,2	91	15,8	16,5
42	13,8	14,6	92	16,6	17,1
43	12,6	12,9	93	16,4	17,4
44	12,1	12,2	94	11,7	12,2
45	17,3	16,2	95	18,0	18,8
46	14,3	12,8	96	14,9	15,5
47	17,9	16,6	97	13,3	31,4
48	13,6	12,3	98	12,1	13,0
49	15,4	22,8	99	11,7	12,0
50	11,9	10,6	100	17,0	17,5

Вариант 6					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	16,3	15,7	51	35,3	36,6
2	28,0	27,7	52	35,8	37,8
3	33,6	33,9	53	36,5	37,0
4	21,9	22,8	54	25,7	26,3
5	30,9	30,4	55	24,7	24,7
6	42,6	42,0	56	33,7	34,5
7	17,9	17,2	57	32,3	32,7
8	49,9	50,1	58	48,1	47,4
9	33,7	34,6	59	28,3	28,6
10	39,6	38,7	60	31,3	31,0
11	46,5	46,3	61	43,8	44,4
12	30,4	30,5	62	42,2	43,0
13	22,7	22,2	63	47,6	46,8
14	37,5	37,1	64	38,4	37,6
15	18,5	20,9	65	39,9	40,2
16	21,5	24,5	66	44,4	43,9
17	28,9	30,8	67	18,2	18,9
18	42,1	42,3	68	46,0	45,2
19	19,3	19,4	69	21,4	21,9
20	29,6	30,0	70	47,5	46,7
21	44,5	44,1	71	29,6	29,0
22	35,2	35,6	72	33,2	32,4
23	40,4	39,7	73	49,4	48,8
24	23,0	24,3	74	35,7	35,3
25	40,2	42,3	75	19,5	19,4
26	25,8	27,0	76	24,2	23,9
27	38,5	41,5	77	42,1	42,8
28	44,4	44,2	78	26,7	26,7
29	24,7	23,8	79	31,4	31,7
30	39,3	39,7	80	37,2	36,6
31	43,5	43,8	81	34,4	34,1
32	27,2	27,5	82	37,8	37,1
33	24,5	23,9	83	20,5	19,6
34	47,6	46,6	84	26,7	27,2
35	15,3	15,6	85	18,8	19,1
36	21,0	21,6	86	45,0	44,7
37	46,3	47,8	87	39,9	40,8
38	39,0	40,2	88	49,5	50,3
39	27,9	30,4	89	27,8	28,7
40	46,5	47,7	90	40,6	41,4
41	18,7	20,0	91	49,7	50,0
42	31,8	32,5	92	16,9	17,0
43	34,1	34,0	93	46,9	46,1
44	23,9	24,4	94	46,2	45,2
45	33,2	34,0	95	16,4	15,8
46	49,6	50,3	96	35,5	36,5
47	46,5	46,2	97	46,9	47,4
48	38,8	40,6	98	31,4	30,5
49	26,2	27,2	99	15,2	15,9
50	16,3	15,7	100	27,7	27,2

Вариант 7					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	6,4	6,7	51	17,9	19,4
2	16,6	16,7	52	11,6	14,6
3	14,6	13,9	53	15,8	15,6
4	13,1	13,4	54	11,2	11,5
5	13,5	12,8	55	19,9	20,3
6	14,9	15,1	56	7,5	8,2
7	16,7	16,6	57	11,4	11,4
8	15,0	15,3	58	19,2	19,6
9	17,1	17,0	59	13,8	12,9
10	18,5	18,4	60	19,8	19,8
11	16,2	15,7	61	15,7	14,9
12	6,3	7,1	62	14,3	14,1
13	17,6	17,4	63	16,7	15,7
14	19,8	20,8	64	18,0	18,0
15	11,7	12,8	65	12,6	12,6
16	9,5	10,9	66	17,9	17,3
17	19,1	20,4	67	9,9	10,0
18	7,6	7,5	68	19,6	19,4
19	16,5	15,7	69	19,9	20,7
20	18,9	19,0	70	17,2	16,8
21	7,5	7,7	71	9,0	9,3
22	7,7	7,8	72	10,0	9,0
23	6,5	7,4	73	6,3	6,1
24	6,4	9,3	74	17,1	18,4
25	7,1	24,1	75	6,9	7,1
26	10,7	11,8	76	11,8	11,4
27	6,9	8,7	77	7,3	6,8
28	9,0	8,1	78	15,5	15,4
29	15,9	15,8	79	10,0	10,9
30	11,8	11,4	80	14,1	15,0
31	18,1	18,9	81	17,6	17,8
32	17,5	18,3	82	8,2	7,9
33	17,0	17,4	83	19,5	20,5
34	16,3	15,4	84	13,7	14,6
35	9,3	9,2	85	18,9	19,5
36	17,2	17,5	86	18,1	18,3
37	18,2	20,8	87	10,8	10,8
38	9,5	10,9	88	11,9	12,8
39	14,0	15,0	89	12,6	12,9
40	15,9	18,3	90	15,9	15,6
41	20,0	21,0	91	16,2	16,6
42	10,0	9,9	92	18,6	19,5
43	10,5	10,1	93	13,5	14,4
44	13,6	13,0	94	15,3	29,0
45	17,9	17,7	95	9,9	9,6
46	16,3	16,9	96	19,6	20,2
47	9,5	10,0	97	11,1	11,4
48	19,4	20,6	98	6,5	6,7
49	14,2	16,6	99	19,4	20,3
50	7,8	20,7	100	18,6	18,8

Вариант 8					
№ п/п	P_1	P_2	№ п/п	P_1	P_2
1	*2*	*3*	*1*	*2*	*3*
1	9,5	9,7	51	23,8	26,3
2	17,4	18,4	52	6,0	8,4
3	6,3	6,9	53	24,4	25,1
4	16,8	17,4	54	6,5	5,9
5	16,6	17,2	55	23,5	22,0
6	20,3	20,2	56	18,3	18,1
7	19,1	18,6	57	11,0	10,2
8	22,2	22,3	58	19,3	18,4
9	23,4	24,0	59	12,8	12,6
10	8,6	8,1	60	21,3	21,4
11	17,5	17,8	61	17,3	18,1
12	10,4	11,1	62	12,8	12,8
13	17,9	18,9	63	16,0	15,5
14	12,1	12,2	64	20,5	21,0
15	14,4	16,0	65	18,1	18,7
16	12,1	13,6	66	22,3	22,2
17	20,1	21,7	67	7,1	6,2
18	16,2	16,6	68	21,5	22,3
19	23,5	23,1	69	12,7	13,0
20	17,0	17,4	70	8,3	9,3
21	5,6	4,9	71	22,9	23,7
22	17,2	17,3	72	21,2	21,9
23	11,5	11,9	73	15,9	15,5
24	6,6	9,5	74	20,7	18,4
25	22,7	24,1	75	9,7	10,3
26	13,2	14,3	76	6,3	7,2
27	9,5	11,1	77	19,8	20,1
28	21,1	20,9	78	6,9	6,9
29	13,7	13,2	79	24,9	24,7
30	23,8	24,4	80	6,8	6,9
31	7,7	8,6	81	13,4	13,7
32	21,1	20,4	82	21,7	21,0
33	17,1	16,5	83	22,0	21,1
34	18,0	18,7	84	8,3	7,7
35	23,0	23,1	85	23,1	30,2
36	15,7	15,7	86	21,4	21,6
37	16,0	17,2	87	10,2	9,7
38	22,9	25,8	88	10,4	9,7
39	20,5	23,2	89	24,9	25,4
40	6,8	9,2	90	11,5	10,9
41	20,2	22,2	91	14,6	13,9
42	19,4	16,2	92	6,5	6,8
43	19,2	20,0	93	25,0	24,5
44	25,0	25,2	94	12,2	29,0
45	8,8	9,0	95	18,6	18,4
46	23,3	23,8	96	24,1	24,9
47	9,8	9,6	97	17,6	16,7
48	10,9	12,0	98	10,9	10,8
49	23,1	25,4	99	11,5	21,0
50	7,4	20,7	100	18,5	18,2

Лабораторная работа № 16 (автор Редозубов А.А.)

Вертикальное электрическое зондирование на модели

В электрическом зондировании изучается изменение удельного сопротивления горных пород по вертикальному направлению. Чтобы получить такую информацию необходимо в точке зондирования выполнить измерения при различной глубине проникновения электрического тока в землю. В электроразведке постоянным и низкочастотным током это достигается путем изменения расстояния между источником поля и точкой наблюдений. Такое зондирование называется *геометрическим* или *дистанционным*. По результатам измерений для каждого размера установки рассчитывается кажущееся сопротивление $\rho_к$. Изменение $\rho_к$ при увеличении размера установки отражает изменение удельного сопротивления среды с глубиной.

Основная область применения электрического зондирования – изучение разрезов с пологими границами раздела. Но метод применяется и при изучении разрезов с локальными объектами.

Существует несколько модификаций электрического зондирования, различающихся типом использующихся установок. Чаще всего применяется зондирование с симметричной установкой *AMNB*. Эта модификация называется *вертикальным электрическим зондированием* (ВЭЗ). При проведении измерений по методу ВЭЗ приемная линия *MN* располагается симметрично относительно точки зондирования *O*, к которой относятся результаты измерений. Питающие заземления *A* и *B* также располагаются симметрично относительно этой точки (рис. 1, *а*). В процессе работы расстояние между питающими заземлениями увеличивается примерно в геометрической прогрессии с коэффициентом 1,5 и при каждом разносе *AB* измеряется $\rho_к$.

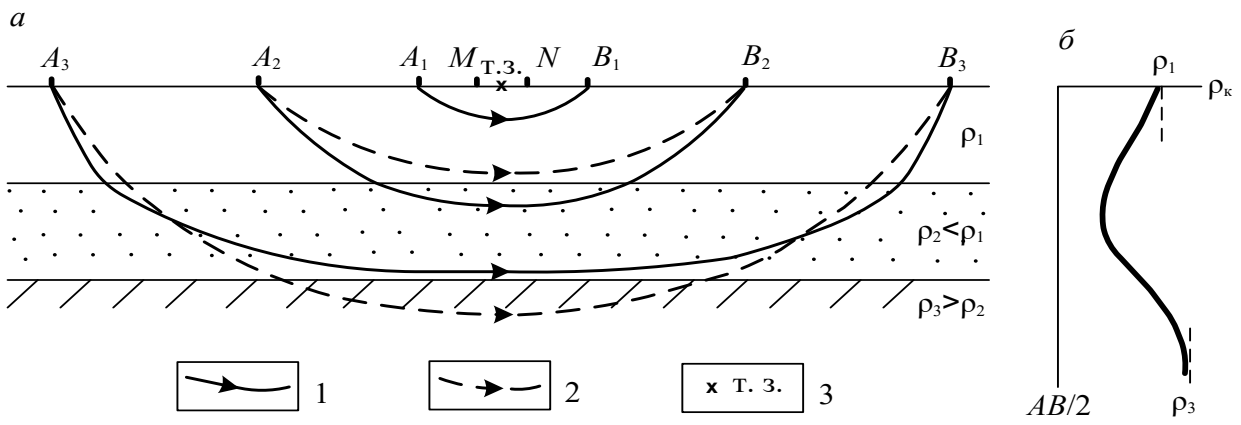


Рис. 1. К пояснению принципа электрического зондирования:

а – распределение тока в слоистом разрезе; *б* – кривая зондирования;
1 – токовые линии в слоистой среде; 2 – то же в однородном полупространстве;
3 – точка зондирования

Порядок измерений

Моделирование метода ВЭЗ в лабораторных условиях предлагается выполнить в ванне, заполненной влажным песком. Так как дно ванны является изолято-

ром, модель геоэлектрического разреза представляет собой двухслойную среду с нижним слоем бесконечного сопротивления. Латунные электроды устанавливаются в нужном положении на рейке. Для этого в рейке сделаны отверстия. Глубина погружения электродов в песок не должна превышать 2–3 мм (рис. 2).

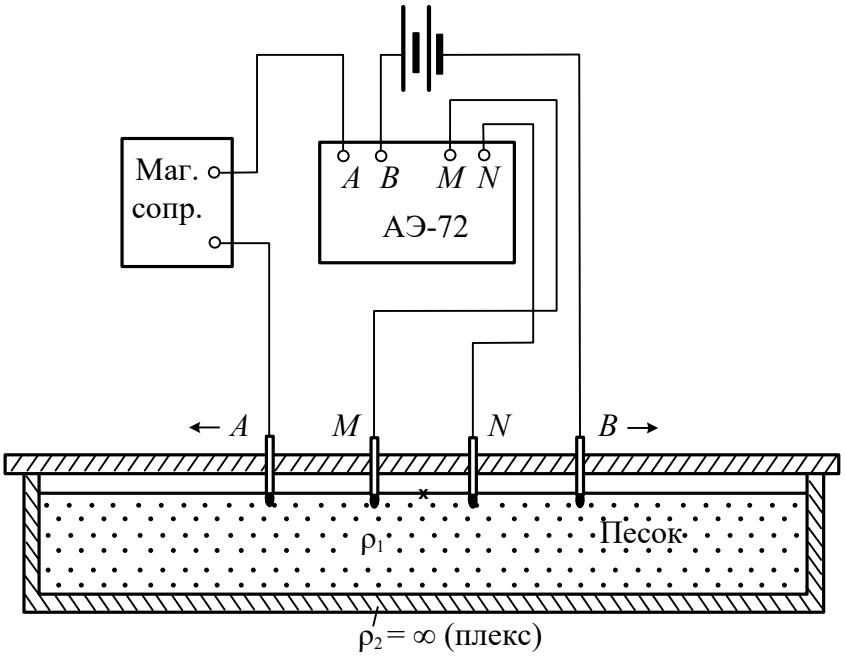


Рис. 2. Схема лабораторной установки

Измерения можно выполнять с любой аппаратурой постоянного или низкочастотного тока. На рис. 2 показана схема измерений с автокомпенсатором АЭ-72 и источником постоянного тока. В качестве источника тока можно использовать батарею гальванических элементов или аккумуляторов. Магазин сопротивлений включен в питающую линию для того, чтобы если при малых разносах AB разность потенциалов ΔU на приемных электродах превысит 1000 мВ (это максимальная величина, которую может измерить АЭ-72), можно было уменьшить силу тока и таким образом понизить измеряемую ΔU. Аналогичную схему можно собрать с любым другим измерителем постоянного тока.

Если измерения производятся с аппаратурой низкочастотного переменного тока, например, с АНЧ-3 или ЭРА-В-ЗНАК, генератор включается в линию AB, а измеритель – в линию MN. В этом случае генератор и измеритель автономны и не соединяются между собой.

Собрав схему, устанавливают минимальные разносы электродов AB и MN и выполняют измерения ΔU и I. Результаты измерений записывают в журнал и вычисляют кажущееся сопротивление по формуле

$$\rho_к = K\frac{\Delta U}{I} = \pi\frac{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}{MN}\cdot\frac{\Delta U}{I}. \qquad (1.2)$$

Коэффициенты установки K для всех разносов целесообразно вычислить заранее. Рассчитывать коэффициенты установки удобнее в сантиметрах, а потом перевести в метры. Если измерения выполняются с АЭ-72, следует помнить, что с этой аппаратурой ΔU измеряется в милливольтах, а I – в сантиамперах.

Затем устанавливают следующий разнос AB и снова измеряют ΔU и I и

вычисляют $\rho_к$ и т. д.

Так как при увеличении разноса питающих заземлений разность потенциалов ΔU быстро уменьшается (обратно пропорционально квадрату *AB*), начиная с некоторого размера питающей линии, увеличивают и разнос электродов *MN*. При одном разносе *AB* измерения выполняются с обоими разносами *MN*. Это делается для того, чтобы можно было учесть изменение удельного сопротивления ρ_{MN} среды между приемными заземлениями, пропорционально которому изменяется $\rho_к$. Измерения с двумя разносами электродов *MN* делают при двух соседних размерах линии *AB*. Так как отношение ρ_{M1N1}/ρ_{M2N2} для обоих разносов *AB* одинаково, одинаково и отношение $\rho_{кM1N1}/\rho_{кM2N2}$. Поэтому в логарифмическом масштабе отрезки кривой, построенные для первого и второго разносов *MN*, должны быть параллельны. Параллельность перекрывающихся отрезков кривой зондирования является одним из критериев оценки качества работ.

Когда достигается разнос электродов *AB*, при котором изменяется разнос *MN*, целесообразно выполнить все измерения с первым разносом приемных электродов, а потом вернуть электроды *AB* в предыдущее положение и продолжить измерения с новым разносом электродов *MN*. Такая методика более целесообразна, потому что в лабораторных условиях из-за малой длины приемной линии трудно точно восстановить положение электродов *MN*.

Одновременно с измерениями строится кривая зондирования – размер установки изменяется только после того, как на кривую нанесен результат измерения $\rho_к$. В случае резкого изменения хода кривой необходимо выполнить повторное измерение. Если второй результат отличается от первого более, чем на 5 %, производится третье измерение и принимаются два сходящихся результата. Результаты повторных измерений записываются в отдельные строчки журнала, а в графе "примечания" указывается, что это повторные измерения.

Рекомендуемая схема разносов питающей и приемной линий:

***AB*/2**, см 1,5; 2,0; 3,0; 4,5; 4,5; 7.0; 7,0; 10,0; 15,0.

***MN*/2**, см 0,5; 0,5; 0,5; 0,5; 1,5; 0,5; 1,5; 1,5; 1,5.

После окончания зондирования выполняют контрольные измерения на двух разносах *AB*. Эти измерения следует выполнить другому оператору. Результаты контрольных измерений записываются в отдельных строках журнала, с отметкой в графе "примечания", что это контрольные измерения. Необходимо понимать разницу между повторными и контрольными измерениями. Повторные измерения – это внутренний контроль, при котором оператор сам контролирует себя. Контрольные измерения – это объективный внешний контроль, при котором учитываются все факторы, которые могут вызвать погрешности измерений. Такими факторами могут быть погрешности установки электродов, индивидуальные особенности оператора и т. д. Для оценки качества работ используются только контрольные измерения.

Порядок обработки и интерпретации результатов

Так как зондирование выполнялось при двух разносах *MN*, кривая состоит из двух отрезков, смещенных один относительно другого. Перед интерпретацией необходимо выполнить монтаж кривой. Для этого один из отрезков

принимают за базовый, а другой переносят параллельно самому себе, так чтобы получилась цельная кривая (рис. 3).

Так как дно ванны имеет практически бесконечное сопротивление, конечная асимптота кривой зондирования представляет собой прямую линию, наклоненную к осям координат под углом 45˚. Начальной асимптотой кривой является прямая, параллельная оси разносов, $\rho_к=\rho_1$.

Интерпретация таких кривых очень проста: точка пересечения асимптот имеет координаты, равные мощности верхнего слоя h_1 и его удельному сопротивлению ρ_1 (см. рис. 3).

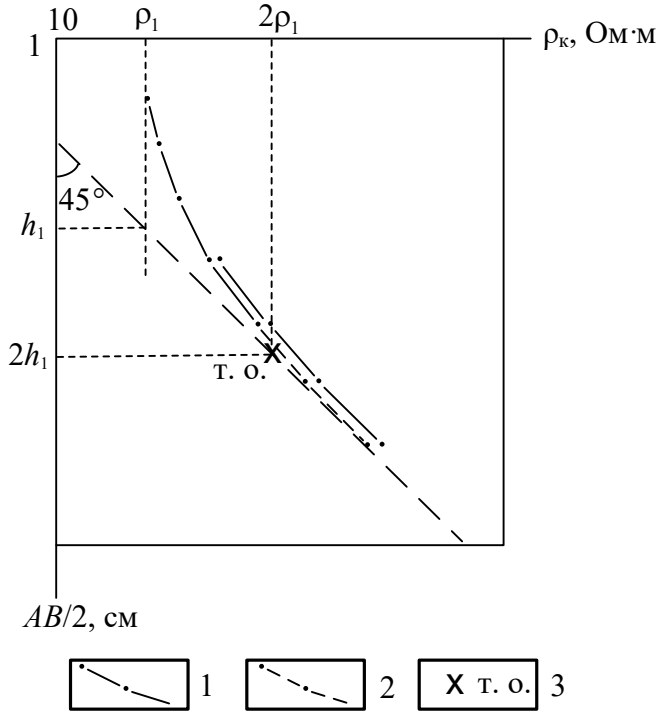


Рис. 3 Пример интерпретации двухслойной кривой ВЭЗ ($\rho_к=\infty$):
1 – измеренная кривая ВЭЗ; 2 – перемещенный при монтировании отрезок кривой;
3 – точка отрыва

Другим простым способом является интерпретация по точке отрыва. Это точка, в которой кривая отрывается от своей конечной асимптоты. Координаты точки отрыва $AB/2\approx 2h_1$, $\rho_к\approx 2\rho_1$ (см. рис. 3).

Задание:

1) Собрать установку ВЭЗ.
2) Выполнить измерения ΔU и I для следующих разносов питающей и приемной линий:

   $AB/2$, см : 1,5; 2,0; 3,0; 4,5; 4,5; 7.0; 7,0; 10,0; 15,0.

   $MN/2$, см : 0,5; 0,5; 0,5; 0,5; 1,5; 0,5; 1,5; 1,5; 1,5.

   Одновременно с измерениями построить кривую зондирования.
3) Выполнить монтаж кривой зондирования.
4) По кривой зондирования определить сопротивление верхнего слоя ρ_1 и его мощность h_1 двумя способами: по тоске пересечения асимптот и по точке отрыва.

Лабораторная работа № 17 (автор Редозубов А.А.)

Симметричное электрическое профилирование на модели

В электрическом профилировании измерения выполняются с установкой одинакового размера, перемещающейся по пикетам профиля. В этом случае глубина исследования в разных точках примерно одинакова. Результаты измерений позволяют получить информацию об изменении удельного сопротивления горных пород вдоль профиля. По результатам измерений в каждой точке вычисляется кажущееся сопротивление $\rho_к$, а затем строится график $\rho_к$ по профилю.

Область применения электропрофилирования – геологическое картирование и поиски локальных объектов, отличающихся от вмещающей среды по удельному сопротивлению. Наиболее благоприятными для поисков являются крутопадающие пластообразные и линзообразные тела. Иногда электропрофилирование применяют в структурной геофизике для изучения рельефа кровли опорного горизонта.

Существует больше десятка модификаций электропрофилирования, различающихся типом применяющихся установок. Одной из самых простых модификаций по технологии проведения полевых работ и интерпретации результатов является симметричное профилирование. В СЭП, как следует из его названия, используется симметричная установка. В этой установке питающие заземления A и B и приемные электроды M и N располагаются симметрично относительно центра O. Результаты измерений относятся к центру установки, который является точкой записи. Симметричное профилирование может применяться как с одним размером установки, так и с двумя, а иногда и с тремя разносами питающих заземлений. Результаты измерений с несколькими разносами питающих электродов при благоприятных условиях позволяют раделить выявленные аномалии по относительной глубине залегания вызвавших их объектов (получается минизондирование) (рис. 1).

Порядок измерений

В лабораторной работе предлагается выполнить моделирование симметричного профилирования с двумя разносами питающей линии в ванне, заполненной влажным песком. В песке помещены модели проводящих и плохо проводящих объектов, расположенных на различной глубине. На перемещающейся по направляющей рейке каретке установлены две пары питающих электродов (линии AB и A′B′) и электроды общей приемной линии MN (рис. 2). Результаты измерений относятся к центру приемной линии. Для привязки точек измерений на рейке нанесены деления – "пикеты".

Для измерений можно использовать любую аппаратуру постоянного или низкочастотного переменного тока. На рис. 2 показана схема измерений с аппаратурой АНЧ-3. Чтобы избежать переключения генератора на каждой точке с одной питающей линии на другую, в лабораторных условиях целесообразно выполнить измерения по всему профилю сначала с одним, а затем с другим разносом питающих электродов.

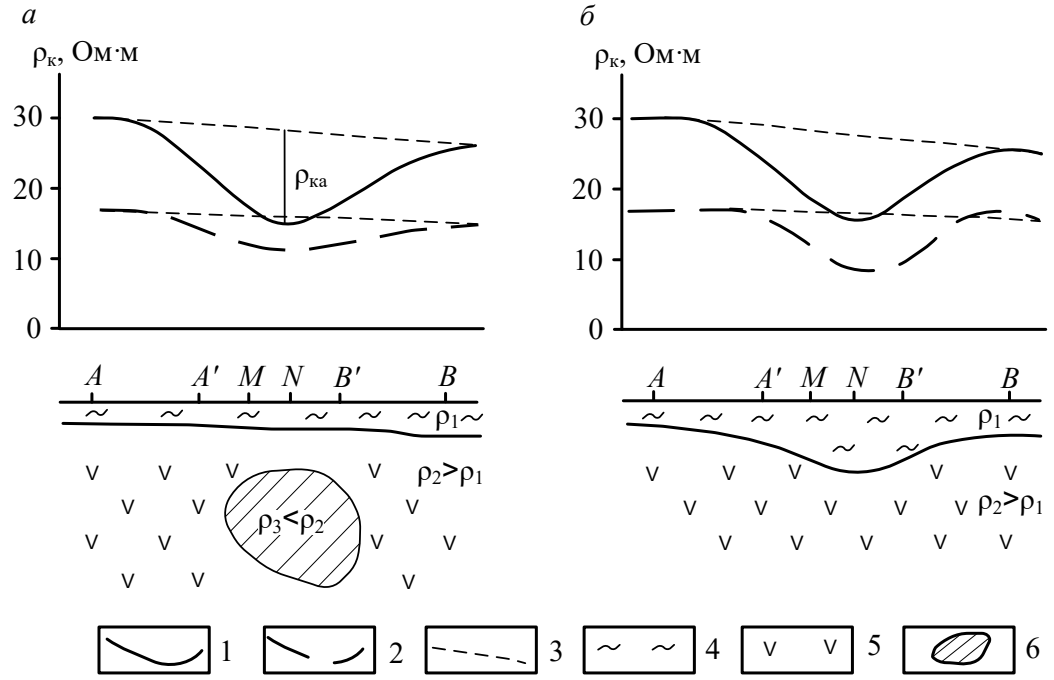


Рис. 1. Вид аномалий $\rho_к$ в двухразносном профилировании над глубинным проводящим объектом (*а*) и карманом наносов (*б*): 1 – графики $\rho_к$ для установки *AMNB*; 2 – то же для установки *A'MNB'*; 3 – графики $\rho_к$ нормального поля (фоновые); 4 – рыхлые отложения; 5 – коренные породы; 6 – локальный проводящий объект

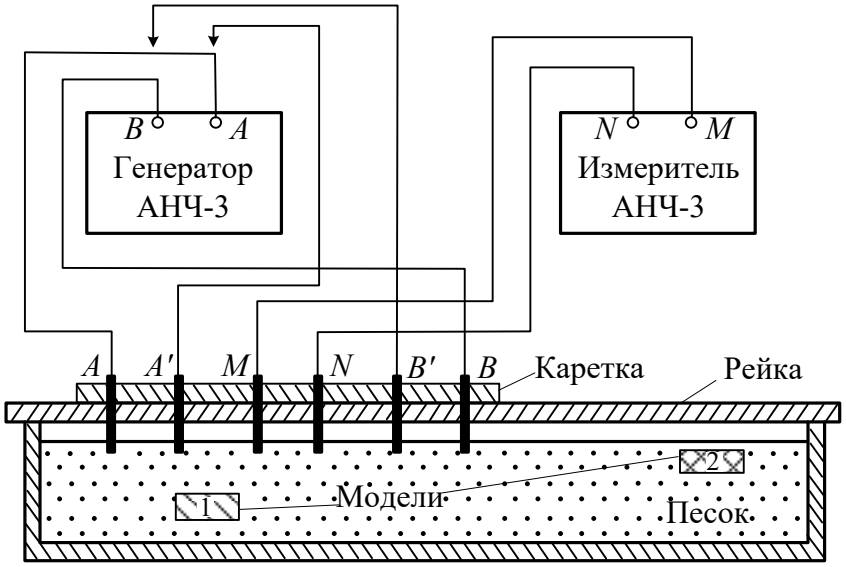


Рис. 2 Схема лабораторной установки по методу СЭП

Если используется аппаратура ЭРА-В-ЗНАК или другая подобная аппаратура переменного тока, схема измерений аналогична схеме с АНЧ-3. Схема измерений с аппаратурой постоянного тока приведена на рис. 2.

Поставив установку на начальную точку профиля, измеряют разность потенциалов ΔU для разноса, к которому подключен генератор. Сила тока I генератора АНЧ-3 стабилизирована, поэтому измерять ее не нужно. Если используется аппаратура, ток которой не стабилизирован, измеряют силу тока в питающей линии.

Выполнив измерения на точке, рассчитывают кажущееся сопротивление:

$$\rho_к = K\frac{\Delta U}{I} = \pi\frac{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}{MN}\cdot\frac{\Delta U}{I}. \quad (1)$$

Затем перемещают установку на следующую точку и снова выполняют измерения. Закончив измерения с одной установкой, переключают генератор на другую питающую линию и повторяют измерения по профилю.

Если в процессе измерений наблюдаются резкие незакономерные изменения $\rho_к$, выполняют повторные измерения. В случае расхождения результата второго измерения с первым более, чем на 5%, выполняют третье измерение и принимают среднее значение из двух сходящихся результатов. Результаты повторных измерений записывают в отдельных строках журнала, отмечая в графе "примечания", что это повторные измерения.

После окончания измерений на 2–3 точках, расположенных в разных частях профиля, выполняют контрольные измерения. Результаты контрольных измерений записывают в отдельных строках журнала с отметкой в графе "примечания", что это контрольные измерения.

Порядок обработки и интерпретации результатов

Результаты измерений представляются в виде графиков кажущегося сопротивления по профилю. Для обоих размеров установки графики следует строить в одной системе координат в одинаковом масштабе.

По графикам $\rho_к$ выделяют аномалии от локальных объектов. По знаку аномалий определяют сопротивление объектов по отношению к вмещающей среде. Приближенное положение контактов объектов определяют по полумаксимуму $\rho_к$.

Задание:

5) Собрать установку СЭП.
6) Выполнить измерения ΔU на точках профиля.
7) Рассчитать $\rho_к$ для каждой точки профиля и построить кривую $\rho_к$.
8) По кривой $\rho_к$ определить положение объектов различного сопротивления и глубину их залегания.
9) С помощью щупа определите реальное положение объектов и глубину их залегания. Фактическое положение объектов покажите под графиками $\rho_к$ и сравните его с результатами интерпретации.

Лабораторная работа № 18

Изучение геологического разреза по данным симметричного электропрофилирования на двух разносах

Симметричное электрическое профилирование (СЭП) представляет собой одну из наиболее простых и распространенных модификаций электроразведки постоянным током. Для работ методом СЭП применяется 4-х электродная симметричная установка *AMNB*, состоящая из двух питающих электродов *A* и *B* и двух приемных *M* и *N*, расположенных по одной линии симметрично относительно центра установки. В процессе измерений расстояние между электродами не меняется, а вся установка переносится по профилю на определенный интервал, называемый шагом профилирования. Шаг профилирования чаще всего берут кратным *MN*.

Установка *AA'MNB'B* состоит из двух четырехэлектродных установок *AMNB* и *A'MNB'*, имеющих один разнос приемных электродов *MN*. Наличие второй пары питающих электродов позволяет на каждой точке профиля получать значение $\rho_к$ для двух разных глубин. Это дает возможность делать заключение не только об изменении $\rho_к$ по горизонтальному направлению, но и по вертикали.

Влияние двух геологических структур в разрезе на особенности распределения сопротивления, полученного установкой *AA'MNB'B* показано на рис. 1. Одна структура типа синклинали заполнена хорошо проводящими породами, другая (антиклиналь) имеет хорошо проводящие породы в ядре.

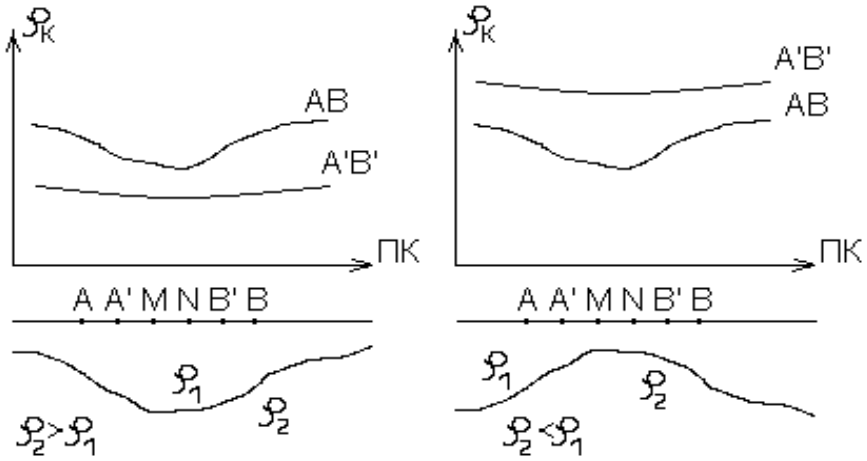


Рис. 1. Графики электропрофилирования установкой AA'MNB'B над синклиналью и антиклиналью

Над этими структурами графики $\rho_к$, полученные установкой *AMNB* (сплошная линия) одинаковы. Местоположение синклинали и антиклинали отмечаются минимумами $\rho_к$. Эта неоднозначность решения обратной задачи исчезает, если провести профилирование с установкой *AA'MNB'B*. Над синклиналью значение $\rho_к$. для малого разноса *A'B'* будут меньше $\rho_к$. для большого разноса *AB*. Над антиклиналью будет отмечаться обратное соотношение величин $\rho_к$. для

разносов *A′B′* и *AB*. Таким образом, применение установки с двумя разносами питающей линии в данном случае исключает неоднозначность интерпретации результатов профилирования.

Задание

Вариант 1

Исходные данные

На одном из участков выполнено симметричное электрическое профилирование *AA′MNB′B*. Разнос питающих электродов *A*, *B* большой установки равен 1000 м, разнос электродов *A′* и *B′* малой установки равен 200 м. Шаг наблюдения по профилю – 50 м. Протяженность профиля 2,5 км. Линия профиля проходит в направлении предполагаемой антиклинальной структуры, сложенной известняками. Предполагается, что профиль пересекает погребенную долину, выполненную аллювием. Эта долина обнаружена на соседнем участке с мощностью аллювия до 60 м. Верхняя часть разреза представлена суглинками и глинами. Удельное сопротивление этих пород, полученное по данным параметрических измерений, составляет 20-30 Ом*м. Результаты измерений с установкой *AA′MNB′B* представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения $\rho_к$. при *AB* = 1000 м и *A′B′* = 200 м

Номера пикетов	$\rho_к$., Ом*м.		Номера пикетов	$\rho_к$., Ом*м.	
	AB = 1000 м	*A′B′* = 200 м		*AB* = 1000 м	*A′B′* = 200 м
0	25	23	26	25	28
1	26	25	27	25	27
2	27	24	28	23	26
3	27	28	29	26	26
4	29	30	30	31	27
5	28	26	31	37	35
6	30	28	32	57	56
7	32	30	33	95	78
8	37	36	34	122	105
9	41	48	35	158	114
10	47	65	36	190	139
11	60	100	37	212	147
12	88	124	38	214	150
13	105	139	39	206	142
14	121	165	40	175	130
15	127	195	41	155	89
16	115	188	42	125	64
17	100	128	43	105	48
18	92	100	44	80	40
19	81	70	45	50	35
20	60	55	46	32	28
21	40	37	47	26	26
22	35	32	48	26	25
23	32	30	49	25	24
24	30	28	50	26	26
25	28	25			

Требуется *определить* геологическую природу выявленных аномалий и построить схематический разрез вдоль профиля.

Порядок выполнения задачи

1. По данным табл. 1 построить на миллиметровке графики $\rho_к$. для разноса AB = 1000 м (сплошная линия) и $A'B'$ = 200 м (пунктирная линия). Масштаб построения графиков: горизонтальный 1:10000, вертикальный 1 см – 20 Ом*м.
2. Определить соответствие аномалий на графиках $\rho_к$. геологическим особенностям строения разреза (переуглубление с аллювием или антиклинальное поднятие, выполненное известняками).
3. Построить под графиком схематический геологический разрез.

Вариант 2

Исходные данные.

В пределах одного участка, сложенного карбонатными породами (известняки, доломиты) предполагается наличие в разрезе двух геологических объектов. Первый из них связан с поверхностными карстовыми проявлениями. В этом случае в карбонатных породах образуются депрессии, заполненные рыхлыми отложениями (пески, глины, суглинки). Второй – подземные карстовые полости, залегающие на глубинах 20-30 м, заполненные обводненным глинистым материалом с обломками карбонатных пород.

Проведенные работы методом электропрофилирования по схеме *AMNB* показали, что оба объекта отмечаются на графиках минимума $\rho_к$. Для однозначной геологической интерпретации аномалий были выполнены измерения установкой *AA'MNB'B* с разносами питающих линий AB = 100м, $A'B'$ = 20 м. Шаг наблюдения по профилю – 10 м.

Удельное сопротивление карбонатных пород, полученное по данным бокового каротажного зондирования, изменяется от 1000 до 2000 Ом*м. Удельное сопротивление пород, заполняющих карстовые полости варьируется от 100 до 200 Ом*м. Результаты измерений с установкой *AA'MNB'B* представлены в таблице 2.

Требуется *определить* геологическую природу выявленных аномалий и построить схематический разрез вдоль профиля.

Порядок выполнения задачи

1. По данным табл. 4 построить на миллиметровке графики $\rho_к$. для разноса AB = 100 м и $A'B'$ = 20 м. Масштаб построения графиков: горизонтальный 1:2000, вертикальный 1 см – 200 Ом*м.
2. Определить, какие из выявленных аномалий обусловлены погребенной карстовой полостью и какие – поверхностными карстовыми образованиями.
3. Построить под графиком схематический геологический разрез.

Таблица 2

Значения $\rho_к$. при AB = 1000 м и $A'B'$ = 200 м

Номера пикетов	$\rho_к$., Ом*м.		Номера пикетов	$\rho_к$., Ом*м.	
	АВ = 100 м	А'В' = 20 м		АВ = 100 м	А'В' = 20 м
0	1700	1600	26	1680	1550
1	1650	1590	27	1740	1690
2	1680	1610	28	1700	1600
3	1700	1600	29	1650	1600
4	1720	1650	30	1700	1650
5	1730	1690	31	1800	1750
6	1690	1700	32	1750	1700
7	1750	1750	33	1700	1600
8	1650	1700	34	1650	1400
9	1200	1450	35	1500	1200
10	1000	1400	36	1490	900
11	970	1350	37	1400	730
12	900	1300	38	1200	700
13	850	1200	39	1070	650
14	800	1180	40	1100	780
15	830	1000	41	1150	800
16	840	1050	42	1300	980
17	800	1100	43	1450	1200
18	900	1200	44	1600	1450
19	1000	1400	45	1580	1600
20	1100	1430	46	1650	1550
21	1180	1500	47	1700	1600
22	1600	1600	48	1700	1650
23	1700	1650			
24	1700	1650			
25	1600	1580			

Лабораторная работа № 19

Интерпретация результатов полевых наблюдений по методу заряженного тела

Метод заряженного тела (МТЗ) основан на изучении потенциала или градиента потенциала постоянного (или низкочастотного) поля, создаваемого точечным источником, заземленным в скважине или горной выработке.

Метод применяется для прослеживания и оконтуривания ранее выявленных хорошо проводящих рудных объектов, а также для решения гидрогеологических задач.

Гидрогеологический вариант метода предназначен для определения направления и скорости движения подземных вод при наличии одной скважины. Данные полевых наблюдений в этом случае представляются в виде плана изолиний потенциала, полученного в результате измерений вдоль лучевых профилей над скважиной, в которую до водоносного горизонта опущен один из питающих электродов с электролитом. Пример плана изолиний показан на рис. 1.

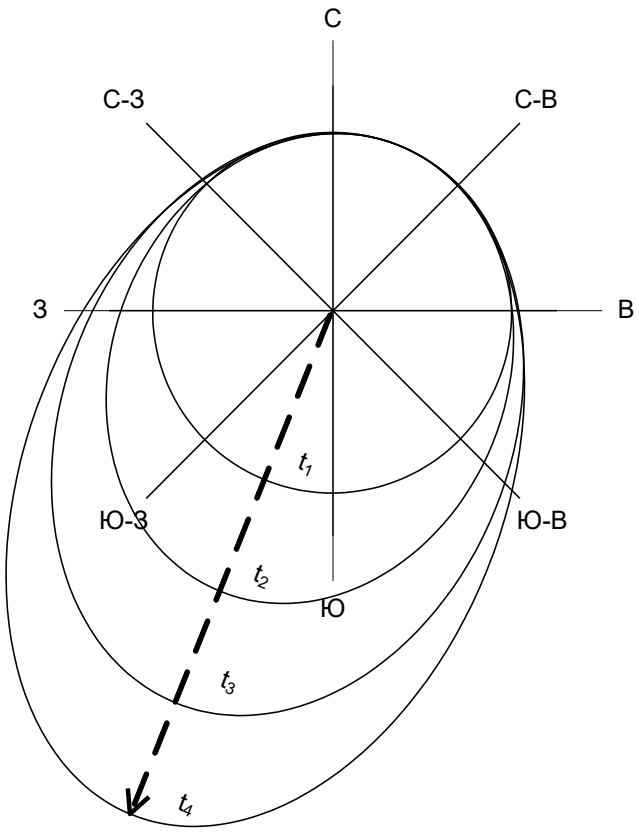


Рис. 1. План изолиний потенциала над засоленной скважиной

Определение направления движения подземного потока и его скорости производится следующим образом:

1) По плану изолиний определяется направление (азимут) максимального смещения изолиний. Для этого можно построить график, по оси абсцисс которого откладывается азимут в градусах, а по оси ординат – приращение радиусов изолиний в метрах (ΔR) по отношению к исходной изолинии, наблюденной непосредственно после засоления скважины и представляющей собой, как правило, фигуру, близкую к окружности. Число кривых ΔR соответствует числу наблюденных изолиний. Пример такого графика приведен на рис. 2. Азимут направления движения подземного потока определяется как средняя абсцисса для максимумов кривых ΔR.

2) Для определения скорости подземного потока V вычисляется отношение максимального смещения изолинии ΔR_{max} по направлению пото-

ка ко времени Δt, за которое это смещение произошло:

$$V = \Delta R / \Delta t \qquad (1)$$

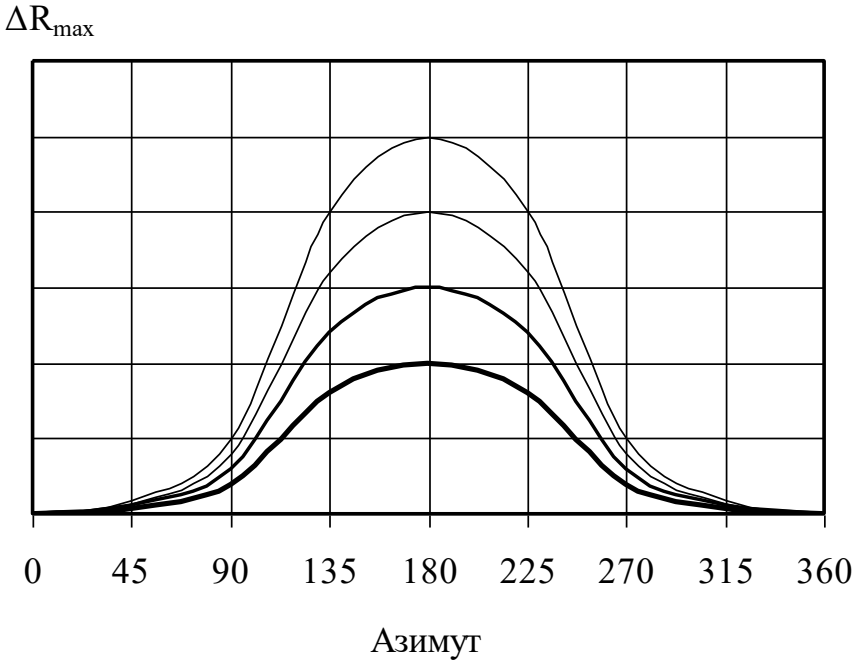


Рис.2. Графики смещения изолиний ΔR в зависимости от азимута профиля наблюдений

Среднее значение V можно получить, построив график зависимости ΔR_{max} от времени t. При малых временах ΔR_{max} меняется в зависимости от времени не линейно, возрастая с увеличением t, что объясняется постепенностью растворения соли в воде. При больших временах график зависимости ΔR_{max} от времени выходит на линейную асимптоту, соответствующую скорости переноса засоленной области потоком подземных вод. Эту часть графика и используют для расчета скорости по формуле (1).

Задание

По выданным преподавателем результатам полевых наблюдений методом заряженного тела над засоленной скважиной определить в соответствии с вышеизложенной методикой направление и скорость движения подземного потока.

Построить график смещения изолиний в зависимости от азимута профиля наблюдений (рис. 2).

Интервал времени между измерениями Δt принять равным 2 часа.

Масштаб плана изолиний потенциала над засоленной скважиной 1:2000.

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна

ПРАКТИКУМ ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению практических работ
по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов
специальности 21.05.03 − «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Часть 1

Редактор _____
Компьютерная верстка автора

Подписано в печать ___ . ___ . 2018 г.
Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. ____. Уч.-изд. л. ____. Тираж 100. Заказ _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА
ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Автор: Александрова Ж. Н.

Екатеринбург

2020

ФГБОУ ВО

«Уральский государственный горный университет»

Ж. Н. Александрова

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению контрольной работы
по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Екатеринбург
2020

ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
методической комиссией
факультета геологии и геофизики
Председатель комиссии

_____ В. И. Бондарев
«20» марта 2020 г.

Ж. Н. Александрова

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению контрольной работы
по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов
специальности 21.05.03 Технология геологической разведки
очной и заочной формы обучения

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

УДК 550.83
А46

Рецензент: Писецкий В.Б., д-р геол.-мин. наук, профессор, заведующий кафедрой геоинформатики УГГУ

Александрова Ж.Н.

А46 Контрольная работа по разведочной геофизике: руководство по выполнению контрольной работы по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки очной и заочной формы обучения. / Ж.Н. Александрова; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: изд-во УГГУ, 2020. – 29 с.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Технология геологической разведки»

© Александрова Ж.Н., 2018
© Уральский государственный горный университет, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

1. **Общие указания** …… 5

2. **Требования к содержанию и оформлению контрольной работы** 6

3. **Критерии оценки контрольной работы** ……..... 8

4. **Варианты заданий** …… 9

5. **Список рекомендованной литературы** …….. 29

1. Общие указания

Учебным планом специальности «Технология геологической разведки» предусматривается написание контрольной работы по дисциплине «Разведочная геофизика».

Перечень заданий разрабатывается преподавателем. Задание во всех вариантах направлено на выбор способа (способов) решения конкретной геологической задачи. В качестве исходных данных каждому студенту выдается краткое описание геологического строения месторождения полезного ископаемого, его геологический разрез и таблица физических свойств горных пород, слагающих разрез.

Формулировка задания:

для поиска месторождения указанного типа (согласно варианту), определения его размеров и глубины залегания

1. выбрать рациональный комплекс геофизических методов и привести его обоснование;
2. сформулировать задачи, которые будут решены выбранными методами и привести обоснование;
3. определить ориентировочный шаг съемки для каждого метода и привести расчеты;
4. выбрать аппаратуру для проведения измерений, обосновать ее выбор, представить краткое описание устройства и принципа действия приборов.

К выполнению контрольной работы можно приступить только тогда, когда будет усвоена определенная часть курса. Контрольная работа выполняется студентами исключительно самостоятельно, согласно настоящей методической инструкции. Ее выполнение способствует углублённому изучению пройденного материала.

Цель выполняемой работы:

проверка способности студентов использовать свои знания, умения и навыки для решения конкретных практических задач.

Основные задачи выполняемой работы:

1) закрепление полученных ранее теоретических знаний;

2) выработка навыков самостоятельной работы;

3) выяснение подготовленности студента к будущей практической работе.

Весь процесс написания контрольной работы можно условно разделить на следующие этапы:

- получение задания и составление предварительного плана работы;
- сбор научной информации, изучение литературы;
- анализ составных частей проблемы, выполнение расчетов;

- обработка материала в целом;
- письменное оформление работы.

Подготовку контрольной работы следует начинать с повторения соответствующего раздела учебника, учебных пособий по данной теме и конспектов лекций, прочитанных ранее. Приступать к выполнению работы без изучения основных положений и понятий дисциплины не следует, так как в этом случае студент, как правило, плохо ориентируется в материале, не может отграничить смежные вопросы и сосредоточить внимание на основных моментах предложенного задания.

После получения задания необходимо внимательно изучить методические рекомендации по выполнению контрольной работы, составить план работы.

2. Требования к содержанию и оформлению контрольной работы

Оформление текстовой части производится согласно ГОСТ 2.105–95 «Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам».

Все иллюстрации нумеруются сквозной нумерацией (рис. 1, рис. 2, рис. 3 и т.д.). На все рисунки в тексте должны быть сделаны ссылки.

В содержании контрольной работы необходимо показать знание рекомендованной литературы по данной теме, но при этом следует правильно пользоваться первоисточниками, избегать чрезмерного цитирования. При использовании цитат необходимо указывать точные ссылки на используемый источник: указание автора (авторов), название работы, место и год издания, страницы.

Кроме рекомендованной специальной литературы, можно использовать любую дополнительную литературу, которая необходима для выполнения контрольной работы.

В конце контрольной работы приводится полный библиографический перечень использованных источников. Данный список условно можно подразделить на следующие части:

2. Учебники, учебные пособия, методические указания

3. Монографии.

4.Официальные интернет-источники.

Первоисточники даются по алфавиту. Список литературы оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003. На все источники, указанные в списке литературы, в тексте должны быть сделаны ссылки. В списке литературы должны приводиться только опубликованные источники. *Не допускается указывать в списке литературы конспект лекций по предмету*!

Оформление библиографических ссылок осуществляется в следующем порядке:

1. Фамилия и инициалы автора (коллектив авторов) в именительном падеже. При наличии трех и более авторов допускается указывать фамилии и инициалы первых двух и добавить «и др.». Если книга написана авторским коллективом, то ссылка делается на название книги и её редактора. Фамилию и инициалы редактора помещают после названия книги.

2. Полное название первоисточника в именительном падеже.

3. Место издания.

4. Год издания.

5. Общее количество страниц в работе.

При использовании цитат необходимо правильно и точно делать внутритекстовые ссылки на первоисточник. Ссылки на используемые первоисточники можно делать в конце цитаты в квадратных скобках.

Структура контрольной работы должна выглядеть следующим образом:

1. Титульный лист.
2. Содержание.
3. Задание.
4. Пояснительная записка с разбивкой на подразделы (по выбору автора):
   а) Введение.
   б) …….
   в) …….
   г) …….
5. Выводы.
6. Список литературы.

Контрольная работа излагается логически последовательно, грамотно и разборчиво. Она обязательно должна иметь титульный лист. Он содержит название высшего учебного заведения, название темы, фамилию, инициалы, учёное звание и степень научного руководителя, фамилию, инициалы автора, номер группы.

На следующем листе приводится содержание контрольной работы с указанием страниц.

Введение должно быть кратким, не более 1 страницы. В нём необходимо отметить цель и задачи, которые ставятся в работе, значение полезного ископаемого, указанного в задании, области его использования, достижения геофизики в области поисков и разведки данного полезного ископаемого и т.д.

Изложение каждого подраздела пояснительной записки необходимо начать с написания заголовка, соответствующему оглавлению, который должен отражать содержание текста. Заголовки от текста следует отделять интервалами. Каждый заголовок обязательно должен предшествовать непосредственно своему тексту. В том случае, когда на очередной страни-

це остаётся место только для заголовка и отсутствует место хотя бы для одной строчки текста, заголовок нужно писать на следующей странице.

Излагая вопрос, каждый новый смысловой абзац необходимо начать с красной строки. Закончить изложение вопроса следует выводом, итогом по содержанию данного подраздела.

Изложение содержания всей контрольной работы должно быть завершено заключением, в котором необходимо дать выводы по написанию работы в целом.

Страницы контрольной работы должны иметь сквозную нумерацию. Номер страницы ставится снизу в правом углу. На титульном листе номер страницы не ставится. Оптимальный объём контрольной работы 8-10 страниц машинописного текста (размер шрифта 12-14) через полуторный интервал на стандартных листах формата А-4, поля: верхнее –20 мм, нижнее –20 мм, левое –30 мм, правое –10 мм.

В тексте контрольной работы не допускается произвольное сокращение слов, кроме общепринятых.

По всем возникшим вопросам студенту следует обращаться за консультацией к преподавателю.

Срок выполнения контрольной работы определяется преподавателем и она должна быть сдана не позднее, чем за неделю до экзамена.

3. Критерии оценки контрольной работы

По результатам проверки контрольная работа оценивается на 0 - 5 баллов.

Списывание контрольной работы даже при правильности ее написания и оформления оценивается на 0 баллов.

Критерий оценки	Количество баллов
Правильность выбора рационального комплекса геофизических методов и убедительность его обоснования	0 – 1 балл
Правильность формулировки перечня задач, которые будут решены выбранными методами и его обоснованность	0 – 1 балл
Правильность определения ориентировочного шага съемки для каждого метода	0 – 1 балл
Правильность выбора аппаратуры для проведения измерений, его обоснованность и краткое описание устройства и принципа действия приборов	0 – 1 балл
Оформление работы	0 – 1 балл

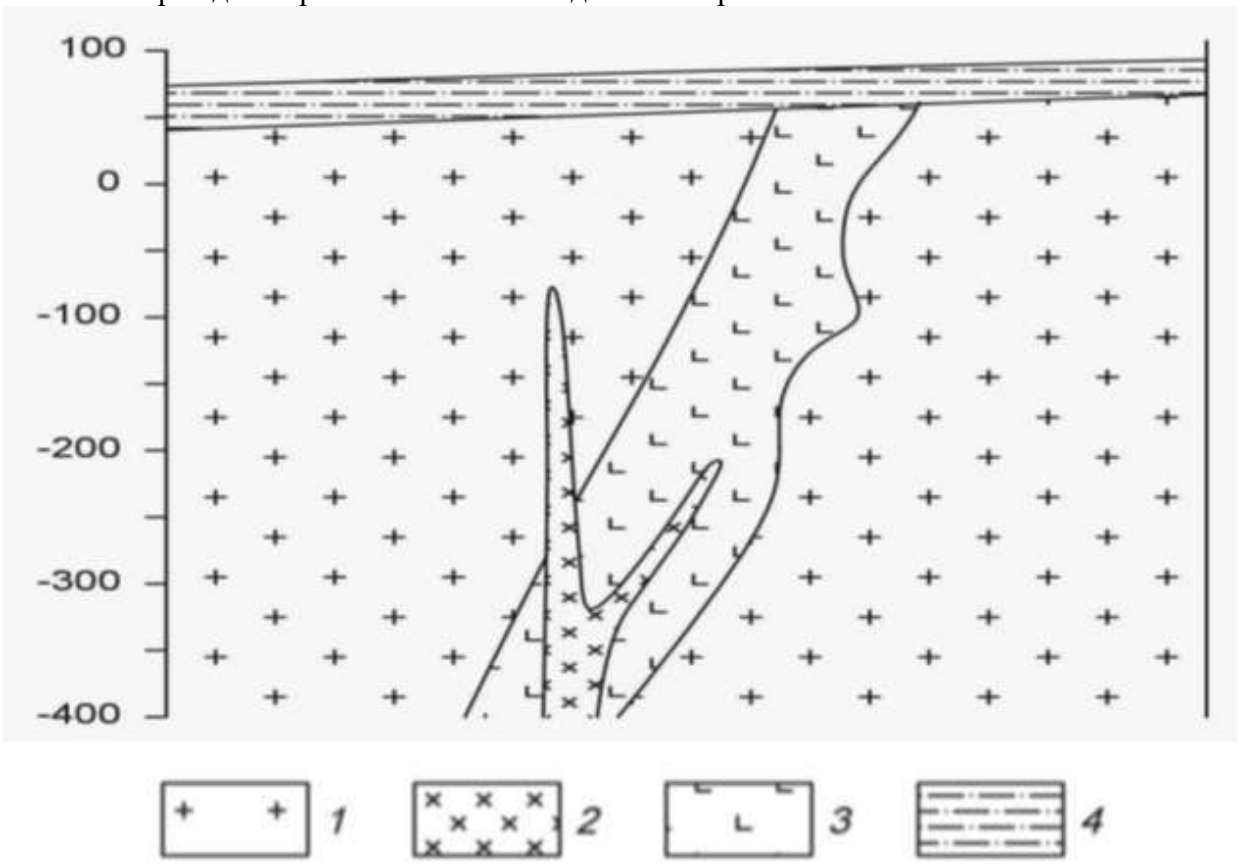
4. Варианты заданий

Вариант 1. **Золото**

Месторождение Красное приурочено к интрузивным образованиям раннего протерозоя, являющимся вмещающими породами для эксплозивных структур, выполненных жерловыми и субвулканическими фациями раннетриасового возраста (см. рис.).

Распределение полезных компонентов в ней имеет неравномерный, столбообразный, линзообразный и гнездовый характер, с наличием раздувов, пережимов и прослоев слабо золотоносных пород в контуре кондиционных руд. Наиболее богатые руды тяготеют к осевой части зоны метасоматитов, где они концентрируются в виде согласных полос. Четких геологических границ обогащенные участки не имеют и выделяются только по данным опробования.

Месторождение расположено в Западной Сибири.



Схематический геологический разрез золоторудного месторождения Красное.
1 – раннепротерозойский среднезернистые порфировидные грани-тоиды, *2* – позднеюрские дайки диоритов, *3* – раннетриасовые гидротермаль-но измененные эруптивные брекчии гранодиорит-порфиров, *4* – четвертич-ные отложения, представленные суглинками.

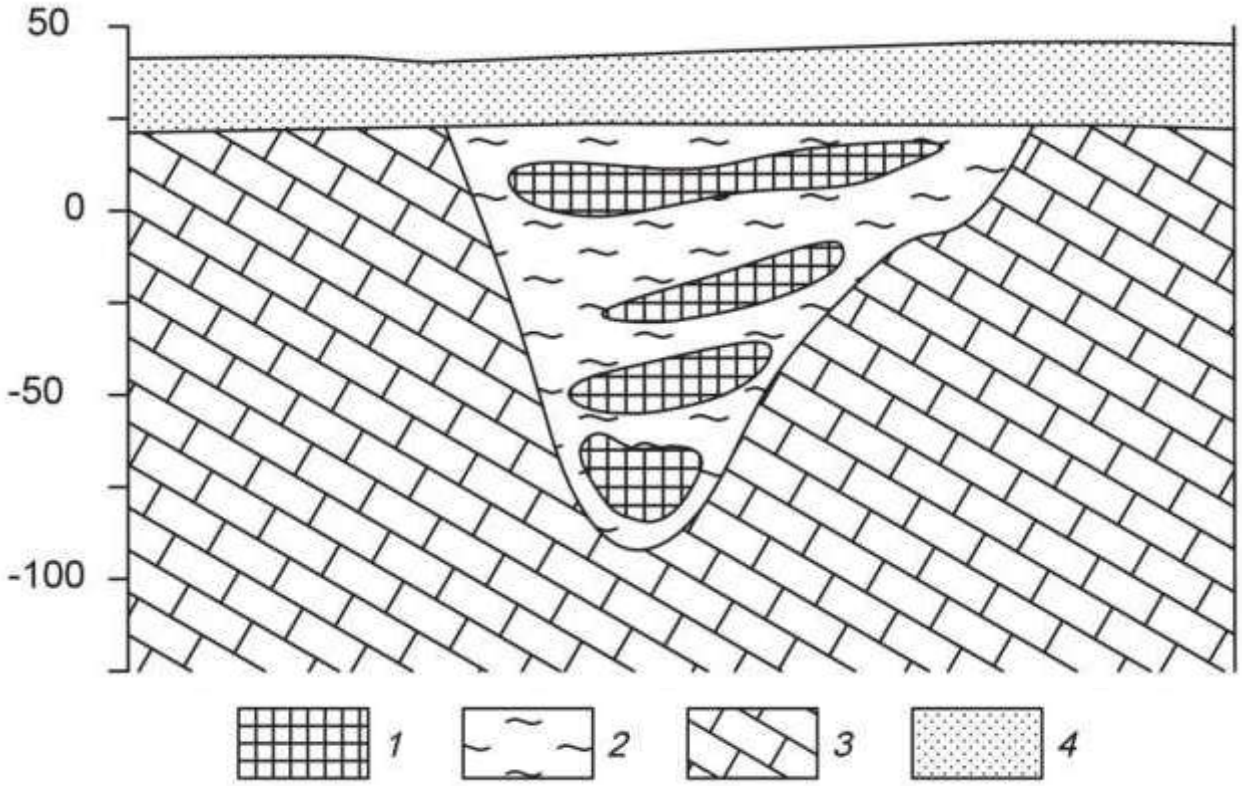
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Порфировидные гранитоиды	200	2,69	3000
2.	Диориты	3000	2,81	4000
3.	Эруптивные брекчии грано-дирорит-порфиров	350	2,45	100
4.	Суглинки	85	1,97	180

Вариант 2. **Бокситы**

Месторождение бокситов относится к карстовому типу. Тела бокситов приурочены к древним карстовым воронкам в карбонатных породах верхнего протерозоя, и состоят из нескольких разностей (см. рис.). Карстовые воронки заполнены рыхлыми и глинистыми бокситами, в которых встречаются каменистые разности. Каменистые бокситы имеют небольшие размеры и линзообразную, гнездовидную форму. Сверху залегают четвертичные перекрывающие отложения, представленные песками и супесями.

Месторождения данного типа развиты на Енисейском кряже.



Схематический геологический разрез месторождения бокситов.
1 – бокситы каменистые, *2* – глинистые бокситы, *3* – известняки, *4* – пески, супеси.

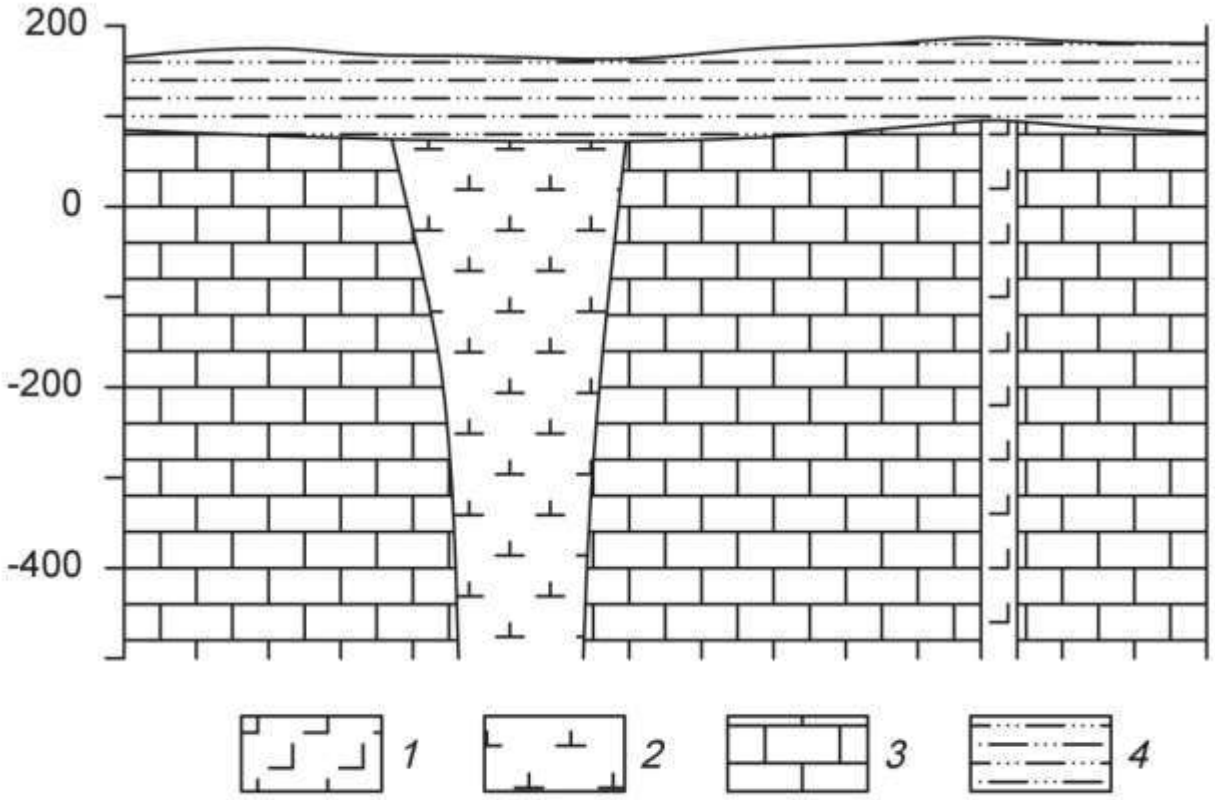
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Бокситы каменистые	200	3,1	240
2.	Бокситы глинистые	150	2,22	120
3.	Известняки	30	2,62	1000
4.	Пески, супеси	27	1,80	450

Вариант 3. **Алмазы**

Коренные месторождения алмазов связаны с кимберлитовыми трубка-ми взрыва. Кимберлитовые тела локализуются в зонах растяжения, связанных с узлами пересечения разломов. Вмещающими для кимберлитов породами являются карбонатные отложения кембрия и ордовика (см. рис.). На площади широко распространены дайки долеритов. Кимберлиты и вмещающие породы перекрыты юрскими песчано-глинистыми отложениями.

Кимберлитовое тело находится в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе на западе Якутии.



Схематический геологический разрез кимберлитовой трубки.
1 – долериты, *2* – кимберлиты, *3* – известняки, *4* – песчано-глинистые отложения.

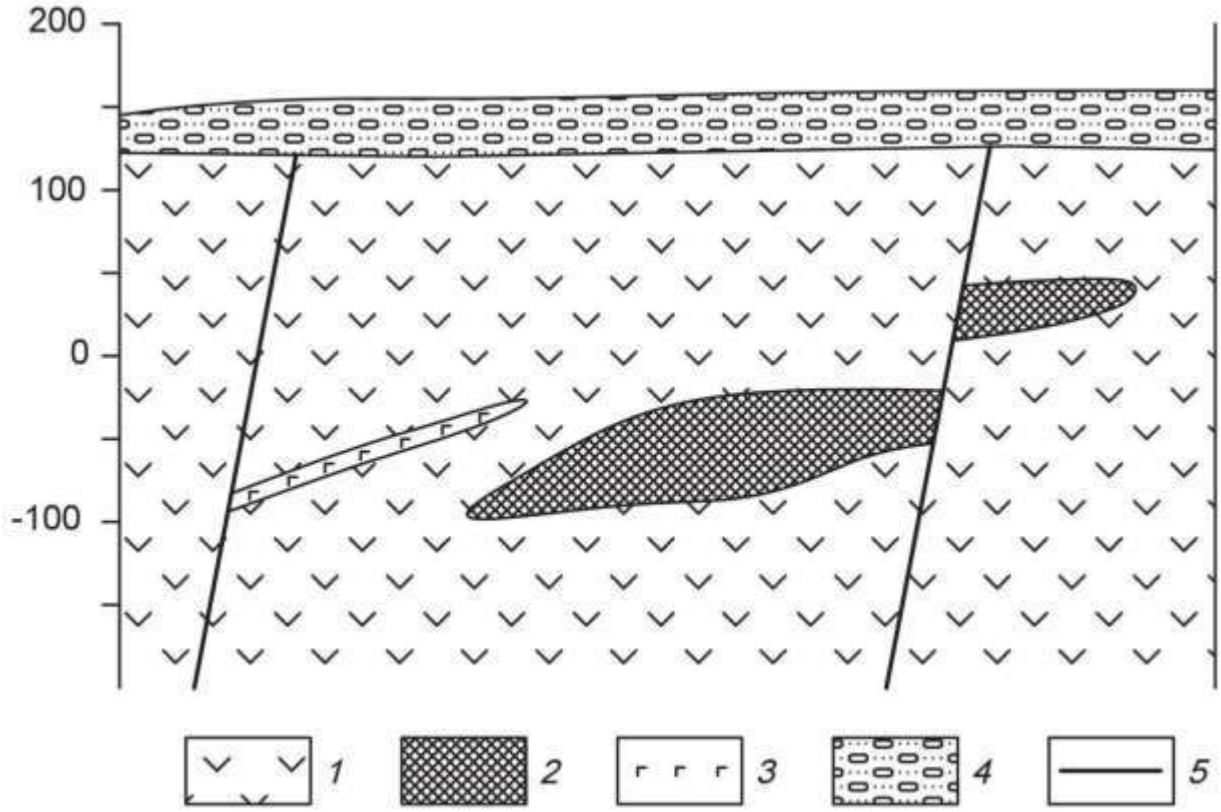
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Долериты	2800	2,95	8000
2.	Кимберлиты	90	2,40	200
3.	Известняки	20	2,60	2000
4.	Глины, суглинки	45	2,00	80

Вариант 4. **Хром**

Рудные тела сложены густовкрапленными, почти сплошными хромитами (см. рис.). Они имеют субмеридиональное простирание и пологое субгоризонтальное залегание. Тела пересекаются сбросовыми тектонически-ми нарушениями, круто падающими на юг и юго-запад под углами 70-80°. Амплитуда сбросов составляет 5 – 30 м. Непосредственно вмещающие поро-ды представлены серпентинизированные дуниты или серпентиниты, разви-тые по дунитам. Контакты рудных тел с вмещающими породами резкие. Вмещающие породы и рудные тела перекрыты мезо-кайнозойскими конгломератами.

Месторождение приурочено к Кемпирсайскому хромитоносному мас-сиву (Республика Казахстан).



Схематический геологический разрез хромитового месторождения.
1 – дуниты, *2* – хромитовые руды, *3* – габбро-диабазы, *4* – конгломераты.

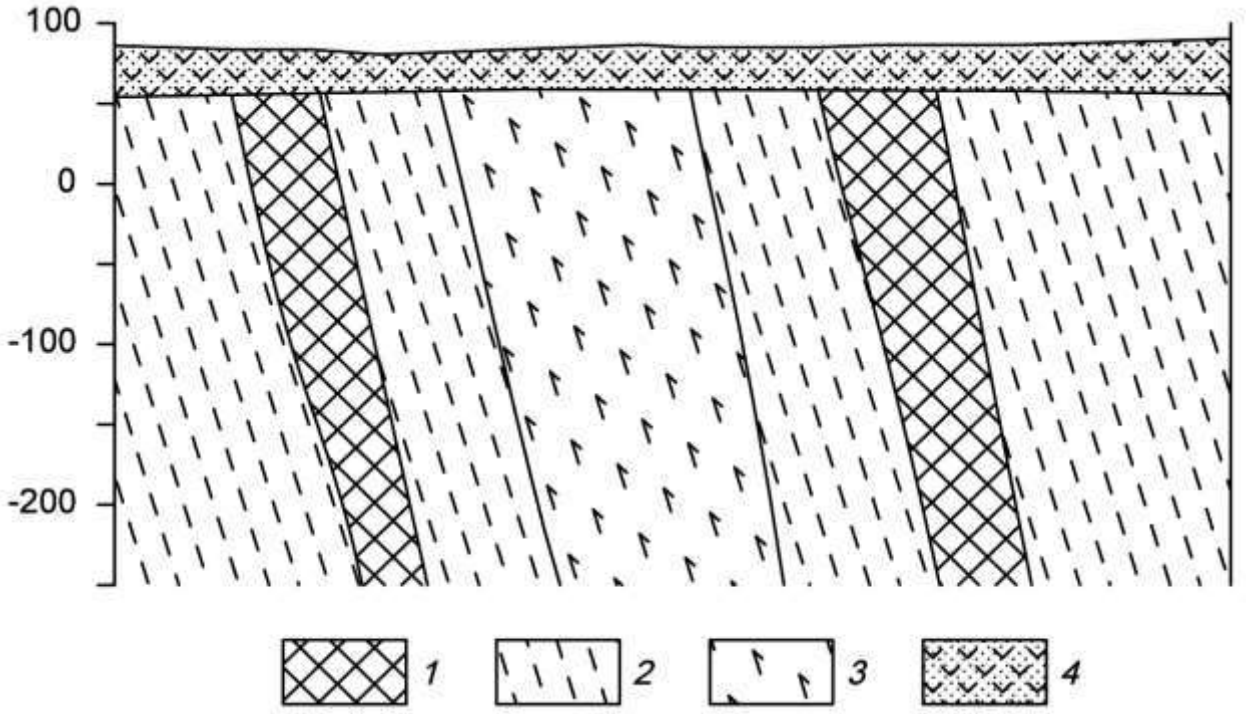
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см3	ρ, Ом·м
1.	Дуниты	900	2,96	980
2.	Хромитовые руды	270	3,80	300
3.	Габбро-диабазы	300	3,00	580
4.	Конгломераты	50	2,21	900

Вариант 5. **Железо**

Месторождение железных руд имеет моноклинальную структуру (см. рис.). Рудная зона представлена двумя параллельными вытянутыми линзообразными телами железистых кварцитов, расположенных друг от друга на небольшом расстоянии. Простирание рудных тел и вмещающей их толщи гнейсов северо-восточное. Протяженность рудных тел по простиранию достигает 2 – 2,5 км. Перекрывающие отложения представлены туфо-песчаниками.

Месторождение находится на юге Якутии.



Схематический геологический разрез железорудного месторождения.
1 – железистые кварциты, *2* – гнейсы, *3* – амфиболиты, *4* – туфопесчаники.

Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Железистые кварциты	10000	3,45	300
2.	Гнейсы	2150	2,72	1000
3.	Амфиболиты	1900	3,06	4000
4.	Туфопесчаники	900	2,15	500

Вариант 6. Медь

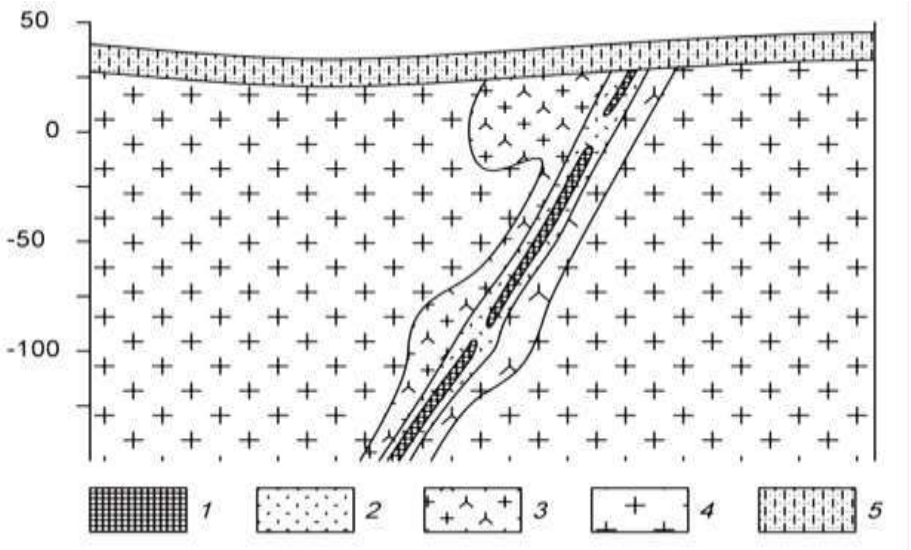
Кварц-сульфидное месторождение меди расположено в северо-западной части атиклинория, в эндоконтакте крупного батолита, сложенного гранитоидами. Основными структурными элементами месторождения являются, так называемые, рудные зоны – сложно построенные рудовмещающие трещинные структуры субмеридионального или северо-восточного простирания, секущие гранитоиды. Длина таких зон колеблется от нескольких сотен метров до первых километров.

Строение всех рудных зон однотипно. В осевой части проходит главный тектонический шов, выраженный милонитом мощностью от 5 – 10 см до 1 – 2 м. Шов состоит из ряда параллельных, часто кулисообразно расположенных трещин сложной формы.

Основные, наиболее крупные и выдержанные промышленные рудные тела располагаются вдоль главных швов рудных зон. Длина рудных тел по простиранию и падению колеблется от первых сотен метров до километра, мощность от первых до десятков метров.

Внутреннее строение рудных тел сложное. В пределах их выделяются жилы и линейные прожилково-вкрапленные зоны (см. рис.). В осевой части тел, как правило, располагаются жилы, сложенных кварц-магнетит-халькопиритовыми рудами, представляющими основную ценность. Жилы имеют четки контакты, часто ветвятся и имеют раздувы и пережимы. Линейные прожилково-вкрапленные зоны представляют собой гидротермально измененные гранитоиды, разбитые гутой сетью различно ориентированных кварц-кальцит-халькопиритовых и кварц-магнетит-халькопиритовых прожилков. В промежутках между прожилками наблюдается неравномерно распределенная вкрапленность.

Месторождение находится на юге Казахстана.



Схематический геологический разрез кварц-сульфидного медного месторождения.
1 – кварц-магнетит-халькопиритовые руды, *2* – прожилково-вкрапленные руды, *3* – гидротерамально измененные граниты, *4* – биотитовые граниты, 5 – известковистые песчаники.

Петрофизические свойства

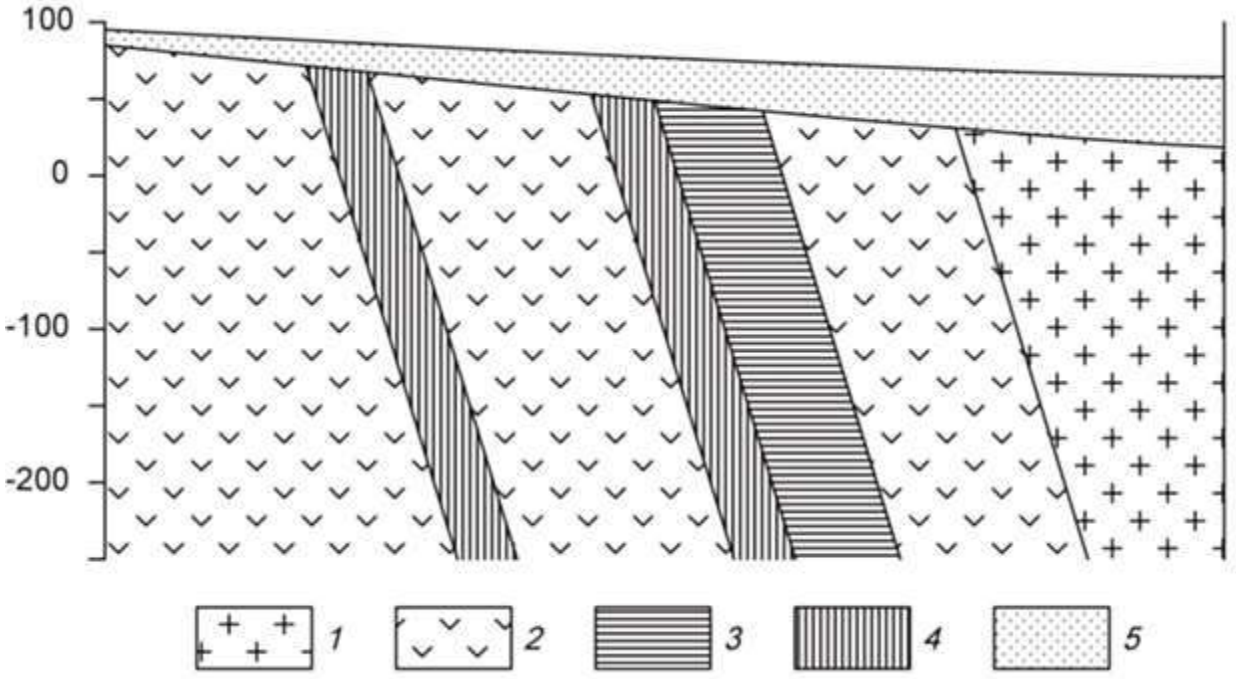
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Кварц-магнетит-халькопиритовые руды	1300	2,68	1000
2.	Прожилково-вкрапленные руды	500	2,60	1300
3.	Гидротерамально измененные граниты	400	2,55	2300
4.	Биотитовые граниты	370	2,59	2500
5.	Известковистые песчаники	50	2,53	1300

Вариант 7. **Титан**

Месторождение титана магматического типа приурочено к массиву габбро северо-восточного простирания. Согласно с полосчатостью габбро залегают ильменитовые и титано-магнетитовые руды (см. рис.). Преобладают вкрапленные руды, для которых характерна сидеронитовая структура. Внутри зон вкрапленных руд встречаются линзочки сплошных. Границы рудных тел не четкие, переходы от рудных участков к безрудным – постепенные. Рудные тела и вмещающие породы перекрыты элювиальными отложениями песчано-глинистого состава.

Титаномагнетит в сплошных и вкрапленных рудах обогащен титаном (до 13,4 % TiO_2), также в нем встречаются пластинчатые включения ильменита. В сплошных рудах в основном присутствует титаномагнетит, а количество зерен ильменита не превышает 3-5%.

Месторождение расположено на Южном Урале.



Схематический геологический разрез месторождения титана.
1 – граниты, *2* – габбро мезо- и меланократовое, *3* – вкрапленные ильменитовые руды, *4* – вкрапленные титаномагнетитовые руды, 5 – элювиальные отложения.

Петрофизические свойства

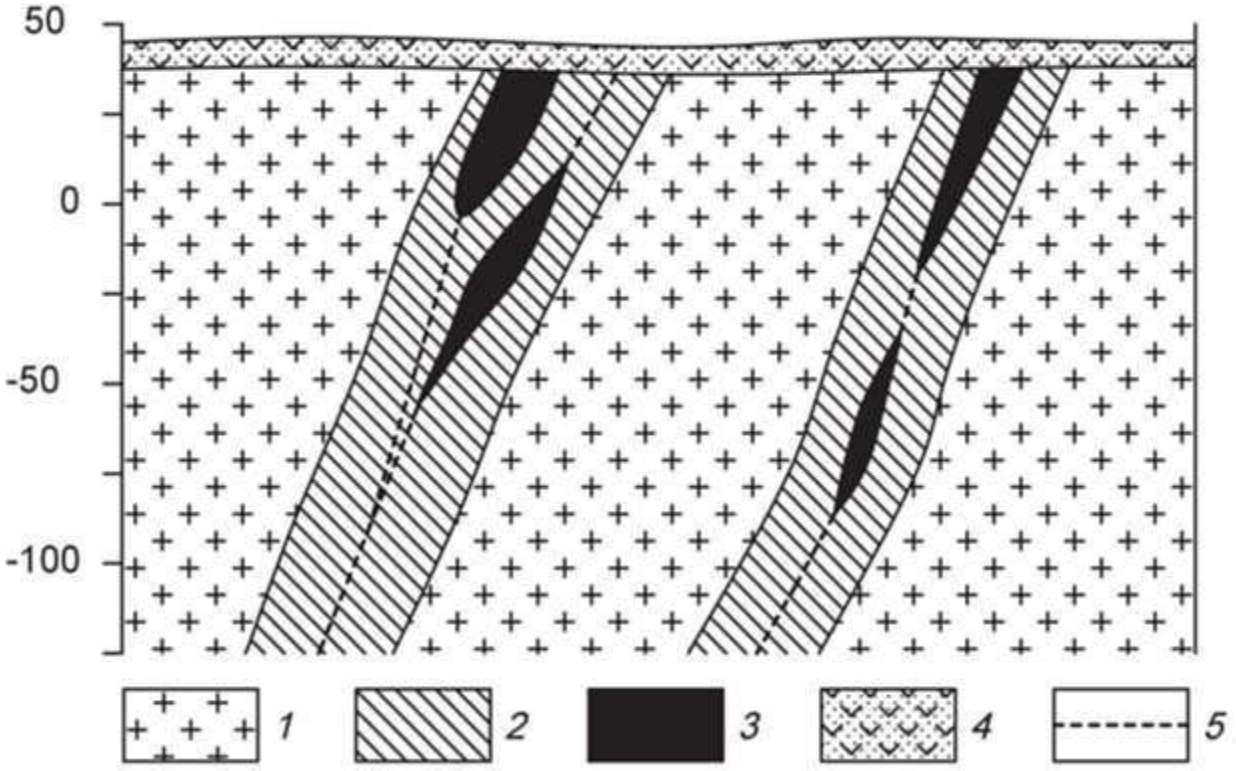
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Граниты	370	2,58	3000
2.	Габбро	1800	2,95	5000
3.	Вкрапленные ильменитовые руды	1900	3,51	2000
4.	Вкрапленные титаномагнетитовые руды	2400	3,45	1500
5.	Элювиальные отложения	120	2,00	800

Вариант 8. **Вольфрам**

Скарновое месторождение вольфрама приурочено к зонам альбитиза-ции в гранодиоритах. Рудные тела представляют собой зоны метасоматически преобразованных силикатных пород (см. рис.). Альбитизация либо наложена на более ранние скарны, либо образует самостоятельные зоны. Рудные тела приурочены к системам крутопадающих минерализованных трещин, среди которых выделяется основной разлом и оперяющие нарушения.

Полезным компонентом в метасоматически преобразованных породах является шеелит. Шеелит образует неравномерную вкрапленность, прожилки и гнезда.

Месторождение находится в Таджикистане.



Схематический геологический разрез месторождения вольфрама.
1 – гранодиориты, *2* – зона интенсивной альбитизации, *3* – рудные тела, *4* – перекрывающие вулканогенно-осадочные толщи, 5 – тектонические нарушения.

Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Гранодиориты	300	2,71	4000
2.	Скарноиды альбитизированные	270	2,65	3500
3.	Рудные тела	320	2,74	1500
4.	Вулканогенно-осадочные породы	320	2,35	1000

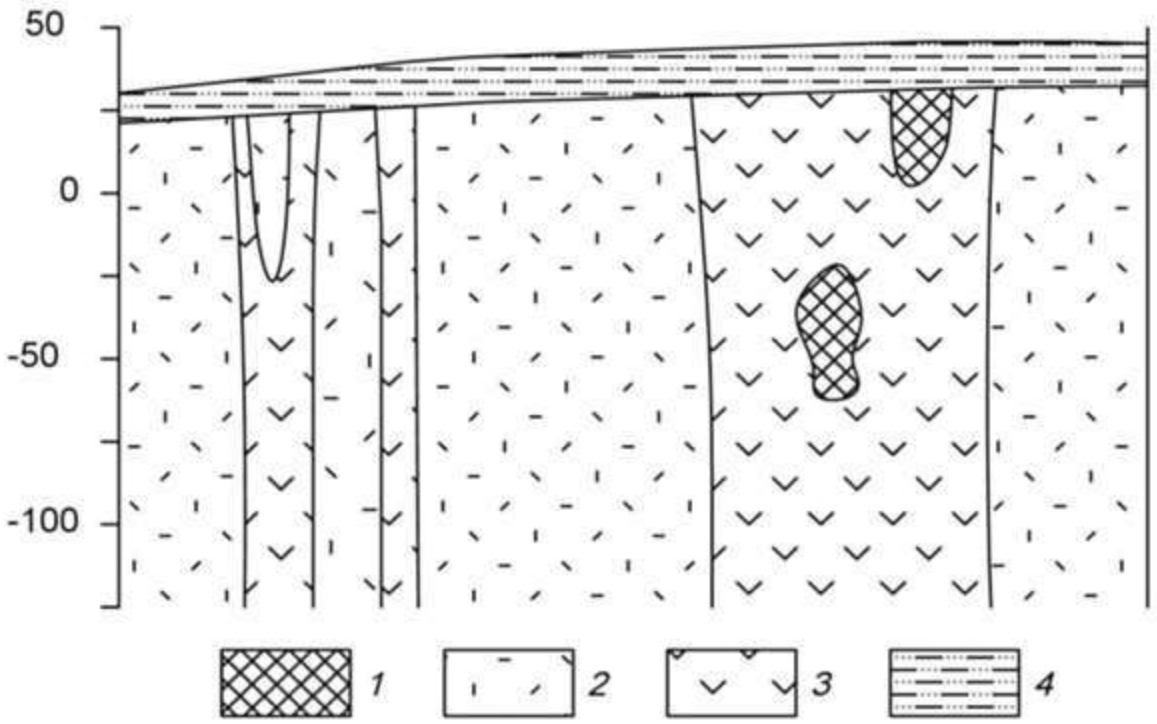
Вариант 9. **Хром**

Ультраосновной массив сложен разностями перидотитов, он вытянут в широтном направлении и имеет протяженность около 3 км. Массив сложен в главной массе гарцбургитами, среди которых обособляются неправильные линзообразные тела дунитов, вытянутые согласно простиранию массива. Каких либо закономерностей в размещении дунитовых обособлений среди гарцбургитов не устанавливается. Все ультраосновные породы массива в разной степени затронуты серпентинизацией (см. рис.).

Все хромитовые тела приурочены к обособлениям дунитов и, как правило, залегают согласно с ними. Рудные тела в основном субширотного про-стирания, обладают крутым северными или южным падением. Рудные тела имеют форму линз и гнезд.

Взаимоотношения рудных тел с смещающими дунитами различны. Известны постепенные переходы вкрапленных хромитовых руд к вмещающим дунитам, также рудные тела часто обладают резкими границами.

Месторождение находится в Армении.



Схематический геологический разрез хромитового месторождения.
1 – хромитовые руды, *2* – перидотиты, *3* – дуниты, *4* – песчано-глинистые отложения.

Петрофизические свойства

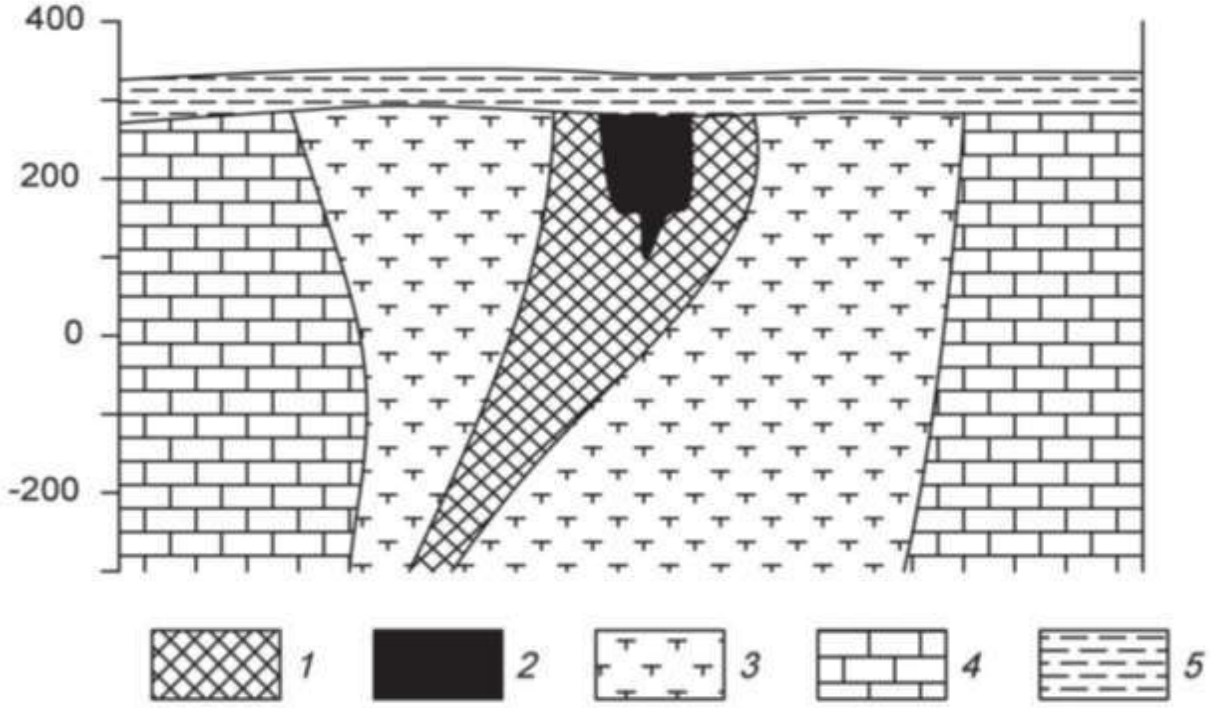
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см3	ρ, Ом·м
1.	Хромитовые руды	1050	4,11	1100
2.	Перидотиты	1500	3,22	2800
3.	Дуниты	1100	2,96	3400
4.	Суглинки, супеси	120	2,22	300

Вариант 10. **Железо**

Железорудное месторождение гидротермального типа локализовано в карбонатных породах нижнего кембрия, слагающих чехол платформы. Рудоносная трубкообразная структура сложена эксплозивными брекчиями (см. рис.). Эксплозивные брекчии превращены в метасоматиты различного состава. Среди метасоматитов преобладают хлорит-серпентин-кальцитовые и кальцитовые, реже встречаются скарноподобные метасоматиты гранатового и пироксенового состава.

Среди промышленных типов руд брекчеевидные, вкрапленные и массивные магнетитовые руды, в коре выветривания – глинистые и сыпучие марит-магнетитовые и гематит-гидрогётитовые.

Месторождение находится в Красноярском крае.



Схематический геологический разрез железорудного месторождения.
1 – магнетитовые руды с содержанием железа 20-50%, *2* – магнетитовые руды с содержанием железа более 50%, *3* – частично метасоматически измененные эксплозивные брекчии или метасоматиты, *4* – известняки, *5* – глинистые перекрывающие отложения.

Петрофизические свойства

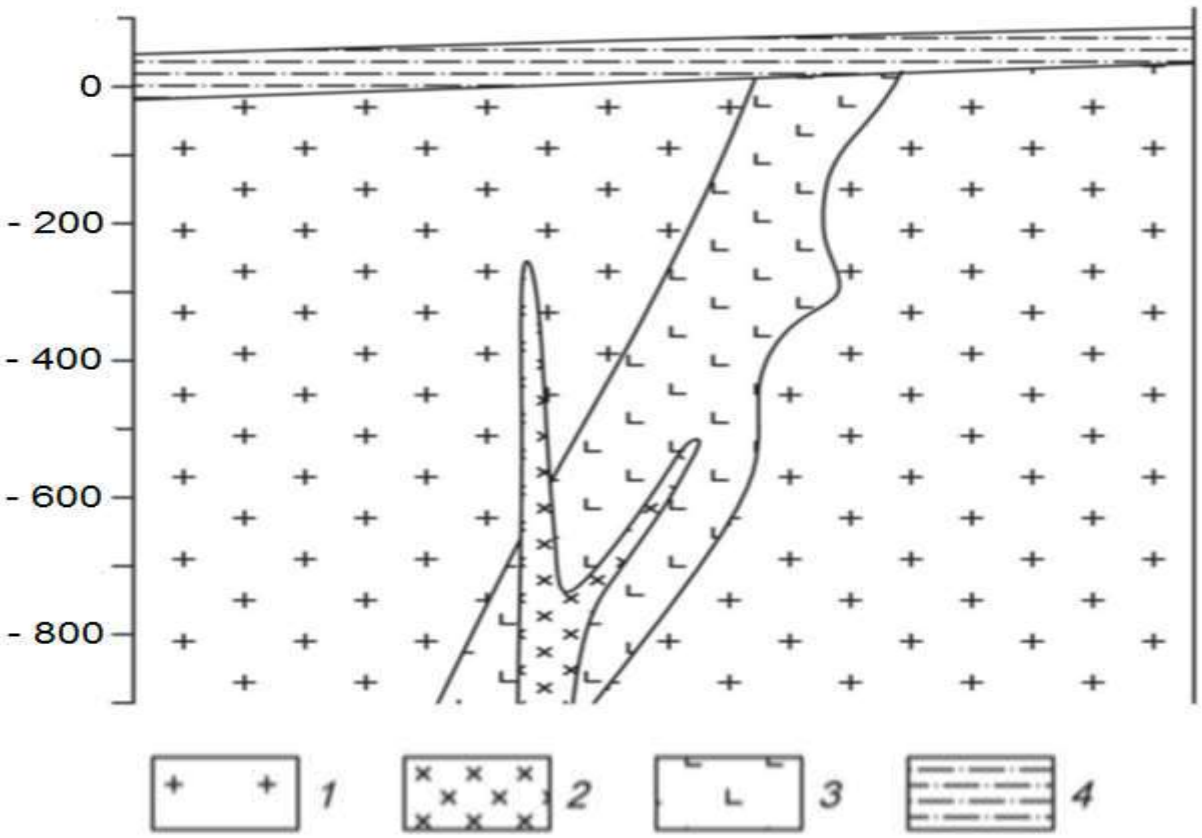
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед. СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Магнетитовые руды с содержанием железа 20-50%	8000	2,74	500
2.	Магнетитовые руды с содержанием железа более 50%	11000	2,91	300
3.	Метасоматически измененные эксплозивные брекчии или метасоматиты	340	2,51	1000
4.	Известняки	170	2,63	2300
5.	Глины	250	2,02	120

Вариант 11. **Золото**

Месторождение Вишневое приурочено к интрузивным образованиям раннего протерозоя, являющимся вмещающими породами для эксплозивных структур, выполненных жерловыми и субвулканическими фациями раннетриасового возраста (см. рис.).

Распределение полезных компонентов в ней имеет неравномерный, столбообразный, линзообразный и гнездовый характер, с наличием раздувов, пережимов и прослоев слабо золотоносных пород в контуре кондиционных руд. Наиболее богатые руды тяготеют к осевой части зоны метасоматитов, где они концентрируются в виде согласных полос. Четких геологических границ обогащенные участки не имеют и выделяются только по данным опробования.

Месторождение расположено в Западной Сибири.



Схематический геологический разрез золоторудного месторождения Красное.
1 – раннепротерозойский среднезернистые порфировидные грани-тоиды, *2* – позднеюрские дайки диоритов, *3* – раннетриасовые гидротермально измененные эруптивные брекчии гранодиорит-порфиров, *4* – четвертич-ные отложения, представленные суглинками.

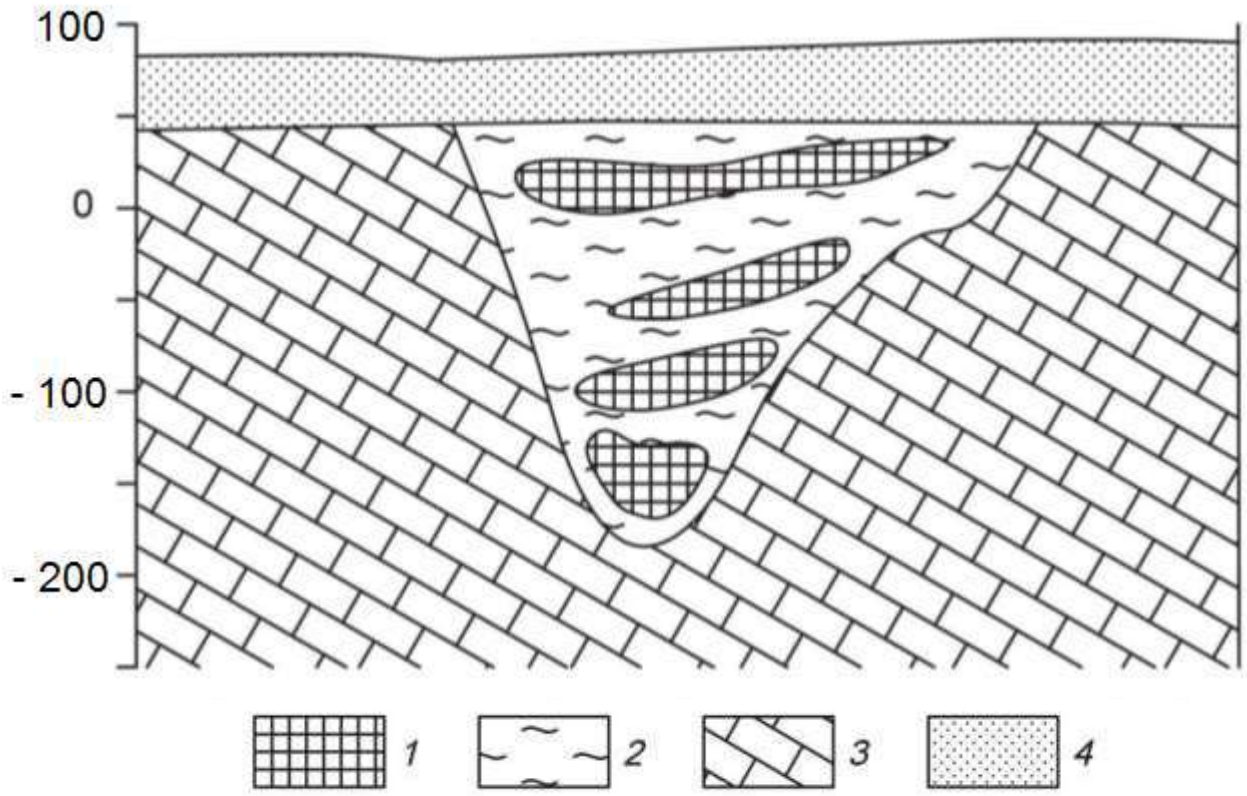
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Порфировидные гранитоиды	150	2,68	2200
2.	Диориты	2500	2,75	5000
3.	Эруптивные брекчии грано-дирорит-порфиров	480	2,57	1500
4.	Суглинки	70	1,95	200

Вариант 12. **Бокситы**

Месторождение бокситов относится к карстовому типу. Тела бокситов приурочены к древним карстовым воронкам в карбонатных породах верхнего протерозоя, и состоят из нескольких разностей (см. рис.). Карстовые воронки заполнены рыхлыми и глинистыми бокситами, в которых встречаются каменистые разности. Каменистые бокситы имеют небольшие размеры и линзообразную, гнездовидную форму. Сверху залегают четвертичные перекрывающие отложения, представленные песками и супесями.

Месторождения данного типа развиты на Енисейском кряже.



Схематический геологический разрез месторождения бокситов.
1 – бокситы каменистые, *2* – глинистые бокситы, *3* – известняки, *4* – пески, супеси.

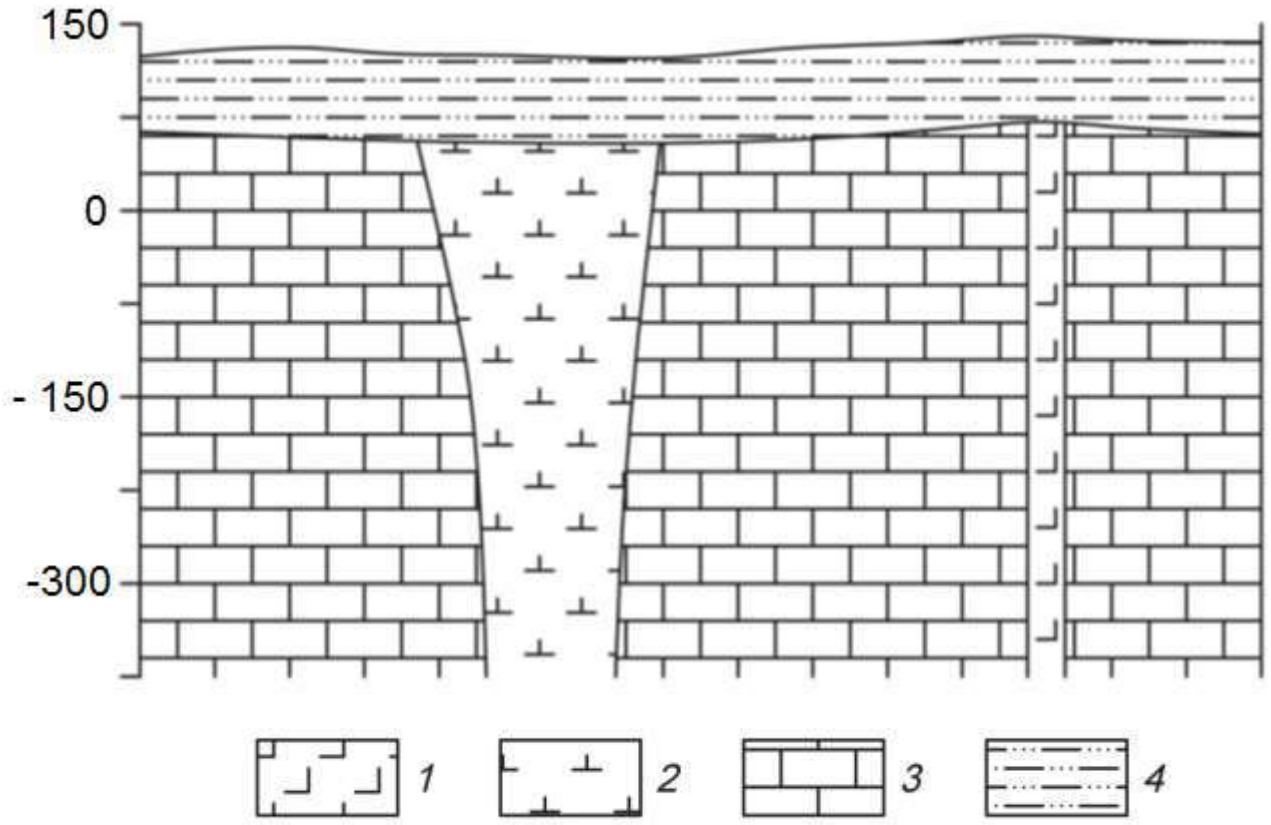
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Бокситы каменистые	300	3,0	280
2.	Бокситы глинистые	189	2,27	290
3.	Известняки	400	2,68	2000
4.	Пески, супеси	100	1,81	500

Вариант 13. **Алмазы**

Коренные месторождения алмазов связаны с кимберлитовыми трубка-ми взрыва. Кимберлитовые тела локализуются в зонах растяжения, связанными с узлами пересечения разломов. Вмещающими для кимберлитов поро-дами являются карбонатные отложения кембрия и ордовика (см. рис.). На площади широко распространены дайки долеритов. Кимберлиты и вмещающие породы перекрыты юрскими песчано-глинистыми отложениями.

Кимберлитовое тело находится в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе на западе Якутии.



Схематический геологический разрез кимберлитовой трубки.
1 – долериты, *2* – кимберлиты, *3* – известняки, *4* – песчано-глинистые отложения.

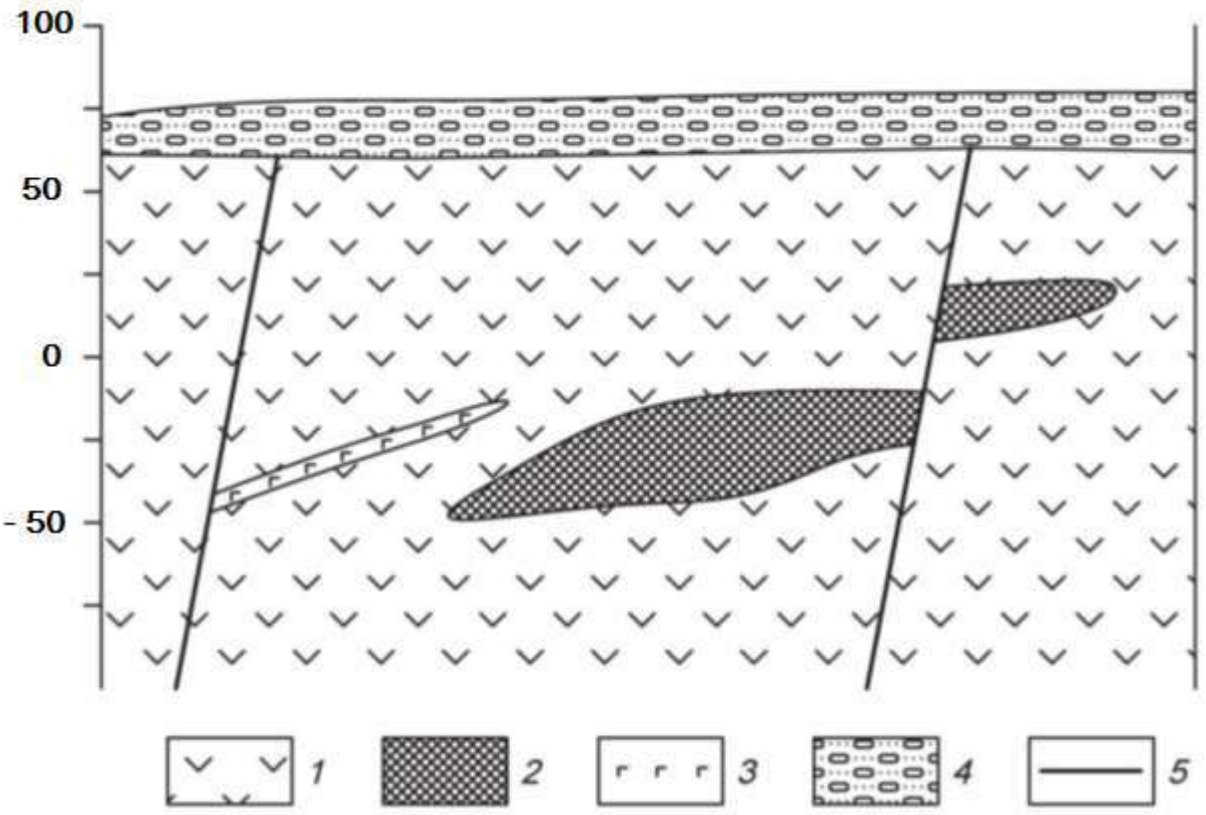
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Долериты	2500	2,92	16000
2.	Кимберлиты	300	2,35	120
3.	Известняки	20	2,68	900
4.	Глины, суглинки	30	2,09	150

Вариант 14. **Хром**

Рудные тела сложены густовкрапленными, почти сплошными хроми-тами (см. рис.). Они имеют субмеридиональное простирание и пологое субгоризонтальное залегание. Тела пересекаются сбросовыми тектонически-ми нарушениями, круто падающими на юг и юго-запад под углами 70-80°. Непосредственно вмещающие породы представлены серпентинизированные дуниты или серпентиниты, развитые по дунитам. Контакты рудных тел со вмещающими породами резкие. Вмещающие породы и рудные тела перекрыты мезо-кайнозойскими конгломератами.

Месторождение приурочено к Кемпирсайскому хромитоносному мас-сиву (Республика Казахстан).



Схематический геологический разрез хромитового месторождения.
1 – дуниты, *2* – хромитовые руды, *3* – габбро-диабазы, *4* – конгломераты.

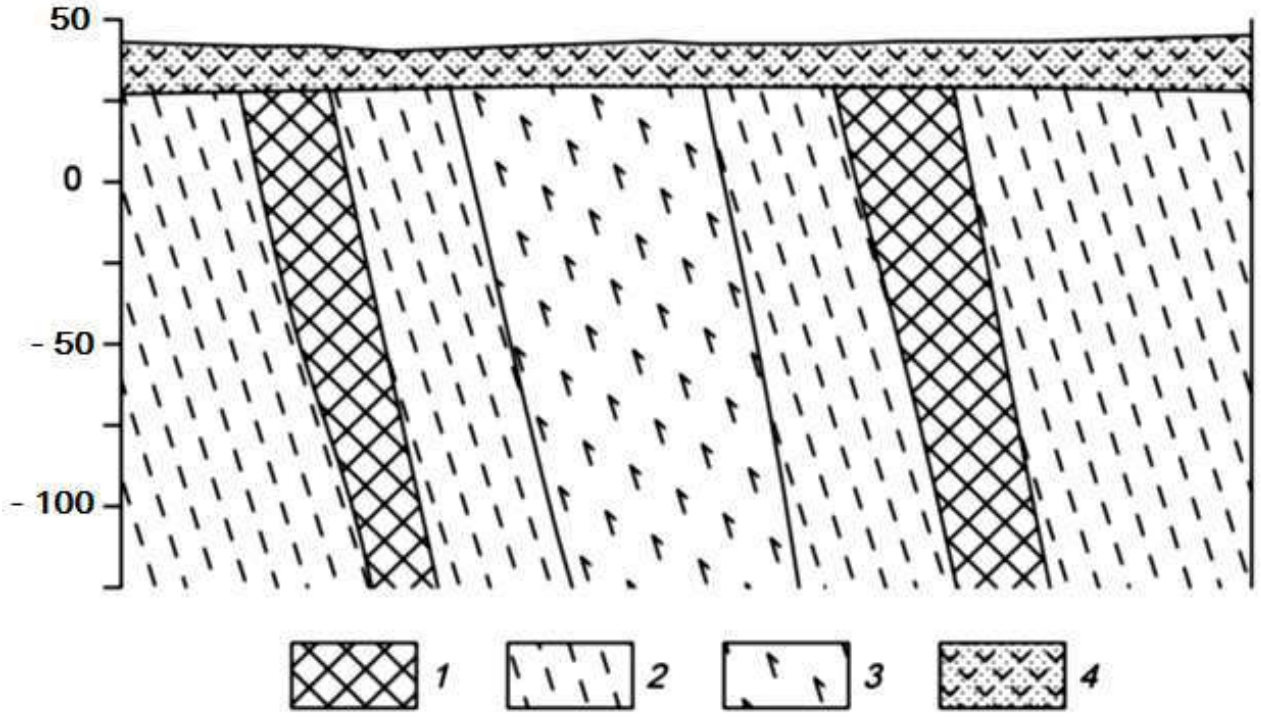
Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см3	ρ, Ом·м
1.	Дуниты	700	3,04	1000
2.	Хромитовые руды	140	3,90	200
3.	Габбро-диабазы	800	2,94	1000
4.	Конгломераты	90	2,03	1000

Вариант 15. **Железо**

Месторождение железных руд имеет моноклинальную структуру (см. рис.). Рудная зона представлена двумя параллельными вытянутыми линзообразными телами железистых кварцитов, расположенных друг от друга на небольшом расстоянии. Простирание рудных тел и вмещающей их толщи гнейсов северо-восточное. Протяженность рудных тел по простиранию достигает 2 – 2,5 км. Перекрывающие отложения представлены туфо-песчаниками.

Месторождение находится на юге Якутии.



Схематический геологический разрез железорудного месторождения.
1 – железистые кварциты, *2* – гнейсы, *3* – амфиболиты, *4* – туфопесчаники.

Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Железистые кварциты	9000	3,84	500
2.	Гнейсы	1600	2,68	1500
3.	Амфиболиты	1500	2,88	2000
4.	Туфопесчаники	450	2,10	200

Вариант 16. **Медь**

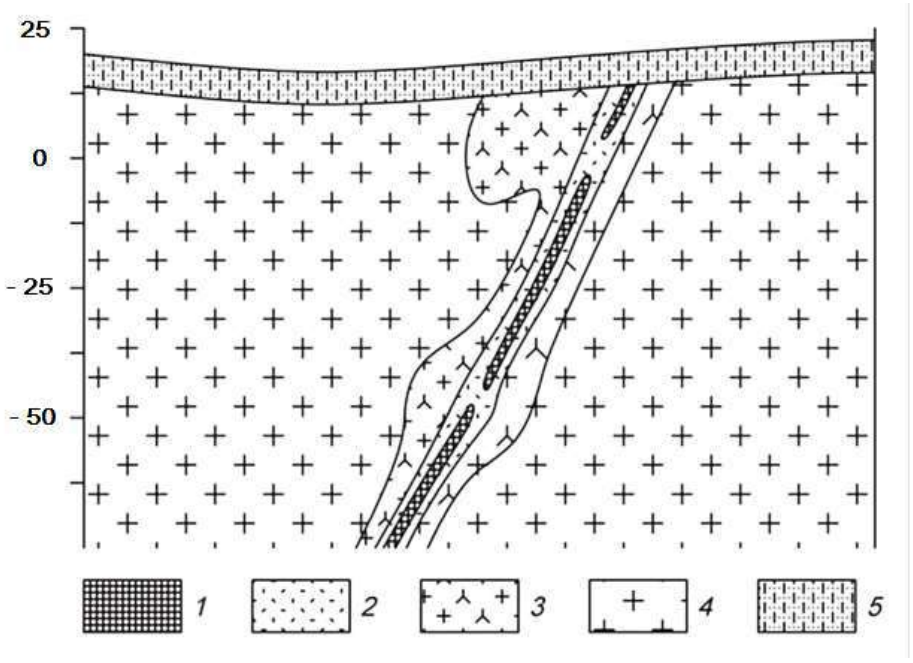
Кварц-сульфидное месторождение меди расположено в северо-западной части антиклинория, в эндоконтакте крупного батолита, сложенного гранитоидами. Основными структурными элементами месторождения являются, так называемые, рудные зоны – сложно построенные рудовмещающие трещинные структуры субмеридионального или северо-восточного простирания, секущие гранитоиды. Длина таких зон колеблется от нескольких сотен метров до первых километров.

Строение всех рудных зон однотипно. В осевой части проходит глав-ной тектонический шов, выраженный милонитом мощностью от 5 – 10 см, до 1 – 2 м. Шов состоит из ряда параллельных, часто кулисообразно расположенных трещин сложной формы.

Основные, наиболее крупные и выдержанные промышленные рудные тела располагаются вдоль главных швов рудных зон. Длина рудных тел по простиранию и падению колеблется от первых сотен метров до километра, мощность от первых до десятков метров.

Внутреннее строение рудных тел сложное. В пределах их выделяются жилы и линейные прожилково-вкрапленные зоны (см. рис.). В осевой части тел, как правило, располагаются жилы, сложенных кварц-магнетит-халькопиритовыми рудами, представляющими основную ценность. Жилы имеют четки контакты, часто ветвятся и имеют раздувы и пережимы. Линейные прожилково-вкрапленные зоны представляют собой гидротермально измененные гранитоиды, разбитые гутой сетью различно ориентированных кварц-кальцит-халькопиритовых и кварц-магнетит-халькопиритовых прожилков. В промежутках между прожилками наблюдается неравномерно распределенная вкрапленность.

Месторождение находится на юге Казахстана.



Схематический геологический разрез кварц-сульфидного медного месторождения.
1 – кварц-магнетит-халькопиритовые руды, *2* – прожилково-вкрапленные руды, *3* – гидротерамально измененные граниты, *4* – биотито-вые граниты, 5 – известковистые песчаники.

Петрофизические свойства

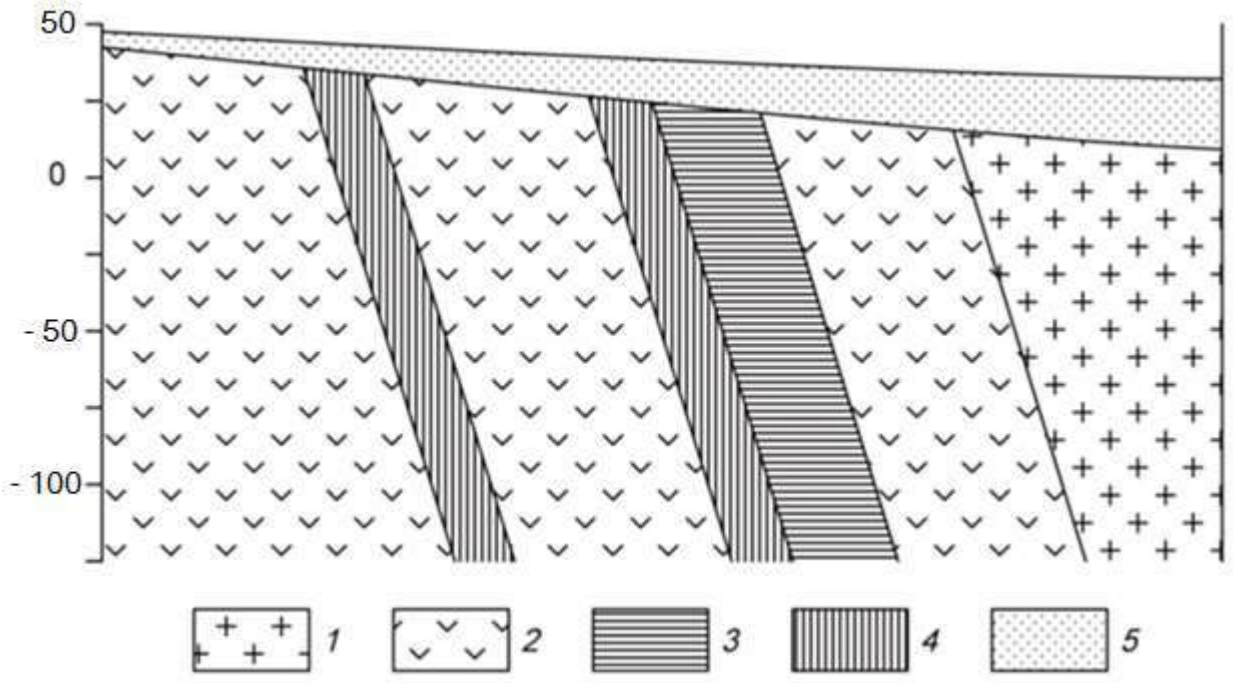
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Кварц-магнетит-халькопиритовые руды	1870	2,71	1100
2.	Прожилково-вкрапленные руды	1000	2,61	1300
3.	Гидротерамально измененные граниты	700	2,62	2500
4.	Биотитовые граниты	890	2,57	2800
5.	Известковистые песчаники	70	2,48	1000

Вариант 17. **Титан**

Месторождение титана магматического типа приурочено к массиву габбро северо-восточного простирания. Согласно с полосчатостью габбро залегают ильменитовые и титано-магнетитовые руды (см. рис.). Преобладают вкрапленные руды, для которых характерна сидеронитовая структура. Внутри зон вкрапленных руд встречаются линзочки сплошных. Границы рудных тел не четкие, переходы от рудных участков к безрудным – постепенные. Рудные тела и вмещающие породы перекрыты элювиальными отложениями песчано-глинистого состава.

Титаномагнетит в сплошных и вкрапленных рудах обогащен титаном (до 13,4 % TiO_2), также в нем встречаются пластинчатые включения ильменита. В сплошных рудах в основном присутствует титаномагнетит, а количество зерен ильменита не превышает 3-5%.

Месторождение расположено на Южном Урале.



Схематический геологический разрез месторождения титана.
1 – граниты, *2* – габбро мезо- и меланократовое, *3* – вкрапленные ильменитовые руды, *4* – вкрапленные титаномагнетитовые руды, 5 – элювиальные отложения.

Петрофизические свойства

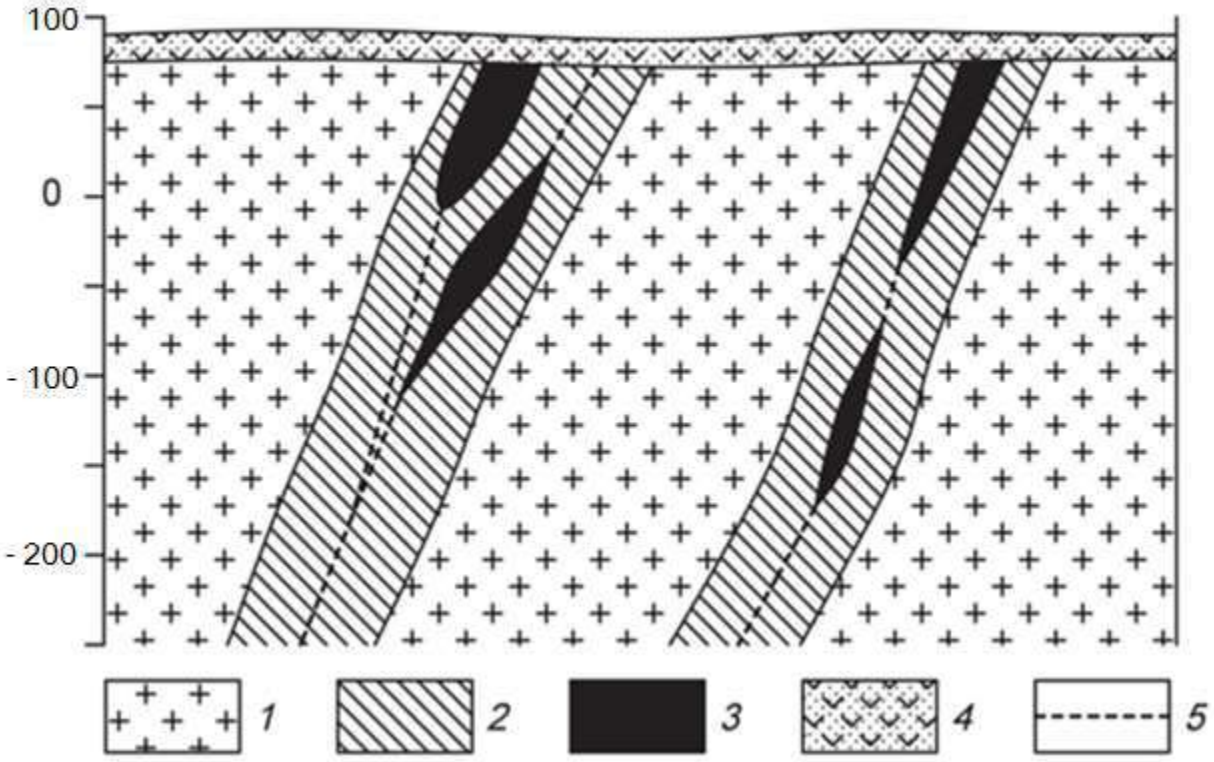
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Граниты	250	2,55	4000
2.	Габбро	1300	2,93	6000
3.	Вкрапленные ильменитовые руды	1500	3,60	2500
4.	Вкрапленные титаномагнетитовые руды	2500	3,37	1900
5.	Элювиальные отложения	200	1,93	1000

Вариант 18. **Вольфрам**

Скарновое месторождение вольфрама приурочено к зонам альбитиза-ции в гранодиоритах. Рудные тела представляют собой зоны метасоматически преобразованных силикатных пород (см. рис.). Альбитизация либо наложена на более ранние скарны, либо образует самостоятельные зоны. Рудные тела приурочены к системам крутопадающих минерализованных трещин, среди которых выделяется основной разлом и оперяющие нарушения.

Полезным компонентом в метасоматически преобразованных породах является шеелит. Шеелит образует неравномерную вкрапленность, прожилки и гнезда.

Месторождение находится в Таджикистане.



Схематический геологический разрез месторождения вольфрама.
1 – гранодиориты, *2* – зона интенсивной альбитизации, *3* – рудные тела, *4* – перекрывающие вулканогенно-осадочные толщи, 5 – тектонические нарушения.

Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед.СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Гранодиориты	300	2,68	3000
2.	Скарноиды альбитизированные	270	2,58	3200
3.	Рудные тела	310	2,92	1200
4.	Вулканогенно-осадочные породы	340	2,29	900

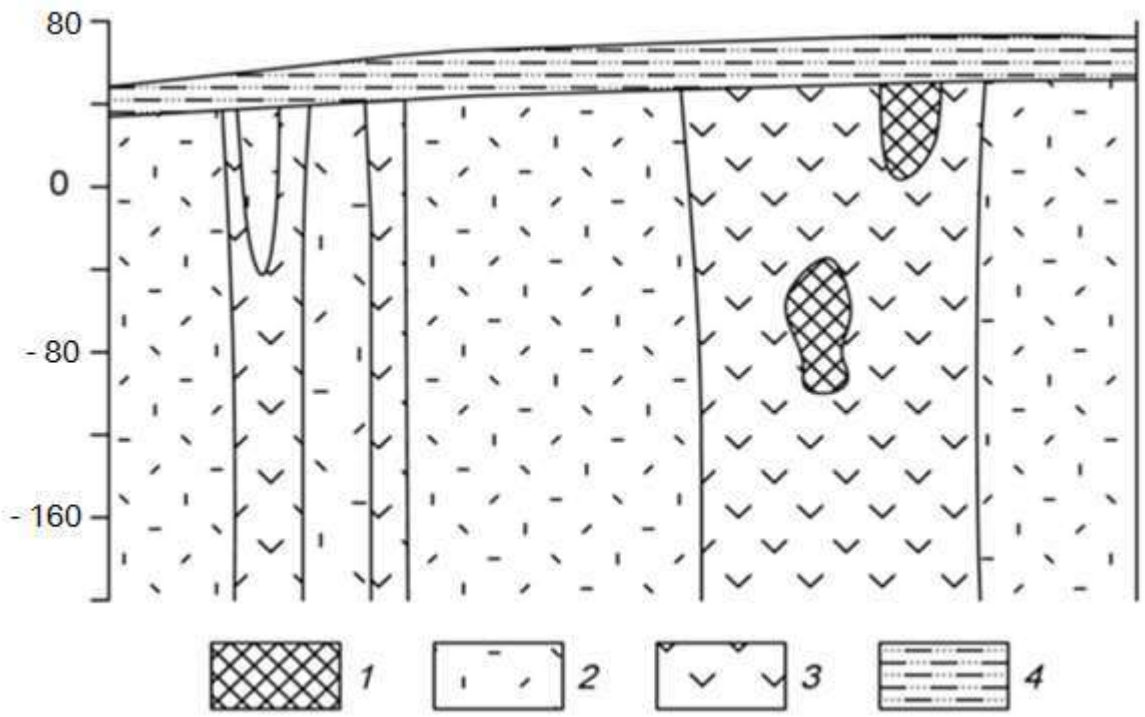
Вариант 19. Хром

Ультраосновной массив сложен разностями перидотитов, он вытянут в широтном направлении и имеет протяженность около 3 км. Массив сложен в главной массе гарцбургитами, среди которых обособляются неправильные линзообразные тела дунитов, вытянутые согласно простиранию массива. Каких либо закономерностей в размещении дунитовых обособлений среди гарцбургитов не устанавливается. Все ультраосновные породы массива в разной степени затронуты серпентинизацией (см. рис.).

Все хромитовые тела приурочены к обособлениям дунитов и, как правило, залегают согласно с ними. Рудные тела в основном субширотного про-стирания, обладают крутым северными или южным падением. Рудные тела имеют форму линз и гнезд.

Взаимоотношения рудных тел с смещающими дунитами различны. Известны постепенные переходы вкрапленных хромитовых руд к вмещающим дунитам, также рудные тела часто обладают резкими границами.

Месторождение находится в Армении.



Схематический геологический разрез хромитового месторождения.
1 – хромитовые руды, *2* – перидотиты, *3* – дуниты, *4* – песчано-глинистые отложения.

Петрофизические свойства

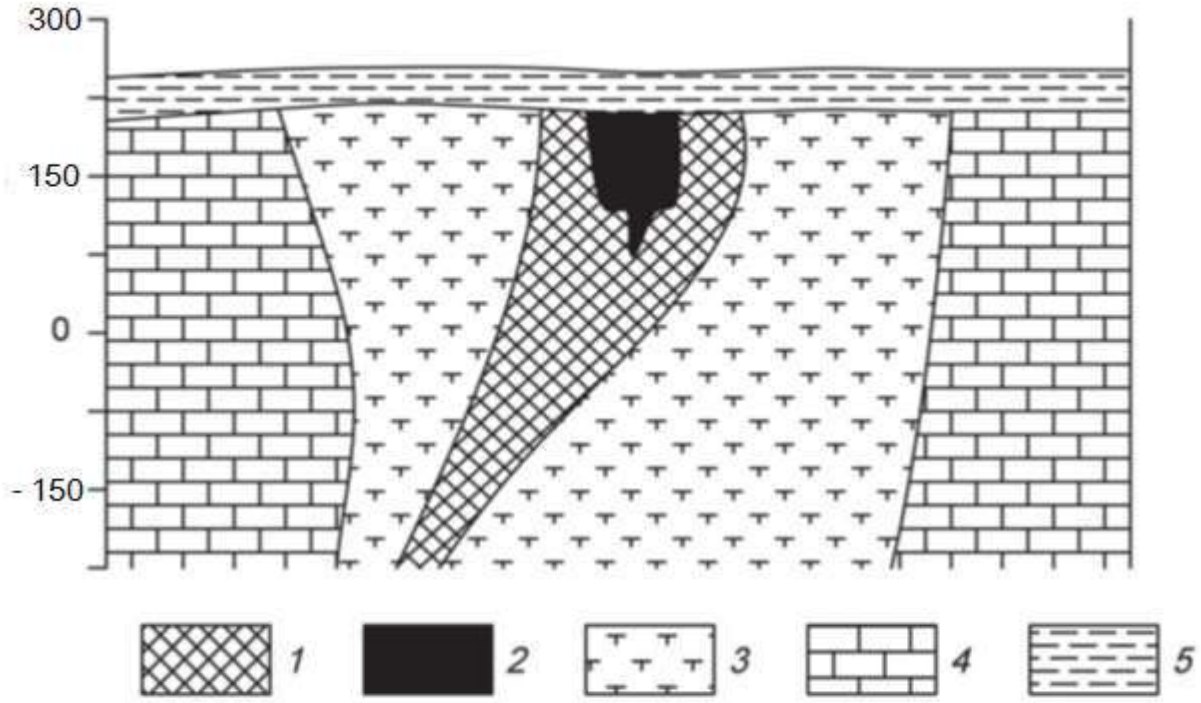
№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед. СИ	σ, г/см^3	ρ, Ом·м
1.	Хромитовые руды	1300	4,30	900
2.	Перидотиты	2100	3,27	3200
3.	Дуниты	1200	2,84	3000
4.	Суглинки, супеси	200	2,15	280

Вариант 20. **Железо**

Железорудное месторождение гидротермального типа локализовано в карбонатных породах нижнего кембрия, слагающих чехол платформы. Рудоносная трубкообразная структура сложена эксплозивными брекчиями (см. рис.). Эксплозивные брекчии превращены в метасоматиты различного соста-ва. Среди метасоматитов преобладают хлорит-серпентин-кальцитовые и кальцитовые, реже встречаются скарноподобные метасоматиты гранатового и пироксенового состава.

Среди промышленных типов руд брекчеевидные, вкрапленные и мас-сивные магнетитовые руды, в коре выветривания – глинистые и сыпучие ма-рит-магнетитовые и гематит-гидрогётитовые.

Месторождение находится в Красноярском крае.



Схематический геологический разрез железорудного месторождения.
1 – магнетитовые руды с содержанием железа 20-50%, *2* – магнетитовые руды с содержанием железа более 50%, *3* – частично метасоматически измененные эксплозивные брекчии или метасоматиты, *4* – известняки, *5* – глинистые перекрывающие отложения.

Петрофизические свойства

№ п/п	Разности пород	æ, $\times 10^{-5}$ ед. СИ	σ, г/см3	ρ, Ом·м
1.	Магнетитовые руды с содержанием железа 20-50%	6500	2,78	400
2.	Магнетитовые руды с содержанием железа более 50%	12000	3,05	200
3.	Метасоматически измененные эксплозивные брекчии или метасоматиты	210	2,64	900
4.	Известняки	120	2,71	2000
5.	Глины	270	1,98	180

5. Список рекомендованной литературы

Основная литература:

№ п/п	Наименование	Кол-во экз. в библиотеке
1.	*Соколов А.Г.* Полевая геофизика: учебное пособие / А.Г. Соколов, О.В. Попова, Т.М. Кечина. — Электрон. текстовые данные. — Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2015. — 160 с. — 978-5-7410-1182-9. — Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/33649.html	Электронный ресурс
2.	*Хмелевской В.К.* Основы геофизических методов: учебник для вузов / В.К. Хмелевской, В.И. Костицын; Перм. ун-т. – Пермь, 2010. – 400 с.: ил. SBN 978-5-7944-1428-8. — Режим доступа: http://www.psu.ru/nauka/elektronnye-publikatsii/uchebnye-posobiya-i-metodicheskie-materialy/v-k-khmelevskoj-v-i-kostitsyn-osnovy-geofizicheskikh-metodov	Электронный ресурс
3.	*Соколенко Е.В.* Общий курс полевой геофизики. Часть 1: лабораторный практикум / Е.В. Соколенко, А.-Г.Г. Керимов. — Электрон. текстовые данные. — Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. — 107 с. — 2227-8397. — Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/63108.html	Электронный ресурс

Дополнительная литература:

№ п/п	Наименование	Кол-во экз. в библиотеке
1.	Полевая геофизика: учебник для вузов / *Ю. Н. Воскресенский*; РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. - Москва: Недра, 2010. - 479 с.	10
2.	Геофизика: учебник / В. А. Богословский [и др.]; ред. *В. К. Хмелевской.* - Москва: КДУ, 2007. - 320 с.	15
3.	Геофизические методы исследования: учебное пособие / *В.К. Хмелевской, М.Г. Попов, А.В. Калинин.* - Москва: Недра, 1988. - 396 с	18
4.	Разведочная геофизика: лабораторный практикум / *Ю.Б. Давыдов, Н.В. Блинкова*; Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург: УГГУ, 2011. - 170 с.	20
5.	Электроразведка: учебное пособие. Ч. 1. Электроразведка постоянным током. Поляризационные методы электроразведки / *А. А. Редозубов*; Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург: УГГУ, 2007. - 328 с.	98
6.	Электроразведка: учебное пособие. Ч. 2. Электроразведка переменным током / *А.А.Редозубов*; Уральский государственный горный университет. - Екатеринбург: УГГУ, 2008. - 188 с.	97
7.	*Возженников Г. С., Белышев Ю. В.* Радиометрия и ядерная геофизика: Учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГГГУ, 2011. – 406 с.	12
8.	*Бондарев В.И., Крылатков С.М.* Сейсморазведка: учебник для вузов. Издание второе. В двух томах. - Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2011.	10
9.	Гравиразведка: справочник геофизика / под ред.: *Е.А. Мудрецовой*, *К Е. Веселова*. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва : Недра, 1990. - 607 с.	50
	Магниторазведка : учебник / Уральская государственная горно-геологическая академия. - Екатеринбург : УГГГА, 2001. - 308 с.	2

Учебное издание

Александрова Жанна Николаевна

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА ПО РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Руководство по выполнению контрольной работы
по дисциплине «Разведочная геофизика» для студентов
специальности 21.05.03 − «Технология геологической разведки»
очной и заочной формы обучения

Редактор _____
Компьютерная верстка автора

Подписано в печать ___ . ___ . 2018 г.
Бумага писчая. Формат 60 х 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. ____. Уч.-изд. л. ____. Тираж 100. Заказ _____

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНОБРНАУКИ РФ
ФГБОУ ВО

«Уральский государственный
горный университет»

И. Г. Сковородников

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

Екатеринбург
2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие…….5
1. Назначение первичных преобразователей, их характеристики и классификация…….5
Контрольные вопросы……...11
2. Преобразователи параметрического типа……...12
2.1. Резистивные преобразователи……...12
2.1.1. Контактные преобразователи……12
2.1.2. Реостатные преобразователи……..13
2.1.3. Тензометрические преобразователи……...16
2.1.4. Электролитические преобразователи……19
2.1.5. Терморезистивные преобразователи……21
2.1.6. Магниторезистивные преобразователи……23
2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи……25
2.2. Индуктивные преобразователи……26
2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором…….27
2.2.2. Магнитоупругие преобразователи……29
2.2.3. Магнитомодуляционные преобразователи……...30
2.3. Емкостные преобразователи……..34
Контрольные вопросы……..35
3. Преобразователи генераторного типа …...……36
3.1. Преобразователи индукционной э.д.с……..36
3.1.1. Преобразователи индукционной э.д.с. со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности……..36
3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности……..38
3.2. Преобразователи гальваномагнитной э.д.с……..41
3.2.1. Преобразователи Холла……..41
3.2.2. Преобразователи Виганда……...42

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с……...44
3.4. Преобразователи термоэ.д.с……..45
3.5. Преобразователи фотоэ.д.с……46
Контрольные вопросы……...49
4. Радиационные преобразователи……...49
4.1. Газоразрядные детекторы……..50
4.2. Сцинтилляционные детекторы……..53
4.3. Полупроводниковые детекторы……56
Контрольные вопросы……...56
Литература……..57

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель данного пособия – познакомить студентов с применением различных электрических датчиков в геофизической аппаратуре, облегчить им усвоение соответствующих разделов курса «Геофизическая аппаратура» и выполнение курсового проектирования по нему.

Необходимость издания пособия обусловлена тем, что в опубликованных работах по первичным преобразователям рассматриваются датчики общетехнического применения, в то время, как датчики разнообразной геофизической аппаратуры имеют ряд особенностей, связанных со спецификой условий их эксплуатации.

В пособии рассмотрены физические основы и устройство датчиков всех типов, входные и выходные параметры, указаны их достоинства и недостатки и приведены примеры применения в конкретной геофизической аппаратуре.

В качестве примеров в ряде случаев использованы оригинальные разработки автора.

В конце каждой главы приведен перечень контрольных вопросов для самостоятельной проверки усвоения материала студентами.

1. НАЗНАЧЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Первичные преобразователи в геофизической аппаратуре (ГА) являются теми элементами, которые вырабатывают сигнал информации об измеряемой величине. По этой причине первичные преобразователи ГА называются также измерительными преобразователями. Другими синонимами термина «первичный преобразователь» являются «датчик», «детектор», «чувствительный элемент», «сенсор», «трансмиттер» [4,15,23]. Правда, в специальной литературе существуют различные толкования термина «датчик», наиболее распространенного из перечисленных терминов. Так, например, в монографии К. Бриндли [4], датчик рассматривается как пассивный преобразователь, т.е. преобразователь получающий энергию для своей работы от измеряемой величины. В других источниках [1,16] под датчиком понимается конструктивно законченное устройство, которое, кроме первичного преобразователя, может содержать и другие элементы (усилитель сигнала, источник питания и т.п.) и которое устанавливается на удалении от наблюдателя. В данном пособии, как и в большей части специальной литературы, термин «датчик» будет использоваться как синоним первичного или измерительного преобразователя.

Важнейшими характеристиками датчиков служат: чувствительность, точность (достоверность) информации об измеряемой величине, надежность и долговечность, стабильность работы при изменении внешних условий, быстродействие, вид зависимости выходного сигнала от измеряемой величины (линейная, нелинейная, реверсивная, нереверсивная и т.п.).

Поясним некоторые из перечисленных характеристик.

Чувствительность преобразователя, которую также называют **коэффициентом передачи**, представляет собой отношение изменения

выходного сигнала *y,* к изменению входного сигнала *x.* Различают три вида коэффициентов передачи: статический, относительный и дифференциальный.

Статический коэффициент передачи используется для определения свойств преобразователей с линейной характеристикой: $K_{ст}=y/x$.

Дифференциальный коэффициент передачи применяется для датчиков с нелинейной характеристикой: $K_{диф}=\lim\Delta y/\Delta x\approx dy/dx$. Значение этого коэффициента непостоянно и зависит от величины входного сигнала *x*.

Относительный коэффициент передачи равен отношению относительного изменения сигнала на выходе датчика к относительному изменению сигнала на его вход $K_{отн}=(\Delta y/y)/(\Delta x/\Delta x)$. Этот коэффициент является величиной безразмерной и удобен для сравнения свойств преобразователей, различных по принципу действия и конструкции.

У некоторых измерительных преобразователей вследствие трения покоя, шумов измерительной схемы, гистерезиса и др. причин изменение выходного сигнала появляется только тогда, когда измеряемая величина достигает определенного уровня. Этот уровень называется порогом **чувствительности** x_n.

Во время работы первичного преобразователя на него, кроме измеряемой величины, воздействуют и другие сигналы – помехи, например, изменения температуры, внешнего давления, вибрации, изменения напряжения питания и пр. Результаты воздействия помех проявляются в виде погрешностей измерений: абсолютных, относительных, приведенных.

Абсолютная погрешность – это разность между измеренным *y* и действительным (расчетным) значениями выходной величины y_0: $\Delta y=y_{изм}-y_0$.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к действительному значению выходной величины в процентах: $\delta=(\Delta y/y_0)\cdot 100$.

Приведённая погрешность – это отношение абсолютной погрешности к наибольшему действительному значению выходной величины: $\varepsilon=\Delta y/y_{max}$. Для измерительных приборов приведенная погрешность определяет их класс точности.

В зависимости от режима, для которого определяется абсолютная или относительная погрешность, различаются **статические** и **динамические** погрешности (ошибки). Приведенная погрешность определяется только для установившегося (статического) режима [10].

Характер зависимости выходного сигнала от измеряемой величины $y=f(x)$ в установившемся режиме называется **статической** характеристикой преобразователя.

Наиболее удобными в работе и потому наиболее распространенными являются датчики, имеющие линейную характеристику. Если характеристика датчика нелинейна, то для формирования выходного сигнала могут применяться системы линеаризации. В некоторых случаях, например, если измеряемая величина изменяется нелинейным образом, удобнее использовать преобразователи с нелинейной статической характеристикой.

В зависимости от того, как на выходную величину влияет изменение знака измеряемой величины, статические характеристики бывают: **нереверсивными** (когда знак выходного сигнала остается постоянным во всем диапазоне измерений) и **реверсивными** (когда выходной сигнал изменяет свой знак вслед за измерявшейся величиной).

Следует упомянуть еще одну из характеристик измерительных преобразователей – **гистерезис**, который проявляется в несовпадении значений выходного сигнала при одном и том же значении измеряемой величины в зависимости от уменьшения или увеличения последней в момент измерения.

Надежность преобразователя – это способность работать в течение определенного периода времени при заданных условиях эксплуатации.

Надежность преобразователей, так же, как надежность, сложных электронных или механических устройств вообще, характеризуется вероятностью безотказной работы, средним временем безотказной работы и интенсивностью отказов – отношением числа отказавших устройств в определяемый промежуток времени к числу работоспособных в начале этого промежутка.

График зависимости интенсивности отказов от времени эксплуатации имеет характерную корытообразную форму. Первый участок графика ($0 – t_1$) называется "временем приработки", в этот период интенсивность отказов велика из-за того, что здесь проявляются дефекты сборки, выходят из строя некондиционные детали и т. п. Второй участок $t_1 – t_2$ называется "периодом условной долговечности», здесь отказы могут быть связаны, в основном, со случайными причинами. Третий участок $t_2 – \infty$ называется "периодом старе-

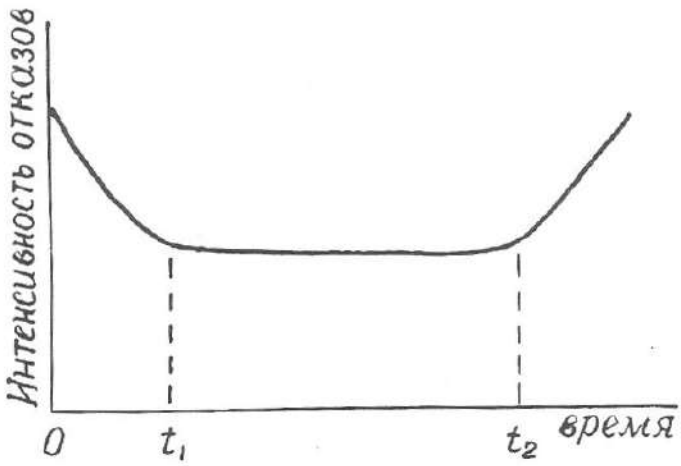


Рис. 1.1. Зависимость и интенсивности отказов от времени эксплуатации преобразователя

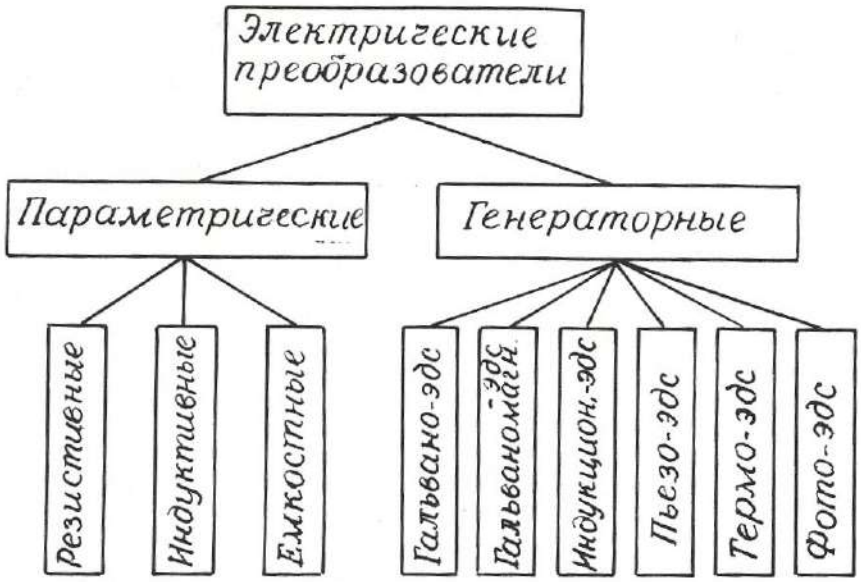


Рис. 1.2. Классификация электрических преобразователей

ния», здесь интенсивность отказов растет из-за того, что детали преобразователя вырабатывают свой ресурс (рис. 1.1).

Пути повышения надежности преобразователей – это упрощение их устройства, использование элементов с большой вероятностью безотказной работы, «разгруженный» режим эксплуатации.

Подавляющее большинство датчиков геофизической аппаратуры преобразуют измеряемую величину в электрический сигнал, хотя имеются датчики, например, в гравиразведочных приборах, выходная величина которых не является электрической.

Электрические преобразователи, применяемые в геофизической аппаратуре, крайне разнообразны по принципу действия и конструкции.

Основными признаками, позволяющими классифицировать датчики, являются: назначение, принцип действия, вид входного и выходного сигналов, наличие или отсутствие источников питания.

По назначение электрические датчики делятся на преобразователи неэлектрических величин в электрические и преобразователи одних электри-

ческих величин в другие. Соответственно входные величины измерительных преобразователей могут иметь как электрическую, так и неэлектрическую природу. Это могут быть характеристики различных физических полей (например, магнитная индукция, температура, сила тяжести, э.д.с. естественных электрических полей), разнообразные свойства горных пород, руд и растворов (плотность, электрическое сопротивление, магнитная восприимчивость, радиоактивность), геометрические и технические параметры буровых скважин (их диаметр, углы искривления), скорость перемещения, механические усилия и т. д.

Выходными величинами электрических датчиков могут, быть: э.д.с., сила тока, частота тока, импульсы тока или комбинации импульсов различной длительности и амплитуды, а также сопротивление, емкость или индуктивность электрической цепи.

По принципу действия электрические преобразователи делятся на **параметрические**, изменяющие пассивные элементы электрической цепи (сопротивление, емкость, индуктивность), и **генераторные**, вырабатывающие э.д.с. различной физической природы. В свою очередь, среди параметрических датчиков выделяются: резистивные, емкостные и индуктивные, а среди генераторных: датчики гальванической, гальваномагнитной, индукционной, фото-, пьезо- и термоэ.д.с. (рис. 1.2).

Особняком стоят радиационные преобразователи (детекторы радиоактивных излучений), которые имеет сложную структуру.

Каждый из видов датчиков, изображенных на рис. 1.1, имеет свои разновидности, отличающиеся по конструктивному исполнению.

По наличию или отсутствию специальных источников питания датчики подразделяются на **пассивные**, получающие энергию от измеряемой величины, и активные, питающиеся от внешнего источника.

В следующих разделах пособия будут рассмотрены физические свойства, особенности конструкции, достоинства и недостатки, а также примеры

применения в конкретных образцах геофизической аппаратуры всех видов датчиков, представленных на рис. 1.2.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерительного преобразователя.
2. Какие синонимы существуют у термина «измерительный преобразователь»?
3. Что такое чувствительность преобразователя?
4. Назовите виды коэффициентов передачи датчика.
5. Назовите виды погрешностей преобразователей, укажите, какие причины их вызывают.
6. Что такое статическая характеристика преобразователя?
7. Что такое надежность преобразователя?
8. Поясните график зависимости интенсивности отказов от времени (рис. 1.1).
9. По каким признакам производят классификацию электрических преобразователей?
10. Назовите входные и выходные величины электрических преобразователей в геофизической аппаратуре.
11. На какие две большие группы делятся электрические преобразователи по принципу действия?
12. Поясните классификацию преобразователей, приведенную на рис. 1.2.

2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

2.1. Резистивные преобразователи

В преобразователях этого вида изменения измеряемого параметра преобразуются в изменения **активного сопротивления** электрической цепи.

В соответствии с выражением $R=\rho \cdot l/S$ (2.1) изменения сопротивления R могут происходить за счет изменения геометрических размеров проводника (длины l и поперечного сечения S) или его удельного сопротивления ρ. К

преобразователям с изменяемыми размерами относятся контактные, реостатные, потенциометрические, тензометрические, угольные и электролитические датчики. К преобразователям с изменяемым удельным сопротивлением – электролитические, терморезистивные и некоторые фотоэлектрические датчики.

2.1.1. Контактные преобразователи

Контактные преобразователи представляют собой простейшую разновидность преобразователей резистивного типа. В одном крайнем положении их сопротивление равно бесконечности, в другом близко к нулю. Работой контактных преобразователей могут управлять механические (линейное или угловое перемещение) или различные физические параметры (температура, магнитное поле, электрический ток).

Контактные преобразователи составляют основу большинства реле, широко применяемых в системах автоматического управления [8,11]. В последнее время широкое распространение получили **герконы** – миниатюрные герметизированные контактные преобразователи, управляемые магнитным полем.

Достоинства контактных преобразователей составляют их простата и малая стоимость, универсальность (они могут работать в цепях как постоянного, так и переменного тока); недостатки – искрение и «дребезг» контактов, возможность ложных срабатываний контактов от тряски.

В геофизической аппаратуре контактные преобразователи используются в различных измерителях постоянных напряжений для преобразования этих напряжений в переменные, которые потом подвергаются усилению на электронных усилителях. Примером могут служить электроразведочные измерители ЭСК-1, АТ-72, самопишущие каротажные потенциометры ПАСК-8 и ПАСК-9. Контактные преобразователи используются также в схемах

управления многочисленных скважинных приборов (в пластовом наклономере НП-3, расходомерах с раскрывающимся пакером и др.).

Герконы используются в скважинных расходомерах РСМ, РГД, ДГД и др. [21].

2.1.2. Реостатные преобразователи

Простейший реостатный преобразователь – это переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается вследствие изменения измеряемой величины – линейного перемещения, давления, угла наклона, направления магнитного поля и т.п.

Реостатный преобразователь (рис. 2.1, а) может быть включен по потенцио-метрической схеме (рис. 2.1, б), в этом случае он должен быть отнесен к преобразователям генераторного типа.

Как правило, реостатные преобразователи выполняют в виде намотки из изолированной проволоки высокого сопротивления (из манганина, константана, вольфрама) на каркасе из изоляционного материала. Форма каркаса может быть различной: прямоугольной, кольцевой или более сложной конфигурации в зависимости от входного параметра и необходимой зависимости $R= f(x)$.

Проволочные реостатные преобразователи являются дискретными, т.к. непрерывному изменению входной величины x соответствует скачкообразное изменение сопротивления R определяемое переходом подвижного контакта с одного витка провода на другой. Это обуславливает и погрешность измерений, которая уменьшается с уменьшением диаметра проволоки и увеличением числа витков W. Статический коэффициент передачи реостатного датчика $K_{ст}=z\cdot W/l$, где z – сопротивление одного витка, l – длина намотки.

Обычная относительная погрешность датчиков $\delta= 0{,}2 – 0{,}5$ %.

Преимущества реостатных датчиков: простота конструкции, малый вес и габариты, возможность включения в цепь как постоянного, так и переменного тока, возможность получения необходимой статической характеристики

R=f(x), недостатки: наличие подвижного механического контакта, что уменьшает надежность датчика, необходимость какого-то усилия для перемещения этого контакта, влияние температуры.

Благодаря своей простоте и универсальности реостатные преобразователи широко используются в геофизической аппаратуре для исследования скважин: в каверномерах (КФ, КМ, СКП-1 и др.), в инклинометрах (ИК-1, ИК-2, МИР-36, ИГ-36 и др.) [2,9,12], в датчиках натяжения кабеля, в некоторых уровнемерах. Так, например, в скважинном уровнемере конструкции УГИ [18,26], изменение уровня жидкости над прибором, точнее, гидростатическое давление столба жидкости над ним преобразуется в изменение уровня токопроводящей жидкос-

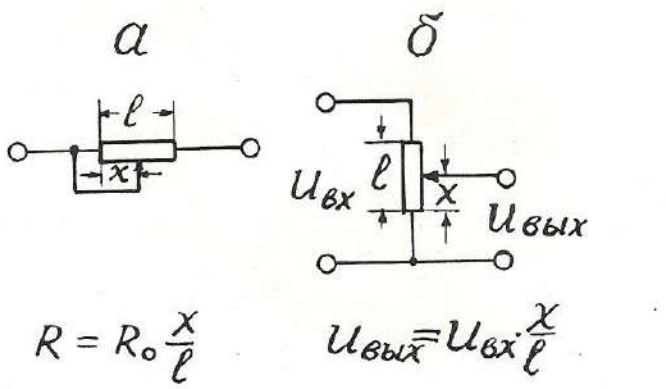


Рис. 2.1. Реостатный преобразователь (а) и его включение по потенциометрической схеме (б).

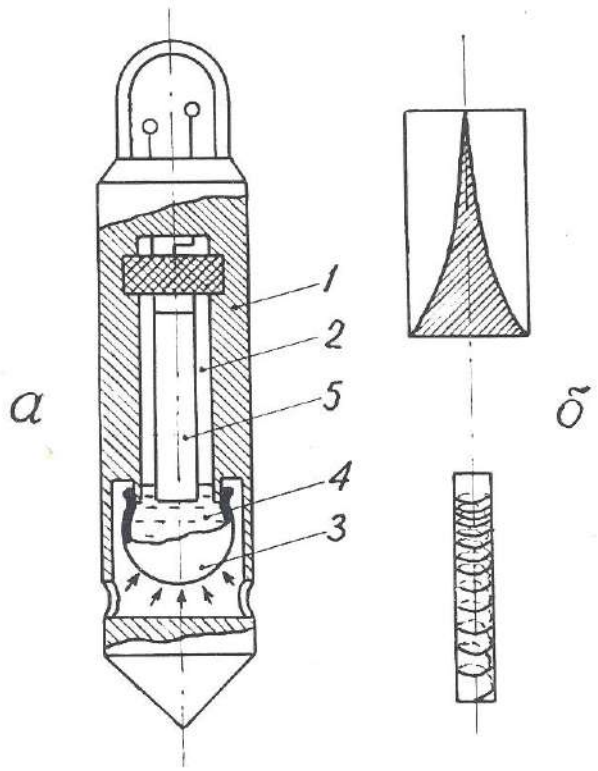


Рис. 1.2. Пример применения реостатного преобразователя в скважинном уровнемере с линейной входной характеристикой: а – конструкция уровнемера; б – варианты выполнения реостата; 1 – корпус уровнемера; 2 – измерительная камера; 3 – гибкий резервуар; 4 – токопроводящая жидкость; 5 – реостат.

ти в измерительной камере, отделенной от внешней среды гибкой оболочкой (рис. 2.2). Вдоль продольной оси камеры располагается реостатный преобразователь, подвижным контактом которого служит токопроводящая жидкость. Поскольку давление P в измерительной камере и ее объем V при постоянной температуре связаны соотношением PV=const [7], то одинаковые приращения давления P .(уровня жидкости) вызывают неодинаковые перемещения уровня токопроводящей жидкости в измерительной камере. Для получения линейной статической характеристики реостатный преобразователь в данном уровнемере выполнен в виде неравномерной намотки или высокоомной пленки переменной ширины таким образом, чтобы приращение сопротивления реостата было обратно пропорционально квадрату перемещения подвижного контакта, т.е. уровня токопроводящей жидкости.

2.1.3. Тензометрические преобразователи

Действие тензопреобразователей основано на изменении сопротивления проводников и полупроводников при их растяжении или сжатии [15].

Тензоэлементы (или тензорезисторы) состоят из тонкой проволоки или фольги, сложенной несколько раз в форме меандра и вклеенной между эластичными бумажными, пленочными или фетровыми подкладками. Толщина проволоки (или фольги) от 0,02 до 0,05 мм. Основные конструктивные формы тензоэлементов представлены на рис. 2.3.

Изменение электрического сопротивления тензоэлемента пропорционально относительной деформации детали в месте наклейки последнего. Относительный коэффициент передачи тензодатчика $K_{отн}=(\Delta R/R)/(\Delta l/l)$. Материал для тензоэлементов должен характеризоваться возможно большей тензочувствительностью и возможно меньшим температурным коэффициентом. Обычно используются сплавы: константан, манганин, нихром, а также чистые металлы: никель, висмут. Очень высокую тензочувствительность, в 60-80 раз выше, чем у металлов, имеют полупроводники: германий, кремний и др. Полупроводниковые тензоэлементы получают выращиванием кристаллов полупроводника на мембране из диэлектрического металла (например, датчики «кремний на сапфире»).

Достоинства тензорезисторных преобразователей: простота конструкций, малые габариты, высокая точность, безинерционность; недостатки: невысокая чувствительность, зависимость сопротивления от температуры.

Низкая чувствительность тензорезисторных преобразователей требует применения усилителей выходного сигнала, а термозависимость – применения специальных мер для устранения влияния температуры.

Тензопреобразователи находят применение в датчиках силы натяжения каротажного кабеля с подвесным роликом ДНТ-033 ($\delta \leq 1{,}5\%$ при усилии до 500 *Н*) [2,17], в некоторых опробователях пластов в качестве измерителей

пластового давления (например, в ОПД-7-10), в некоторых скважинных уровнемерах типа погружных манометров [2].

Автором тензорезисторный преобразователь применен в расходомере РГЖ-1, не содержащем вращающихся деталей [19]. Чувствительным элементом этого прибора служат две гибкие пластины, установленные вдоль измеряемого потока. Поскольку давление в движущемся флюиде понижается, пластины прогибаются навстречу друг другу тем больше, чем выше скорость потока (рис. 2.4). Прогиб пластин преобразуется в электрический сигнал с помощью наклеенных на них тензоэлементов. Для устранения влияния температуры на пластине наклеены 4 тензоэлемента (2 вдоль нее и 2 поперек), соединенные по мостовой схеме. В одну диагональ моста подается переменный ток питания (частота I кГц), к другой диагонали подключен усилитель. Чувствительность описанного расходомера составляет 0,05 л/с.

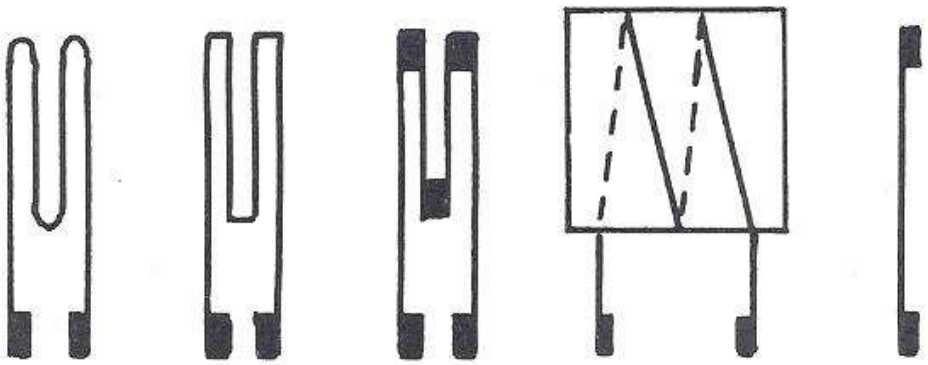


Рис. 2.3. Разновидности тензорезисторов

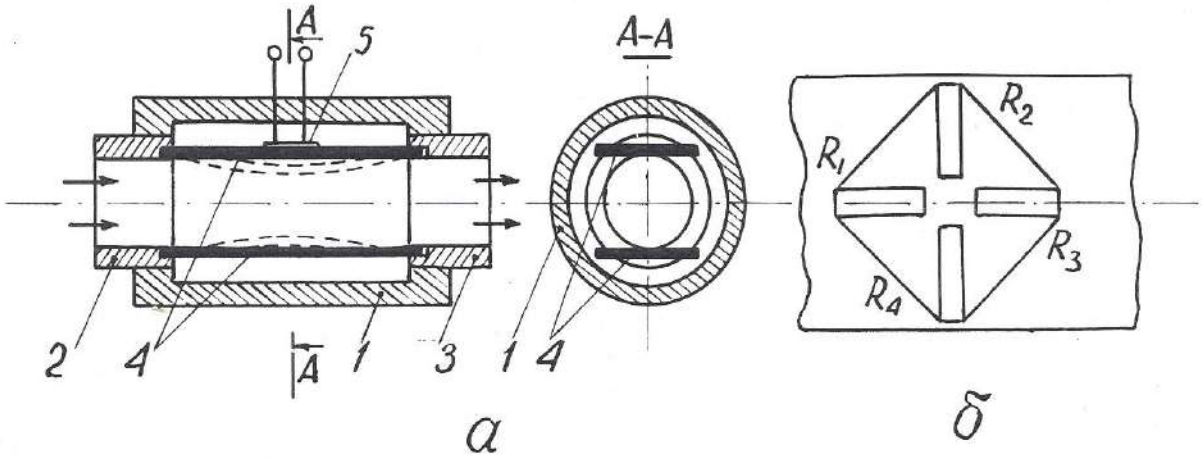


Рис. 2.4. Принцип действия расходомера РГЖ-1 (а) и размещение тензорезисторов на упругой пластине (б): 1 – корпус расходомера; 2 – входной канал; 3 – выходной канал; 4 – упругие пластины; 5 – тензометрический преобразователь прогиба пластины в электрический сигнал

2.1.4. Электролитические преобразователи

Преобразователи этого типа основаны на изменении электрического сопротивления между помещенными в электролит электродами в зависимости от расстояния между ними, площади соприкосновения с электролитом или проводимости последнего (2.1). Электролитические датчики используются для измерения угловых и линейных перемещений, а также для определения сопротивления электролита. Во избежание погрешностей, связанных с электролизом и электродной поляризацией, их включают, как правило, в цепь переменного тока.

Достоинства датчиков этого типа заключаются в простоте конструкции и способности пропускать большие токи; недостатки – в зависимости сопротивления электролита от температуры (при изменении последней на 1° электропроводность растворов изменяется на 1,5-2,5%).

В геофизической аппаратуре электролитические датчики используются в резистивиметрах всех видов: скважинных и переносных (например, в приборе ПР-1).

Еще один пример применения датчик этого типа устройство для определения направления и скорости потока подземных вод [20]. Это устройство содержит цилиндрическую измерительную камеру с перфорированными стенками, по окружности которой размещены радиальные электроды а в середине – центральный (рис. 2.5). Каждый из электродов подсоединен к своей жиле многожильного каротажного кабеля (например, кабеля КГ17-60-180ШМ. Внутри камеры располагается также магнитная стрелка с экраном из изоляционного материала на северном конце. Измерительная камера закрывается крышкой и заполняется электролитом через специальные отверстия в ней. Затем устройство опускают в скважину и устанавливают напротив исследуемого водоносного горизонта. По кабелю

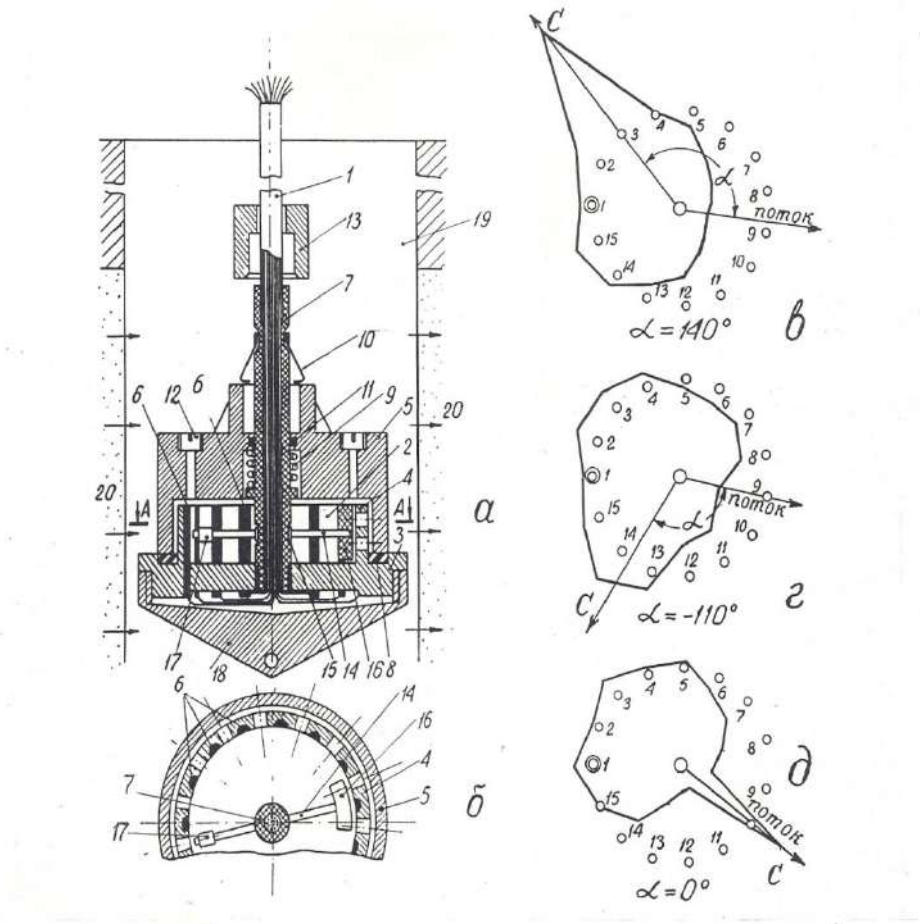


Рис. 2.5. Устройство для определения направления и скорости потока (а, б) и результаты измерений магнитного азимута потока (в-д): 1 – многожильный каротажный кабель; 2 – измерительная камера; 3 – изоляционный диск; 4 – перфорированные стенки камеры; 5 – крышка; 6 – радиальные электроды; 7 – центральный электрод; 8 – резиновая прокладка; 9 – сжатая спиральная пружина; 10 – пружинные защелки; 11 – резиновое кольцо; 12 – заливная пробка; 13 – сбивающий грузик; 14 – магнитная стрелка; 15 – скользящий подшипник; 16 – изоляционный экран; 17 – противовес; 18 – нижний наконечник.

опускают сбивающий грузик, который приводит в действие пружину, отбрасывающую крышку вверх по кабелю. Движением подземных вод электролит из измерительной камеры вымывается по направлению потока через перфорацию в стенках. Магнитная стрелка ориентируется по направлению магнитного меридиана, а экран на ее северном конце перекрывает один из

радиальных электродов. На поверхности производят измерения электрического сопротивления между центральным и каждым из радиальных электродов. Минимальное сопротивление указывает направление потока подземных вод, а максимальное – направление на север. Скорость потока определяют по скорости вымывания электролита из измерительной камеры, повторяя измерения через определенные интервалы времени. При использовании 17-жильного кабеля устройство обеспечивает абсолютную погрешность в измерении направления потока, не превышающую ±12°.

2.1.5.Терморезистивные преобразователи

Терморезистивные преобразователи основаны на свойстве металлов и полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры Т.

Зависимость сопротивления металлов от температуры в общем случае нелинейна, однако, для ограниченных интервалов температур ее можно представить в виде линейной двучленной функции $R_т=R_0[1+\alpha(T-T_0)]$, где R_0 – сопротивление при начальной температуре T_0, а α – температурный коэффициент сопротивления для интервала $T – T_0$.

Основным материалом для терморезисторов являются чистые металлы: платина, медь, никель, которые обладают в интервале от О до 100°С положительным $\alpha=0{,}0030–0{,}0068$ (град.С)$^{-1}$.

Известны также объемные полупроводниковые терморезисторы (термисторы). Их сопротивление уменьшается с повышением температуры по экспоненте, в среднем для них $\alpha=0{,}03\text{-}0{,}04$ (град. С)$^{-1}$, но значение α сильно зависит от температуры. Чувствительность (статический коэффициент передачи) терморезисторов $K_{ст}=\Delta R/\Delta T=\alpha R_0$.

Достоинства терморезистивных преобразователей: простота конструкции, малые габариты, возможность установки в труднодоступных местах. Однако им присущи и важные недостатки. Во-первых, это постоянство α лишь в ограниченном диапазоне температур и, во-вторых, инерционность, приводящая

к большим динамическим погрешностям. Как известно, термопреобразователь приобретает температуру среды по закону $\Delta T=\Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$ где ΔT_0 - начальная разность температур, t – время, τ – постоянная времени преобразователя, зависящая от его конструкции и теплопроводности, а также тепловых свойств среды.

В геофизическом приборостроении преобразователи этого типа находят применение в скважинных термометрах электрических (СТС-2, ЭТМИ-55 и др.) и электронных (ТЭГ-36, ТЭГ-60 и др.).

Чувствительный элемент всех скважинных термометров представляет собой тонкую (0,02-0,03 мм) медную проволочку, сложенную в несколько раз и помещенную в тонкостенную медную трубку длиной около 30 см, омываемую скважинным флюидом [9].

Точно так же устроен чувствительный элемент скважинных расходомеров типа термоанемометров СТД-2, СТД-4 [2]. Этот термоэлемент включается в мостовую измерительную схему и нагревается до температуры, превышающей температуру исследуемого потока. Мостовая схема балансируется при размещении чувствительного элемента в неподвижной жидкости. Когда жидкость приходит в движение, она охлаждает нагретый термоэлемент, тем сильнее, чем выше скорость ее движения.

В газокаротажных станциях (АГКС-64, АГКС-4 и др. для определения суммарного газосодержания в газовоздушной смеси эта смесь подается на термочувствительный элемент в виде тонкой платиновой проволочки, нагретой до 850° С и включенной в сбалансированную мостовую схему. Если в анализируемой смеси имеются углеводородные газы, то при 850°С они сгорают, выделяющееся тепло повышает температуру проволочки, увеличивая ее сопротивление и нарушая баланс мостовой схемы [17].

Аналогичным образом действуют приборы для определения содержания СО в выхлопных газах автомобиля [6].

Известны также устройства для определения направления потока подземных вод [24], содержащие нагреватель и расположенные вокруг него

термисторы. По измерениям температуры последних определяют, в каком направлении идет перенос тепла, т.е. происходит движение подземных вод.

2.1.6. Магниторезистивные преобразователи

Эти преобразователи основаны на свойстве некоторых материалов изменять свое электрическое сопротивление под действием магнитного поля (эффект Гаусса). Таким свойством обладает, например, сплав пермаллой (80% никеля, 20% железа). Степень изменения сопротивления магниторезистора зависит от магнитной индукции поля B и угла θ между ее направлением и направлением тока [6,16,22].

Магниторезисторы изготавливаются по тонкопленочной технологии в форме меандров (рис. 2.6).

Еще большим магнитоэлектрическим эффектом, чем сплавы металлов, обладают полупроводники (антимонид индия InSb и арсенид индия InAs).

Увеличение сопротивления магниторезисторов объясняется увеличением пути движения электронов и дырок под действием силы Лоренца. Чувствительность магниторезистивных датчиков $K_{диф}=\Delta R/\Delta B$ зависит от величины магнитной индукции: $\Delta R=R_0 \cdot A(vB)^n$, где A – так называемый «коэффициент формы», v – подвижность электронов: n – постоянный коэффициент (n=1–2), зависящий от B.

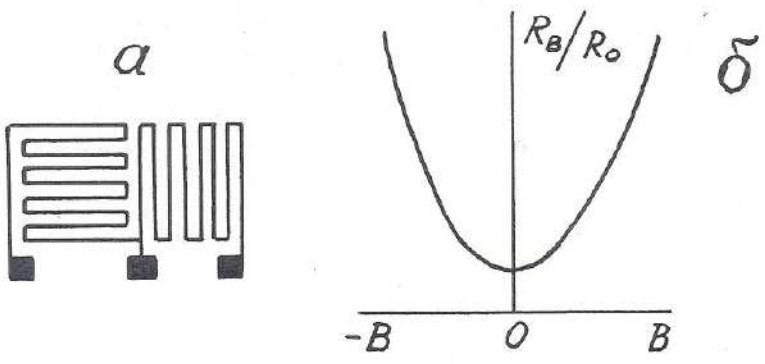


Рис. 2.6. Форма магниторезистора (а) и зависимость приращения его сопротивления от магнитной индукции (б)

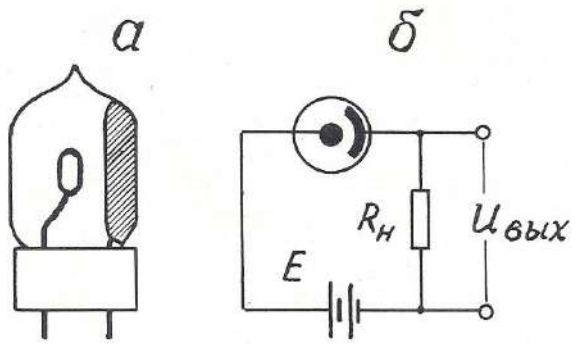


Рис. 2.7. Конструкция фотоэлемента с внешним эффектом (а) и включение его в измерительную схему (б)

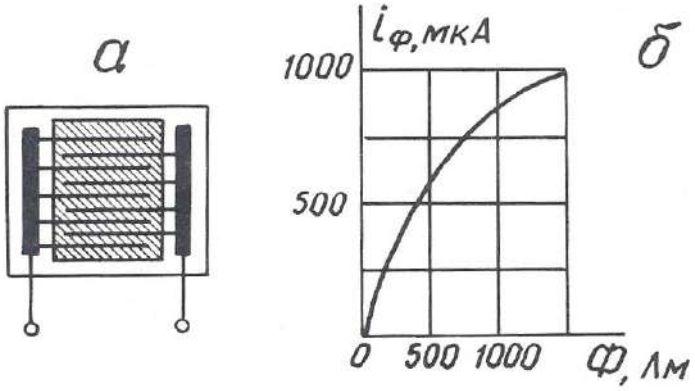


Рис. 2.8. Конструкция фотоэлемента с внутренним фотоэффектом (а) и зависимость фототока от светового потока (б)

При больших B значение n=1, поэтому при использовании магниторезисторов применяют магнитное смещение, помещая их в поле электромагнита с B=0,3 – 0,5 Тл.

Недостатки магниторезисторов: наличие температурного влияния и потребность в сильных магнитных полях.

Магниторезисторы в геофизике могут быть использованы в скважинных расходомерах и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.1.7. Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрические преобразователи (фотоэлементы) основаны на явлении внешнего (электровакуумные и газонаполненные) или внутреннего (полупроводниковые) фотоэффекта.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом представляет собой электронную лампу с двумя электродами, один из которых (фотокатод) покрыт светочувствительным слоем (рис. 2.7). Возрастание фототока при увеличении приложенного напряжения происходит до величины тока насыщения, при котором все электроны, испускаемые фотокатодом под действием светового потока, достигают анода.

Фотоэлемент с внутренним фотоэффектом (фоторезистор) состоит из стеклянной пластины, на которой вытравлены входящие друг в друга гребневидные системы штрихов, заполненные электропроводным веществом (платина, золото). Пластина покрывается тонким слоем полупроводникового светочувствительного материала (рис. 2.8).

Чувствительность фотоэлементов $K_{диф}=\Delta R/\Delta Ф$ непостоянна и нелинейно зависит от светового потока Ф. Кроме того, фотоэлементы обладают еще и спектральной избирательностью» т.е. чувствительностью к световому излучению определенной длины волны.

Фотоэлементы могут быть использованы и в режиме источников тока, т.е. как генераторные преобразователи фотоэ.д.с.

Фотопреобразователи находят применение в приборах фотокаротажа, предназначенных для дифференциации разрезов скважин по цвету пород, в скважинных расходомерах (например, в ТСР-70Ф) в некоторых инклинометрах. Так, автором совместно с профессором. А.В.Давыдовым предложен датчик угла наклона буровой скважины для непрерывных измерений [27]. Этот датчик содержит измерительную камеру 1, частично заполненную жидкостью 2 с высоким коэффициентом поверхностного отражения, например, ртутью или сплавом Вуда, а над жидкостью соосно размещены источник света 3 и кольцевой фотопреобразователь 4 (рис. 2.9). При вертикальном положении датчика весь свет источника, отраженный от поверхности жидкости, попадает

на фотопреобразователь, и сигнал на его выходе максимален. При отклонении датчика от вертикали поверхность жидкости наклоняется относительно оси камеры, и часть отраженного света уходит за пределы фотопреобразователя. Выходной сигнал уменьшается тем сильнее, чем больше зенитный угол скважины.

2.2. Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на изменении электрического сопротивления z катушки индуктивности при изменении магнитного сопротивления ее сердечника. В свою очередь, магнитное сопротивление сердечника может быть изменено либо за счет изменения величины воздушного зазора в нем, либо за счёт изменения магнитных свойств материала, из которого он состоит.

2.2.1. Индуктивные преобразователи с изменяемым воздушным зазором

Входной величиной преобразователей этого типа обычно служат линейные или угловые перемещения. Чувствительность датчика $K_{диф}=\Delta z/\Delta x$.

Конструкции датчиков весьма разнообразны, некоторые из них, наиболее распространенные, представлены на рис. 2.10.

Независимо от конструкции датчика, его индуктивное сопротивление $z=j\,\omega\,L$, где ω – круговая частота тока в катушке; L – ее индуктивность. $L=W^2/R_\mu$, где W – число витков в катушке; R_μ – магнитное сопротивление сердечника. $R_\mu=R_ж+R_в$, где $R_ж$ – магнитное сопротивление железа сердечника; $R_в$ – магнитное сопротивление воздушного зазора. $R_в>>R_ж$. $R_в=\delta/(\mu_0\cdot S)$, где δ – длина воздушного зазора; S – его площадь; μ_0 – абсо-

лютная магнитная проницаемость воздуха. Таким образом, $z=-j\,\omega\,W^2\mu_0 S/\delta$, т.е. z обратно пропорционально δ и зависимость $z=f(\delta)$ нелинейна.

Линеаризовать эту зависимость удается в конструкции так называемых «дифференциальных» индуктивных преобразователей (рис. 2.11). В этих преобразователях, используются, две катушки индуктивности, включенные в мостовую схему и расположенные таким образом, что, когда индуктивное сопротивление одной увеличивается, сопротивление другой падает.

Достоинства индуктивных: преобразователей: отсутствие открытых электрических контактов, большая мощность вырабатываемого сигнала; недостаток – наличие электромагнитного взаимодействия между катушкой и сердечником (или его подвижной частью), отсюда – так называемая «реакция преобразователя».

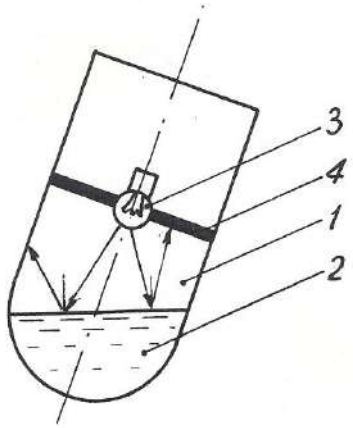


Рис. 2.9. Датчик угла наклона буровой скважины: 1 – измерительная камера; 2 – жидкость с высоким коэффициентом поверхностного отражения; 3 – источник света; 4 – кольцевой фотоприемник

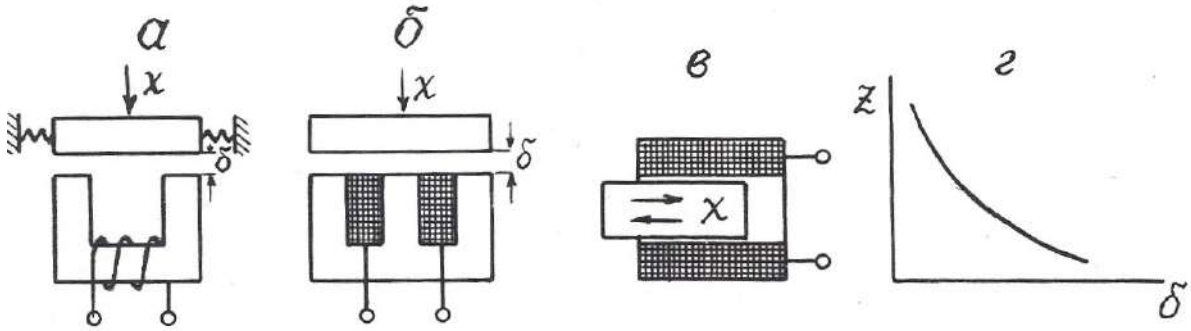


Рис. 2.10. Варианты выполнения индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором (*а-в*) и их статическая характеристика (*г*).

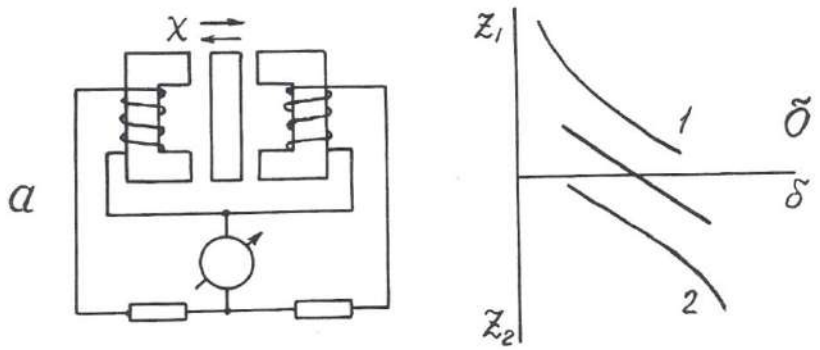


Рис. 2.11. Дифференциальный индуктивный преобразователь (а) и его статическая характеристика (б)

В геофизической аппаратуре индуктивные преобразователи находят применение в некоторых каверномерах и профилемерах (например, в профилемере ПМ-50) [2], в скважинных расходомерах ДАУ-3, РСИ-3 и ГЕО-В-600 (последний венгерского производства) [21], в индуктивных дефектомерах обсадных колонн.

2.2.2. Магнитоупругие преобразователи

Эти преобразователи основаны на взаимосвязи между магнитным и механическим состоянием ферромагнитных материалов.

Различают собственно **магнитоупругий эффект**, т.е. изменение магнитных свойств, в частности, магнитной проницаемости под воздействием меха-

нических деформаций, и обратное явление – **магнитострикционный эффект**, т.е. изменение формы и размеров ферромагнитных тел под воздействием внешнего магнитного поля.

В качестве материала для изготовления магнитоупругих датчиков используют сплавы: пермаллой, пермендюр, альсифер, ферриты, а также чистые металлы, например, никель. Конструкции преобразователей изображены на рис. 2.12.

Относительный коэффициент передачи магнитоупругого датчика $K_{отн}=(\Delta\mu/\mu)/(\Delta l/l)$ составляет около 200 и не остается постоянным при изменении размеров датчика (см. рис. 2.12, д).

Достоинства магнитоупругих датчиков: простота конструкции, прочность, удобство герметизации; недостатки: нелинейная статическая характеристика, наличие резонансной частоты.

Для стержневых датчиков (см. рис. 2.12, а, б) резонансная частота $f_0=V/2l$, где V – скорость упругих волн в материале сердечника, l – его длина; для кольцевого (см. рис. 2.12, в) – $f_0=V/2d$, где d – диаметр датчика.

Магнитоупругие преобразователи находят применение в аппаратуре акустического каротажа в качестве источников (магнито-стрикционные излучатели) упругих волн [12,17], в некоторых прихватоопределителях, а также в буровой технике – в измерителях нагрузки МКМ-2 буровых станков и в измерителях давления промывочной жидкости МИД-1, МИД-1А [5].

2.2.3. Магнитомодуляцнонные преобразователи

Эти преобразователи основаны на изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием магнитного поля.

Сердечники магнитомодуляционных преобразователей изготавливают в форме стержня с большим отношением длины l к диаметру d: $l/d>100$. При этом условии коэффициент размагничивания сердечника $N=0$ и даже в слабом магнитном поле, направленном вдоль его оси, сердечник намагничивается до

насыщения. При этом его относительная магнитная проницаемость падает до 1, хотя при ненасыщенном состоянии она очень велика – до 10000. Для того, чтобы намагнитить сердечник до насыщения, на него наносят обмотку возбуждения, по которой пропускают переменный ток.

В моменты как падения магнитной проницаемости (при возрастании намагничивающего поля до H_s), так и восстановления ее (при уменьшении намагничивающего поля ниже H_s) в обмотке индуцируются пики э.д.с. самоиндукции противоположных знаков. Частота этих пиков вдвое превышает частоту возбуждающего тока, как это можно видеть по рис.2.13.

При воздействии на датчик внешнего постоянного магнитного поля, направленного вдоль его оси, в один из полупериодов это поле складывается с магнитным полем катушки возбуждения, и сердечник доходит до насыщения быстрее, чем вне внешнего магнитного поля, в другой полупериод внешнее поле вычитается из поля катушки возбуждения, и сердечник не доходит до

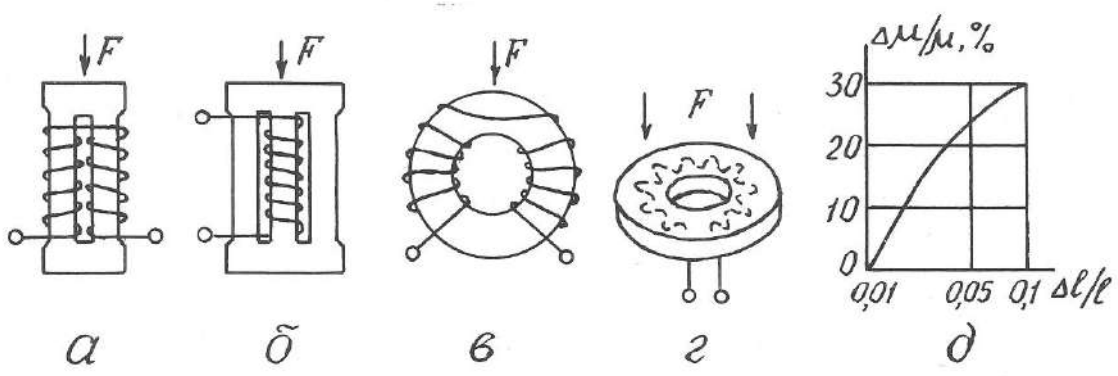


Рис. 2.12. Разновидности магнитоупругих преобразователей (а-г) и зависимость изменения магнитной проницаемости от изменения размеров преобразователя (д)

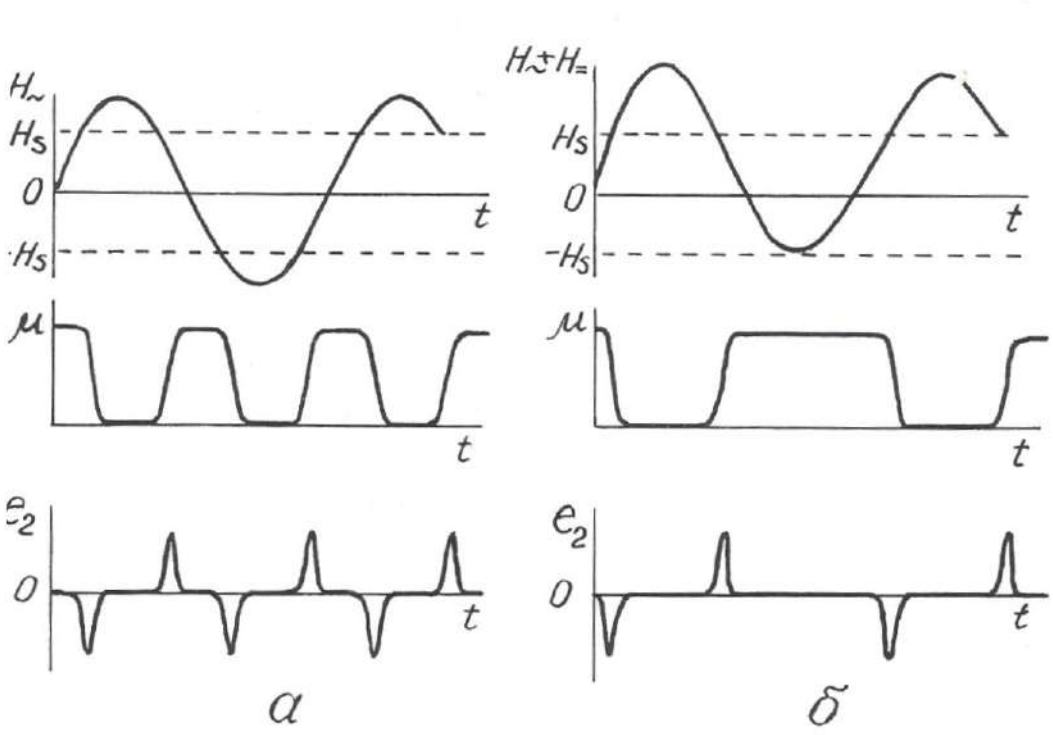


Рис. 2.13. Возникновение э.д.с. второй гармоники в магнитомодуляционном преобразователе в отсутствие (а) и при наличии (б) внешнего магнитного поля

магнитного насыщения, и нарушается симметрия перемагничивания сердечника.

Существуют 2-элементная и 1-элементная конструкции магнитомодуляционных датчиков (рис. 2.14). В 2-элементной имеются 2 параллельных сердечника, обмотки возбуждения на которых намотаны в противоположных направлениях и потому их магнитное поле имеет противоположное направление, а пики э.д.с. второй гармоники противоположны по знаку. По этой причине в сигнальной обмотке, охватывающей оба стержня, при отсутствии внешнего магнитного поля выходной сигнал равен 0. При наличии внешнего магнитного поля в один полупериод исчезает пара импульсов э.д.с. второй гармоники в одной обмотке, когда ее стержень не доходит до насыщения, в другой полупериод – не возникает такая же пара

импульсов в другой обмотке возбуждения и потому на выходе сигнальной обмотки будет существовать э.д.с. второй гармоники, имеющая частоту, удвоенную по сравнению с током возбуждения. Амплитуда этой э.д.с. пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля, а фаза определяется направлением последнего.

В одноэлементных датчиках э.д.с. второй гармоники выделяется не с помощью дополнительной сигнальной обмотки, а с помощью фильтров, настроенных на ее частоту.

Достоинства магнитомодуляционных датчиков: простота, надежность, отсутствие открытых электрических контактов, высокая чувствительность; недостаток – необходимость в сложной измерительной схеме, обеспечивающей питание датчика переменным током, а также выделение и усиление сигнала второй гармоники. Дополнительный недостаток 2-элементных датчиков – большое количество выводов.

Магнитомодуляционные преобразователи находят широкое применение в магнитометрической аппаратуре – 2-элементные в полевых (М-17) и аэромагнитометрах (АММ-13, АСГМ-46) [3], 1-элементные – в скважинных

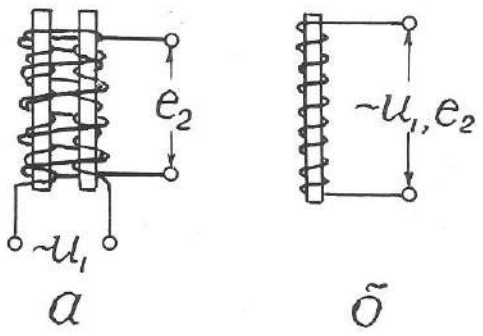


Рис. 2.14. Конструкция 2-элементного (а) и 1-элементного (б) магнитомодуляционного преобразователя

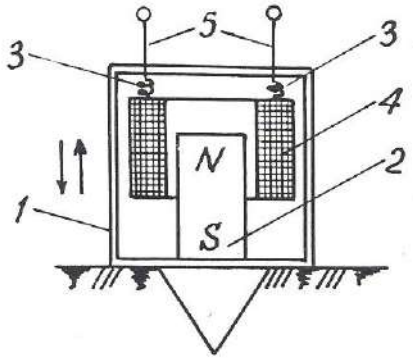


Рис. 3.1. Сейсмоприемник магнитоэлектрического типа: 1 – корпус; 2 – постоянный магнит; 3 – пружинки; 4 – катушка индуктивности; 5 – электрические выводы

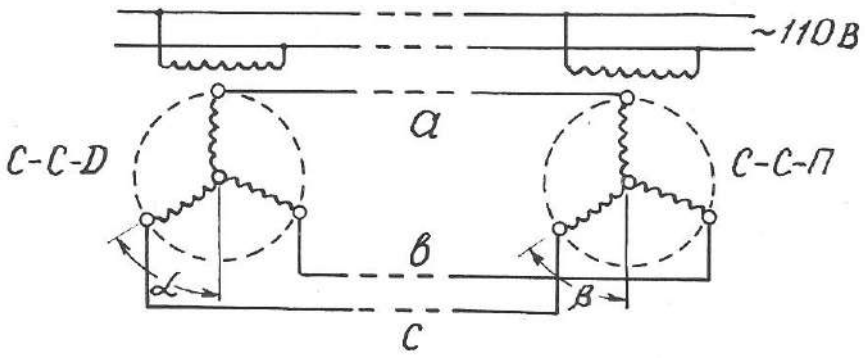


Рис. 3.2. Электрическая схема сельсинной передачи

магнитометрах ТСМ-3, ТСМК-40, ТСМК-30, КСМ-38 и др. [12,17]. Они используются также в скважинных расходомерах РЭТС-2 и магнитных меткоуловителях каротажных станций.

2.3. Емкостные преобразователи

Преобразователи этого вида основаны на изменении емкости C конденсатора под действием измеряемой величины.

Как известно, $C=\varepsilon S/\delta$ (2.2), где S – площадь обкладок конденсатора; δ – расстояние между ними; ε – диэлектрическая проницаемость среды между

обкладками. Следовательно, изменять емкость можно путем воздействия измеряемой величины либо на геометрические размеры датчика, либо на его диэлектрическую проницаемость. При этом очевидно, что датчики с изменяемыми параметрами S и ε имеют линейную статическую характеристику, а датчики с изменяемой величиной δ – нелинейную. В последнем случае для линеаризации характеристики возможно применение дифференциальных емкостных преобразователей, аналогичных по конструкции дифференциальным индуктивным датчикам.

Входными величинами емкостных датчиков могут быть линейные и угловые перемещения, механические усилия, деформации, изменение состава вещества.

Достоинства емкостных датчиков: высокая чувствительность, безинерционность, стабильность; недостаток – малая выходная мощность.

Датчики этого вида используются в аппаратуре диэлектрического каротажа ДК-1.Чувствительный элемент этой аппаратуры представляет собой цилиндрический конденсатор больших размеров, емкость которого зависит от диэлектрической проницаемости окружающих горных пород [2].

В так называемых «аквамерах» – приборах для определения количества воды в смесях «вода-нефть», откачиваемых из буровых скважин, также применяется емкостной датчик. Действие этого прибора основано на том, что у воды ε=81, а у нефти ε=2,5 отн.ед.(при температуре 18^0 С)

В некоторых скважинных термометрах используются в качестве частотозадающего элемента в схеме RC-генератора конденсаторы, емкость которых зависит от температуры.

Кроме того, известны скважинные емкостные измерители зенитного угла [25]. Их чувствительный элемент – конденсатор, одна обкладка которого представляет собой металлическую изолированную полусферу, установленную перпендикулярно оси прибора, а другая обкладка – залитую в эту сферу ртуть. При вертикальном расположении датчика емкость его максимальна, при наклоне – уменьшается.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики контактных преобразователей и приведите примеры их применения в геофизической аппаратуре (ГА).

2. Назовите основные характеристики реостатных преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

3. Назовите основные характеристики тензометрических преобразователей и приведите примеры их применения.

4.Назовите основные характеристики электролитических преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.

5. Назовите основные характеристики терморезистивных преобразователей и приведите примеры их применения в ГА.

6. Назовите разновидности и основные характеристики фоторезистивных преобразователей, приведите примеры применения их в ГА.

7. Назовите разновидности индуктивных преобразователей.

8. Поясните принцип действия индуктивных преобразователей с изменяемым воздушным зазором, приведите примеры их применения в ГА.

9. Поясните принцип действия магнитоупругих преобразователей, приведите примеры их применения в ГА.

10. Поясните принцип действия магнитомодуляционных преобразователей, приведите примеры их применения.

11. Назовите основные характеристики емкостных преобразователей и приведите примеры их применения.

3.ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА

Во всех генераторных преобразователях выходной величиной является э.д.с., появляющаяся в результате воздействия измеряемой величины.

3.1. Преобразователи индукционной э.д.с.

Эти преобразователи основаны на явлении электромагнитной индукции, возникающей при воздействии на проводник переменного магнитного поля.

Изменение магнитного поля, воздействующего на проводник или, точнее, на катушку индуктивности, достигается либо за счет перемещения катушки относительно постоянного магнита, либо за счет изменения магнитного поля при неизменном расположении магнита и катушки индуктивности.

3.1.1 Преобразователи индукционной э.д.с, со взаимным перемещением магнита и катушки индуктивности

Э.д.с., возникающая в катушке индуктивности, зависит от следующих факторов: $e=BVlW\sin\alpha$, где B – магнитная индукция; V – относительная скорость перемещения; α – угол между векторами V и B, l – длина витка и W – число витков в катушке.

Преобразователи этого вида широко используются в геофизической аппаратуре. Примером могут служить сейсмоприемники магнито-электрического типа (С210, СВ1-30 и др.), принцип действия которых иллюстрируется рис. 3.1 [3]. С корпусом приемника 1 жестко скреплен постоянный магнит 2. Над магнитом на пружинках 3 подвешена катушка индуктивности 4 с электрическими выводами 5. При колебаниях поверхности, на которой установлен сейсмоприемник, происходят взаимные перемещения магнита 2 и катушки индуктивности 4, и в последней наводится э.д.с.

Другой пример использования датчиков этого вида – автосинная (или сельсинная) передача, которая применяется в каротажных станциях для синхронизации движения носителя записи (диаграммной или магнитной ленты) с перемещением, зонда по скважине [12]. Принципиальная схема сельсинной передачи представлена на рис. 3.2. Передача содержит, по меньшей мере, две идентичных электрических машины, у которых статор имеет однофазную обмотку с явно выраженными полюсами, а ротор – трехфазную обмотку с неявно выраженными полюсами. Одна машина, называемая сельсином-

датчиком (ССД), устанавливается на блок-балансе, через который в скважину опускается кабель со скважинным снарядом. При движении кабеля по скважине блок-баланс через зубчатую передачу приводит во вращение ротор сельсина-датчика. Другая машина, называемая сельсином-приемником (ССП), устанавливается в регистрирующем приборе каротажной станции и играет роль привода его лентопротяжного механизма. Обмотки роторов ССД и ССП включены навстречу друг другу, а обмотки статоров питаются переменным током промышленной частоты от одного и того же источника. Переменный ток создает в обмотках статоров пульсирующие магнитные потоки, которые индуцируют в роторных обмотках э.д.с., зависящие от угла поворота ротора относительно статора. Если эти углы у роторов ССД и ССП одинаковы ($\alpha=\beta$), то э.д.с., в их обмотках равны и взаимно компенсируют друг друга. Токи в каждой роторной цепи равны нулю. Если эти углы не равны ($\alpha\neq\beta$), баланс э.д.с. нарушается, и в роторных обмотках возникают токи, которые создают в них магнитные поля, стремящиеся повернуть роторы до положения $\alpha=\beta$.Поскольку ротор ССД механически связан с роликом блок-баланса, находящегося под большой нагрузкой, то поворачивается все время ротор ССП, нагрузка на который меньше и который перемещает носитель записи синхронно с движением скважинного прибора. С одним и тем же ССД могут быть соединены несколько ССП, например, один в регистрирующем приборе, другой на панели лебедчика в блоке счетчика глубин.

Еще один пример применения датчиков этого вида – тахогенераторы – приборы для измерения скорости вращения [5]. В этих приборах ротор генератора вращается в поле постоянного магнита или электромагнита, а индуцируемая в нем э.д.с. выпрямляется и измеряется стрелочным или цифровым прибором. Такие тахогенераторы также используются в каротажных станциях для измерения скорости движения скважинного снаряда. Приводом ротора тахогенератора служит один из сельсинов-приемников автосинной передачи.

3.1.2. Преобразователи индукционной э.д.с. со стационарным размещением магнита и катушки индуктивности

В преобразователях этого вида изменение магнитного поля достигается за счет перемещения ферромагнитных масс в воздушном зазоре между магнитом и катушкой индуктивности. В общем случае э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока Ф и числу витков в катушке: $e=-wd\Phi/dt$.

На рис. 3.3 представлено несколько примеров применения преобразователей этого вида в геофизической аппаратуре.

В скважинном каппаметре Н. А. Иванова (рис. 3.3, а) датчик представляет собой катушку индуктивности с большим количеством витков, намотанную на постоянном стержневом магните. Когда такой датчик перемещается по стволу скважины мимо горных пород с повышенными магнитными свойствами, это вызывает изменение магнитного потока через катушку индуктивности, и в ней

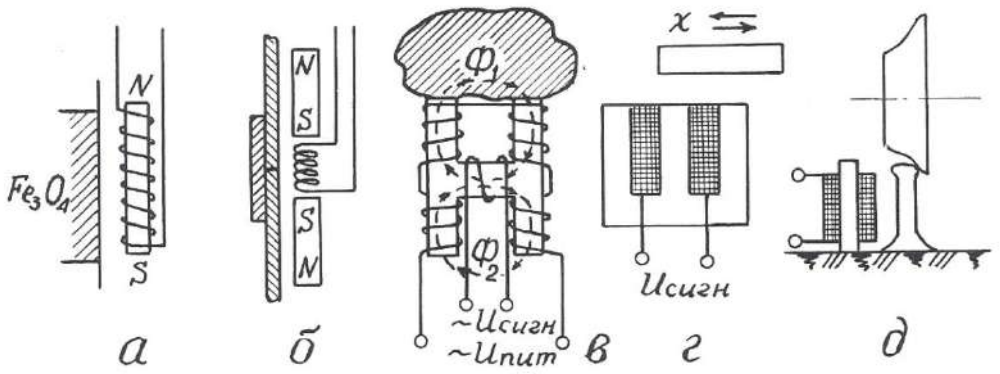


Рис. 3.3. Примеры применения преобразователей индукционной э.д.с.: а – скважинный каппаметр Н. А. Иванова; б – локатор муфт; в – лабораторный измеритель магнитной восприимчивости; г – счетчик количества; д – счетчик вагонеток

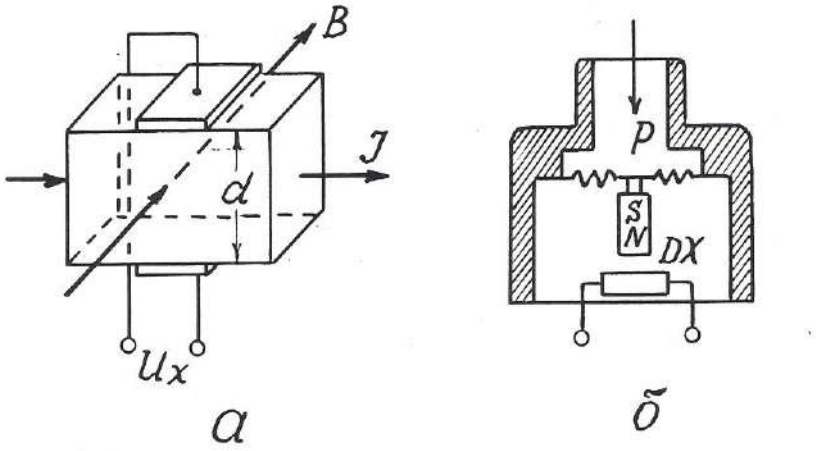


Рис. 3.4. Принцип действия преобразователя Холла (а) и его применение в манометре мембранного типа (б)

возникает э.д.с., пропорциональная магнитной восприимчивости горных пород. В наземном измерительном пульте эта э.д.с., усиливается, выпрямляется и выводится на регистрирующий прибор.

В 50-60 годах каппаметры Н. А. Иванова успешно применялись для исследования скважин на железорудных месторождениях Урала, но потом были заменены более совершенными приборами, поскольку описанный датчик имеет один явный недостаток – сигнал на его выходе зависит не только от магнитных свойств среды, но и от скорости перемещения датчика.

До настоящего времени при исследованиях обсаженных скважин применяются так называемые «локаторы муфт» – приборы, предназначенные для определения положения соединительных муфт обсадных колонн в скважинах [17].

Локатор муфт (рис. 3.3, б) содержит катушку индуктивности и два идентичных постоянных магнита, размещенных выше и ниже нее навстречу друг другу одноименными полюсами. Когда такой прибор перемещается по стальной трубе, имеющей постоянную толщину стенок, магнитные потоки верхнего и нижнего магнитов равны и в области расположения катушки

индуктивности компенсируют друг друга. Когда же прибор проходит через соединительную муфту, то из-за увеличения толщины стали сначала усиливается магнитный поток одного (верхнего), а затем другого (нижнего) магнита. В результате в катушке возникает пара разнополярных импульсов э.д.с., которые и регистрируются на диаграммной ленте.

Еще один пример применения преобразователей данного вида – измерители магнитной восприимчивости образцов горных пород (прибор ИМВ-2) [3]. Датчик измерителя (рис. 3.3, в) представляет собой «Н» – образный сердечник с четырьмя обмотками возбуждения на концах сердечника и одной измерительной обмоткой на его «перекладине». Обмотки возбуждения подключены к источнику переменного тока и соединены таким обрезом, чтобы магнитные потоки, создаваемые ими в «перекладине» сердечника, были направлены навстречу друг другу. Когда датчик находится в воздухе, эти потоки взаимно компенсируются, и сигнал в измерительной обмотке равен нулю. Когда к рабочей поверхности датчика прикладывается образец с повышенной магнитной восприимчивостью, магнитный поток, проходящий через него, увеличивается, и в измерительной обмотке наводится э.д.с., которая затем усиливается и измеряется.

Датчики данного вида находят также применение в технике как счетчики металлических предметов (рис. 3.3, г), счетчики вагонеток (рис. 3.3, д) и т.п. [5].

Общими достоинствами преобразователей индукционной э.д.с. является большая мощность выходного сигнала и отсутствие открытых электрических контактов, недостатком – наличие электромагнитного взаимодействия между магнитом и катушкой индуктивности.

3.2. Преобразователя гальваномагнитной э.д.с.

3.2.1. Преобразователи Холла

Преобразователи этого вида основаны на эффекте Холла, наблюдаемом в полупроводниках. Этот эффект проявляется в возникновении разности потенциалов U_x на обкладках датчика, по которому протекает ток I, при помещении его в магнитное поле, направленное перпендикулярно току. Принцип действия преобразователя Холла поясняется рис. 3.4.

$U_x=K_x \cdot IB/d,$ где B – магнитная индукция; d – толщина датчика; K_x – коэффициент Холла, зависящий от характеристики материала и размеров датчика. Эффект Холла наблюдается в таких полупроводниковых материалах, как антимонид индия (InSb), арсенид индия (InAs), арсенид галлия (GaAs), арсенид-фосфат индия ($InAs_{0,8}P_{0,2}$) и др. Чистые полупроводники германий и кремний имеют очень высокое значение коэффициента Холла, но весьма чувствительны к режиму работы.

Датчики Холла используются для измерения перемещений, давления, числа оборотов и скорости вращения.

Достоинство датчиков: высокая чувствительность; недостатки: потребность во внешнем источнике питания, высокое выходное сопротивление и необходимость в высоком внутреннем сопротивлении источника питания, наличие четырех выводов.

В геофизической аппаратуре датчики Холла могут быть использованы для улавливания магнитных меток на каротажном кабеле (патент США № 4709208) или для измерения давления (рис. 3.4, б).

Отечественная приборостроительная промышленность выпускает микросхемы серии К1116 с датчиками Холла для магнитного управления электрическими цепями [16].

3.2.2. Преобразователи Виганда

Магнитобистабильный преобразователь Виганда состоит из специально обработанной проволоки из сплава викаллой (ванадий-10%, кобальт-52%, железо-38%) небольшого диаметра (около 0,3 мм), на которую нанесена

обмотка индуктивности (рис. 3.5). При помещении датчика в магнитное поле в момент превышения напряженностью поля определенного порога направление намагниченности сердечника катушки спонтанно меняется, и в катушке возникает импульс напряжения длительностью около 20 мкс. При длине датчика 15 мм и числе витков w=1300 выходное напряжение достигает 2,5 В [6].

Достоинства датчиков Виганда: большой выходной сигнал, отсутствие внешнего питания, широкий температурный диапазон (от - 196 до + 175° С), искробезопасность.

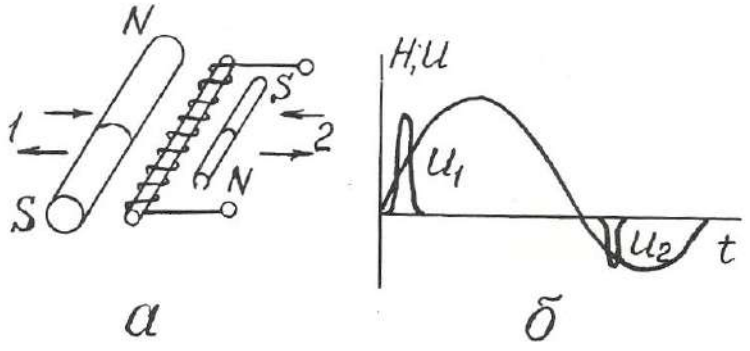


Рис. 3.5. Устройство преобразователя Виганда (а) и осциллограмма его выходного сигнала (б)

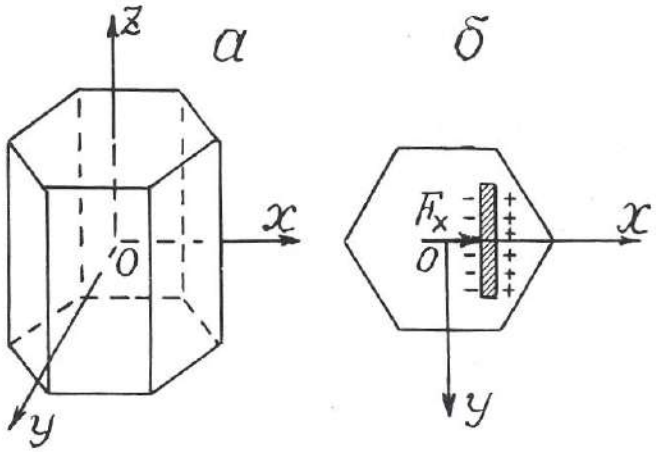


Рис. 3.6. Основные оси кристалла кварца (а) и возникновение пьезоэ.д.с. на кварцевой пластине (б)

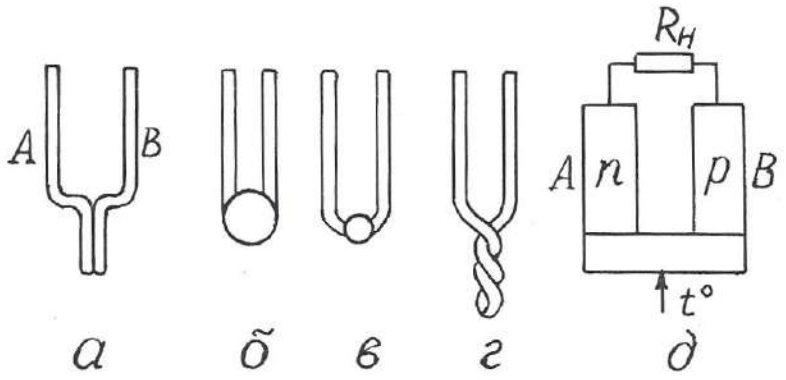


Рис. 3.7. Преобразователи термоэ.д.с. металлические (а-г) и полупроводниковые (д)

Ввиду того, что датчики Виганда были разработаны сравнительно недавно, в конце 80-х годов, они пока еще не используются в геофизической аппаратуре, хотя и могли бы найти применение, например, в магнитных меткоуловителях, устройствах блокировки, каротажных станций и других приборах.

3.3. Преобразователи пьезоэ.д.с.

Действие пьезопреобразователей основано на пьезоэлектрическом эффекте, который возникает в результате взаимосвязи между механическим и электрическим состоянием некоторых диэлектрических материалов, называемых **пьезоэлектриками**.

Различают **прямой пьезоэффект**, заключающийся в возникновении электрических зарядов на гранях кристаллов пьезоэлектриков под действием механических напряжений и исчезновении их после снятия нагрузки, и **обратный пьезоэффект**, проявляющийся в изменении формы и размеров пьезоэлектриков под действием электрического поля.

Способность к пьезоэффекту характеризуется пьезоэлектрической постоянной (пьезомодулем), величина которой определяется электрическим зарядом в Кл, возникающим вод действием внешней силы в 1 Н: $K_{пэ}=Q/F$.

Наиболее сильно пьезоэффект выражен у сегнетоэлектриков – веществ с аномально высокой диалектрической проницаемостью. К ним относиться сегнетовая соль, кварц, турмалин, титанат бария и некоторые другие вещества.

Самая высокая пьезоэлектрическая постоянная у сегнетовой соли ($C_4H_4O_6KNa$): $K_{пэ}=300\cdot10^{-12}$ Кл/Н; у титана бария ($BaTiO_3$) $K_{пэ}= 100\cdot10^{-12}$ Кл/Н; у кварца $K_{пэ}=2{,}1\cdot10^{-12}$ Кл/Н.

Основные свойства пьезоэлектрических датчиков рассмотрим на примере кварца. Кристалл кварц имеет главную оптическую ось *z*, нейтральную или механическую ось *y*, и электрическую ось *x* (рис.3.6). Максимальный пьезоэффект наблюдается при воздействии механических нагрузок вдоль электрической оси *x*, поэтому пластины для пьезопреобразователей вырезают из кристаллов кварца перпендикулярно оси *x*.

Возникновение пьезоэффекта объясняется тем, что под действием механических сил происходит смещение электрических зарядов – одна область кристалла заряжается положительно, другая – отрицательно.

Достоинства преобразователей этого вида: безынерционность, линейная статическая характеристика, высокая собственная частота, малые габариты; недостатки: утечка зарядов с течением времени, необходимость гидроизоляции.

Применяются пьезопреобразователи для измерения динамических нагрузок, деформаций, перемещений.

В геофизической аппаратуре пьезопреобразователи используются в качестве приемников упругих колебаний в скважинных приборах акустического каротажа (СПАК-2, СПАК-4, СПАК-6 и др.). Такой пьезоэлектрический сейсмоприемник изготавливается в виде полой сферы из пьезокерамики, внутренняя и внешняя поверхности которой имеют серебряное покрытие для облегчения снятия с них электрических зарядов. От промывочной жидкости в скважине сейсмоприемник отделен слоем резины [2,17].

В полевой геофизике существует сейсмоэлектрический метод разведки, который заключается в возбуждении с помощью взрыва пьезоэффекта на

кристаллах естественных пьезоэлектриков в условиях их коренного залегания и в измерении этого эффекта с помощью системы электродов [3].

В быту пьезопреобразователи используются в качестве звукоснимателей в электропроигрывателях, в зажигалках для газовых плит (прямой пьезоэффект), в звукоизлучателях электронных часов и ПЭВМ (обратный пьезоэффект) [22].

3.4. Преобразователи термоэ.д.с.

Преобразователи этого вида основаны на термоэлектрическом эффекте, заключающемся в том, что в цепи из двух разнородных проводников при поддержании разных температур в точках их соединения возникает э.д.с., пропорциональная разнице этих температур (эффект Зеебека) [22].

Термоэлектрические преобразователи называют термопарами а проводники А и В, из которых они состоят – термоэлементами (рис. 3.7).

Один **чувствительный спай** термоэлементов подвергают воздействию измеряемой температуры, температуру другого, **опорного**, поддерживают постоянной.

Чувствительность термопреобразователей составляет от 5 до 60 мкВ/К.

Наибольшую чувствительность имеют термопары, составленные из двух полупроводников с различной (электронной и дырочной) природой проводимости.

Достоинства термопреобразователей: отсутствие источников питания, линейная статическая характеристика, большой диапазон измеряемых температур; недостаток: малая мощность сигнала отдельной термопары.

В геофизике используются металлические термопреобразователи в качестве термометров для исследования скважин на месторождениях парогидротерм, полупроводниковые – в качестве датчиков в полевой терморазведке.

В технике термопары используются в системах автоматического регулирования температуры в различных металлургических процессах. В годы

Великой Отечественной войны выпускались батареи полупроводниковых термопреобразователей, которые надевались на стекло керосиновой лампы и вырабатывали электроэнергию, достаточную для питания лампового приемника или рации.

3.5. Преобразователи фотоэ.д.с.

В этих преобразователях используются два полупроводника с разным характером проводимости (рис. 3.8, а). На их контакте происходит взаимная диффузия электронов в *p*-полупроводник, дырок – в *n*-полупроводник. Дырки рекомбинируют с электронами, в результате на контакте полупроводников образуется тонкий запирающий слой – «*p*-*n*-переход». Такие преобразователи могут работать в режиме источника тока и фотодиода.

При отсутствии светового облучения через такой преобразователь проходит очень небольшой, так называемый «темновой ток», соответствующий обратному току диода. При световом облучении *p*-*n* -перехода кванты света образуют добавочные носители тока.

Под действием разности потенциалов потенциального барьера *p*-*n*-перехода электроны перемещаются в зону *n*-полупроводника, а дырки – в зону *p*-полупроводника, создавая фотоэ.д.с., на выводах прибора. На рис. 3.8, а электроны и дырки, прошедшие через *p*-*n*-переход в результате диффузии и создавшие потенциальный барьер *p*-*n*-перехода, условно обозначены как «+» и «-» без кружочков. Добавочные дырки и электроны, возникшие под действием облучения, показаны как «+» и «-» в кружочках. Стрелками показано направление действующих на них сил поля *p*-*n*-перехода.

На рис. 3.8, б показан разрез германиевого фотодиода, состоящего из пластины германия 1 с проводимостью *n*-типа, которая сплавлена с индием 2 (проводимость *p*-типа). Толщина слоя германия над индием настолько мала, что кванты света свободно проникают через него в зону *p*-*n*-перехода. Корпус 3 выполнен из оргстекла и залит компаундом 4.

Спектральные характеристики фотопреобразователей зависят от используемых в них материалов.

Интегральная чувствительность германиевых фотопреобразователей имеет наибольшее значение $K_{диф}=\Delta I/\Delta\Phi=20$ мА/лм. Э.д.с. фотогенераторов не превышает 0,12-0,5 В.

Преобразователи фотоэ.д.с. изготавливаются из кремния, селена, сернистого таллия и сернистого серебра. Достоинством селеновых фотопреобра-

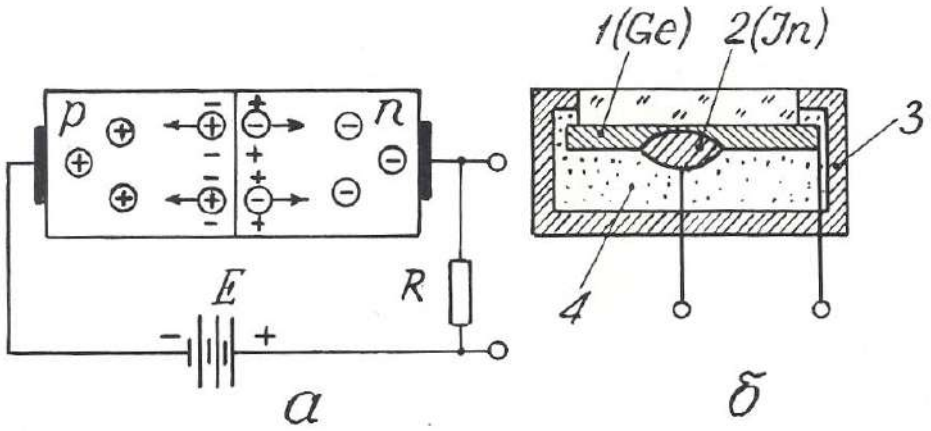


Рис. 3.8. Преобразователь фотоэ.д.с.: принцип действия (а) и конструкция (б)

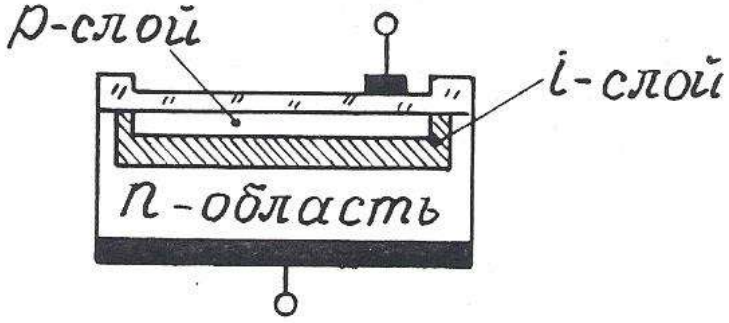


Рис. 3.9. Структура *pin*-диода

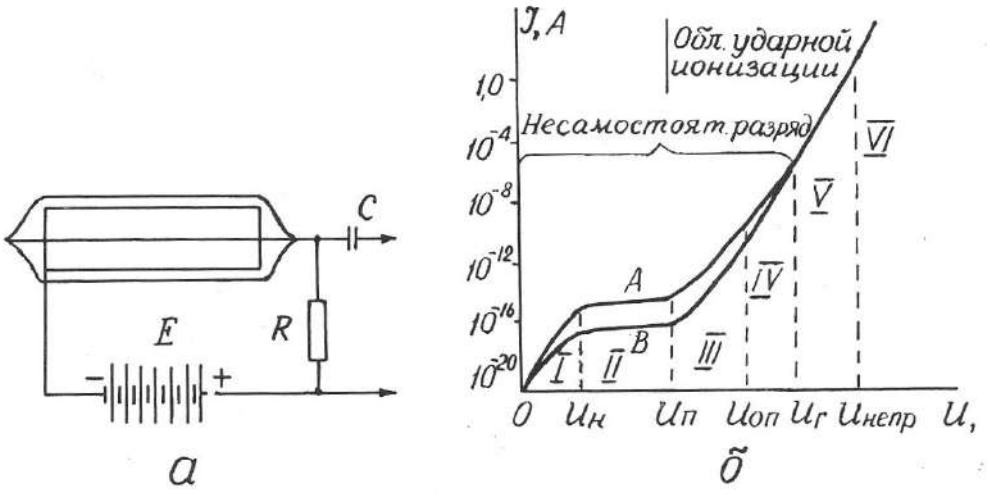


Рис. 4.1. Устройство газоразрядного счетчика (а) и его вольт-амперная характеристика (б): А – β-частица; В – γ-квант

зователей является их спектральная чувствительность, близкая к чувствительности человеческого глаза.

Для увеличения количества дополнительных носителей, образующихся в *p-n*-переходе под действием светового облучения, между *p* и *n*-полупроводниками располагают дополнительный слой нелегированного высокоомного кремния (*i*-слой) – рис. 3.9. Такие фотоэлектрические приборы носят название *pin*-диодов. Область применения их в геофизической аппаратуре та же, что и фоторезистивных датчиков (см. раздел 2.1.7).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные характеристики преобразователей индукционной э.д.с., их разновидности и приведите примеры их применения в технике и геофизической аппаратуре (ГА).

2. Поясните принцип действия датчика Холла и объясните его устройство (рис. 3.4, а).

3. Поясните принцип действия и устройство датчика Виганда (рис. 3.5).

4. Поясните принцип действия преобразователей пъезоэ.д.с. и приведите примеры их применения в ГА.

5. Поясните принцип действия преобразователей термоэ.д.с. и приведите примеры их применения в технике и ГА.

6. Поясните принцип действия преобразователей фотоэ.д.с. и приведите примеры их применения.

4. РАДИАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящем пособии будут рассмотрены только те радиационные преобразователи, которые преобразуют энергию ядерного излучения в электрический сигнал. Эти преобразователи называются также детекторами радиоактивных излучений. Они бывают трех видов: газоразрядные, сцинтилляционные и полупроводниковые.

4.1. Газоразрядные детекторы

В газоразрядном детекторе происходит непосредственное преобразование энергии радиоактивного излучения в электрические импульсы.

Газоразрядный детектор представляет собой металлический цилиндр, по оси которого натянута тонкая металлическая нить. Цилиндр играет роль катода и подключается к «минусу» источника постоянного напряжения, нить (анод) – к «плюсу». И нить, и цилиндр могут быть помещены в стеклянный баллон (рис. 4.1, а). Полость детектора заполнена газом под низким давлением (примерно – $1{,}5 \cdot 10^4$ Па). При прохождении через детектор нейтроны и гамма-кванты взаимодействуют с атомами вещества его катода и газового наполнителя, вызывая ионизацию газа и, как следствие, прохождение кратковременного импульса тока, сила I которого зависит от напряжения U между электродами. При схеме включения детектора, изображенной на рис. 4.1, а, на нагрузочном сопротивлении R импульс тока создает отрицательный импульс напряжения, который через разделительный конденсатор C подается на усилительно-регистрирующую схему [13].

Зависимость $I=f(U)$ или вольт-амперная характеристика счетчика приведена на рис. 4.1, б. В ней выделяются шесть областей, отличающихся по механизму переноса ионов в электрическом поле счетчика. В области I при

малых напряжениях на электродах ток возрастает пропорционально напряжению, т.к. с ростом напряжения уменьшается количество рекомбинирующихся ионов и все большее их количество достигает электродов счетчика. Эта область (от 0 до $U_н$) называется **омической**. Начиная с некоторого значения $U_н$, ток достигает насыщения (все ионы долетают до анода и катода) и перестает возрастать. Величина ионизационного тока во II области (от $U_н$ до $U_п$) определяется только количеством ионов, образующихся в единицу времени. Преобразователи, работающие в этой области, носят название **ионизационных камер**. При дальнейшем, свыше $U_п$ росте напряжения, несмотря на постоянство начальной ионизации, происходит рост тока в импульсе. Это связано с возникновением ударной ионизации, при которой электроны, образующиеся при первоначальном воздействии радиации, ускоряются электрическим полем счетчика настолько, что начинают ионизировать молекулы газового наполнителя. Отношение числа ионов, достигших анода счетчика, к числу первичных ионов, созданных регистрируемой частицей (или гамма-квантом), называется **коэффициентом газового усиления**. Величина его зависит от приложенного напряжения.

С возникновением ударной ионизации вначале ток возрастает пропорционально напряжению на электродах (область пропорциональности III от $U_п$ до $U_{оп}$), здесь отмечается относительно невысокий коэффициент газового усиления (до 10^4), а при дальнейшем увеличении U пропорциональность нарушается и от $U_{оп}$ до $U_г$ следует IV область – **ограниченной пропорциональности**. За ней идет область Гейгера (V), в которой амплитуда импульса не зависит от начальной ионизации. Коэффициент газового усиления достигает 10^8-10^9 и продолжает увеличиваться с ростом напряжения. За областью Гейгера следует область **непрерывного разряда** (VI), для возникновения которого не нужна первичная ионизация, достаточно к электродам счетчика приложить напряжение, превышающее $U_{непр}$.

Области V и VI – это области самостоятельного разряда, который не требует для своего поддержания внешних источников ионизации.

Газоразрядные детекторы, применяемые в геофизической аппаратуре, работают либо в пропорциональной области (пропорциональные счетчики), либо в области Гейгера (счетчики Гейгера-Мюллера).

Пропорциональные счетчики используются для измерения плотности потока тепловых нейтронов. Баллон счетчика заполняется трехфтористым бором (BF_3), обогащенным до 96 % изотопом B-10, имеющим большое сечение захвата тепловых нейтронов. При захвате нейтрона происходит реакция B (n,α) Li, α – частица производит первичную ионизацию в объеме счетчика. Для измерений нейтронов надтепловых энергий счетчик окружают сначала слоем водородсодержащего вещества, например, парафина, а затем тонким (около 0,5 мм) слоем кадмия. Кадмий поглощает тепловые нейтроны, а надтепловые в парафине замедляются до тепловых энергий и затем фиксируются счетчиком.

Счетчик Гейгера-Мюллера применяется для регистрации гамма-квантов. Он заполняется инертным газом (аргоном или гелием) с добавкой паров высокомолекулярных органических соединений (этилового спирта или этилового эфира) или галогенов (хлора, брома). Такая добавка способствует гашению непрерывного разряда, т.к, положительные ионы, образовавшиеся из молекул инертного газа, нейтрализуются при столкновениях с молекулами высокомолекулярного соединения или галогена и не вызывают вторичной электронной эмиссии с катода.

После регистрации каждой ионизирующей частицы газоразрядный счетчик не способен в течение некоторого «мертвого времени» $\tau_м$ (порядка 10^{-4} с) отмечать попадание следующей частицы или реагирует на нее образованием импульса пониженной амплитуды («время восстановления» – $\tau_в$). Величина «мертвого времени» и «времени восстановления» определяет разрешающую способность и эффективность преобразователя.

Разрешающей способностью преобразователя называют максимальное количество ионизирующих частиц N_{max}, которые могут быть уверенно зафиксированы преобразователем $N_{max}=I/(\tau_м+\tau_в)$.

Под **эффективностью счетчика** понимают отношение числа частиц, зарегистрированных счетчиком, к общему числу частиц, прошедших через объем счетчика. Эффективность газоразрядных счетчиков зависит от их конструкции, размеров и материала катода и обычно не превышает нескольких процентов.

Основной рабочей характеристикой газоразрядного преобразователя является его **счетная характеристика** – зависимость числа импульсов на его выходе от напряжения на электродах при постоянной интенсивности ионизирующего облучения (рис. 4.2). Участок *ав* в пределах которого выбирается рабочее напряжение счетчика $U_{раб}$, называется **плато**. Протяженность плато составляет от 200 до 300 В, а наклон – от 3 до 15 % на 100 В.

Достоинства газоразрядных детекторов: большая амплитуда сигнала, малая потребляемая мощность, широкий температурный диапазон; недостатки: потребность в источнике питания с высоким напряжением, ограниченный ресурс, для счетчиков Гейгера-Мюллера – независимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения.

Газоразрядные счетчики очень широко применялись во всех разновидностях геофизических радиометров: полевых, каротажных, автомобильных и самолетных [3,12]. В последнее время они в значительной мере вытеснены более эффективными сцинтилляционными детекторами.

4.2 Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный радиационный преобразователь (рис. 4.3) состоит из люминофора 1 (оптически прозрачного вещества, люминесцирущего под действием ядерного излучения), и фотоэлектронного умножителя 2 (ФЭУ).

В результате действия попавшей в сцинтиллятор элементарной частицы (или гамма-кванта) часть атомов сцинтиллятора переходит в возбужденное состояние. Обратный переход их в нормальное состояние сопровождается кратковременной (порядка 10^{-7}-10^{-9}с) световой вспышкой. Фотоны света

преобразуются в электрический сигнал с помощью ФЭУ, который представляет собой комбинацию фотоэлемента с электронным усилителем. Фотоны из сцинтиллятора 1 выбивают из фотокатода ФЭУ 3 электроны, которые под действием электрического поля устремляются к ближнему диноду 4, имеющему положительный потенциал. Вследствие вторичной электронной

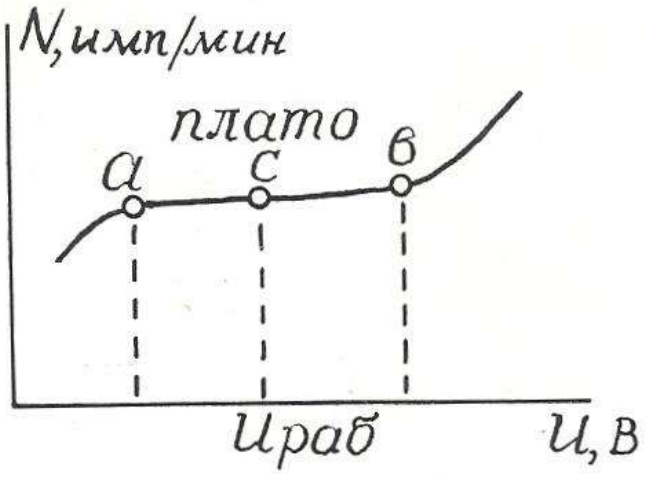


Рис. 4.2. Счетная характеристика газоразрядного счетчика Гейгера – Мюллера

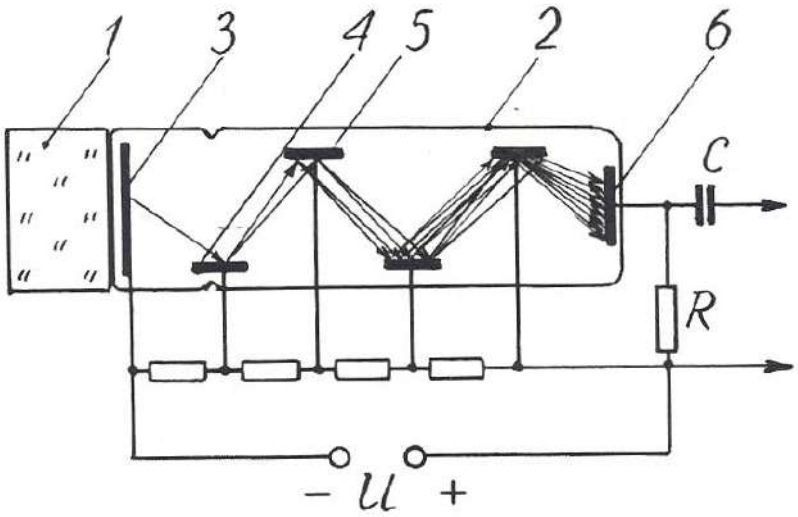


Рис. 4.3. Устройство сцинтилляционного преобразователя: 1 – кристалл-сцинтиллятор; 2 – фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 3 – фотокатод; 4 – первый динод; 5 – второй динод; 6 – анод (ФЭУ)

эмиссии каждый электрон "выбивает из динода вторичные электроны, которые притягиваются следующим динодом 5, имеющим более высокий потенциал, и также вызывают вторичную электронную эмиссию. Процесс развивается лавинообразно, в результате попаданию каждой ионизирующей частицы в кристалл-сцинтиллятор соответствует прохождение импульса тока между анодом 6 и катодом 1 ФЭУ, причем амплитуда этого импульса пропорциональна энергии ионизирующей частицы.

Эффективность сцинтилляционных детекторов намного выше, чем у газоразрядных, и достигает 20 %.

В качестве сцинтилляторов для регистрации гамма-квантов в геофизический аппаратуре используют монокристаллы соединений NaI, CsI, KI, активированных таллием (Tl), а для регистрации нейтронов – кристаллы сернистого цинка ZnS с добавками серебра или меди. Примесь активатора (Tl, Ag, Cu) в люминофоре способствует созданию в решетках кристаллов-сцинтилляторов дополнительных центров люминесценции [13].

Счетная характеристика сцинтилляционных преобразователей имеет плато очень небольшой протяженности, вследствие чего эти преобразователи требуют питания высокостабилизированным напряжением.

Преимущества сцинтилляционных преобразователей перед газоразрядными: высокая эффективность, большая разрешающая способность, зависимость амплитуды выходного сигнала от энергии ионизирующего излучения, что позволяет изучать энергетический спектр последнего.

Эти преимущества обеспечивают широкое распространение детекторов этого вида в разнообразных радиометрах: полевых (СРП-68-02), скважинных (ДРСТ-3, Кура-2м и др.), самолетных (АСГМ-46 и др.).

К недостаткам сцинтилляционных детекторов можно отнести низкую термостойкость и термостабильность, что требует их термостатирования в скважинных радиометрах [9].

4.3. Полупроводниковые детекторы

Полупроводниковые детекторы (ППД) устроены и действуют совершенно аналогично преобразователям фотоэ.д.с., рассмотренным в разделе 3.5. Отличие заключается только в том, что в ППД образование свободных носителей в зоне *p*-*n*-перехода происходит за счет действия не фотонов света, а ионизирующего ядерного излучения.

Амплитуда импульса на выходе ППД пропорциональна числу носителей зарядов, образованных ионизирующей частицей, а следовательно, ее энергии, что дает возможность изучать энергетический спектр излучения.

Для создания *i*-слоя в ППД используют литий, обладающий высоким коэффициентом диффузии, который добавляют в торец полупроводника с *p*-проводимостью.

Преимущества полупроводниковых детекторов: экономичность питания, весьма малые размеры и хорошее амплитудное разрешение (в 20-30 раз лучше, чем у сцинтилляционных преобразователей).

Однако их распространение ограничено. Это связано, во-первых, со сравнительно небольшими размерами чувствительной части детектора, и во-вторых, с необходимостью охлаждения детектора до низких температур (от -100 до -196^0), которое повышает их эффективность.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют преобразователи ядерных излучений в электрический сигнал?

2. Объясните устройство газоразрядного преобразователя.

3. Объясните вольт-амперную характеристику (рис. 4.1, б) газоразрядного детектора.

4. Чем отличаются счетчики Гейгера-Мюллера от пропорциональных счетчиков?

5. Объясните устройство и работу сцинтилляционного детектора.

6. Назовите преимущества сцинтилляционных детекторов перед газоразрядными.

7. Объясните устройство и работу полупроводникового детектора, укажите его достоинства и недостатки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А*. Измерительная техника: Учебн. пособие для техн. вузов. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

2. *Аппаратура и оборудование для геофизических исследований нефтяных и газовых скважин:* Справочник /А. А.Молчанов, В. В. Лаптев, В. М. Моисеев, Р. С.Челокьян. – М.: Недра, 1987. – 263 с.

3. *Бондаренко В. М., Демура Г. В., Ларионов А. М.* Общий курс геофизических методов разведки: Учебн. пособие для техникумов. – П.*:* Недра, 1986. – 453 с.

4. *Бриндли К*. Измерительные преобразователи: Справочное пособие / Пер.с англ. – М.:Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

5. *Бухгольц В. П.* Датчики и реле автоматического контроля в горной промышленности. – М.: Недра, 1971. – 224 с.

6. *Виглеб Г.* Датчики / Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.

7. *Енохович А. С.* Краткий справочник по физике. – М.: Высшая школа, 1976. – 288 с.

8. *Зачиевский Т., Мальзахер С., Квецинский А.* Промышленная электроника / Пер.с польского. – М.; Энергия, 1976. – 640 с.

9. *Зельцман П. А.* Конструирование аппаратуры для геофизических исследований скважин. – М.: Недра, 1968. – 180 с.

10. *Зимодро А. Ф., Скибинский Г. Л.* Основы автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

11. *Квартин М. И.* Электромеханические и магнитные устройства автоматики и их расчет. – М.: Высшая школа, 1973. – 344 с.

12. *Кривко Н. Н., Шароварин В. Д., Широков В. Н.* Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование: Учебн. пособие для вузов. – М.: Недра, 1981. – 280 с.

13. *Ларионов В. В.* Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.

14. *Левшина Е. С., Новицкий П. В.* Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. – Л.: Энергоатомиздат, 1983.

15. *Литвак В. И.* Тензореле. Расчет, конструирование, применение. – М.: Машиностроение, 1989. – 160 с.

16. *Логинов В. И.* Электрические измерения механических величин / Изд. 2-е, доп. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.

17. *Померанц Л. И., Белоконь Д. В., Козяр В. Ф.* Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин: Учебн. пособие для техникумов. – М.: Недра, 1985. – 271 с.

18. *Сковородников И. Г., Калашников В. Н.* Дистанционный уровнемер для испытательных скважин // Геофизическая аппаратура. Вып.89. – Недра, 1988. – С. 98-103.

19. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Газожидкостный расходомер РГЖ-Г: Техническое описание. – Свердловск: СГИ, 1988. – 15 с.

20. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Изучение скорости и направления движения подземых вод // Гидрогеология и инж. геология: Обзор / ВНИИ экон. минер. сырья и геологоразв. работ. – М.,1987. – 33 с.

21. *Сковородников И. Г., Макаров Л. В., Калашников В. Н.* Скважинные тахометрические расходомеры / СГИ. – Свердловск, 1989. – 65 с. – Деп. в ВИНИТИ, №7609-В89, 1989.

22. *Справочник по средствам автоматики* / Под ред. В. Э. Низэ, И.В.Антика. – М.: Энергоиздат, 1983. – 504 с.

23. *Электрические измерения неэлектрических величин* / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др.; Изд. 5-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1975. – 676 с.

24. А. с. 491895. Зонд для измерения направления и скорости движения грунтовых вод /Б. Н. Халтурин, В. С. Лившиц // Бюл. изобр. – 1975, №42.

25. А. с. 1063990. Емкостной датчик зенитного угла / О. В.Фомин // Бюл. изобр. – 1983, № 48.

26. А. с. 1158750. Скважинный уровнемер (его варианты) / В. Н. Калашников, И. Г.Сковородников // Бюл. изобр. – 1985, № .20.

27. А. с. 1509518. Датчик угла наклона буровой скважины / А. В. Давыдов, И. Г. Сковородников // Бюл. изобр. – 1989, № 35.

МИНОБРНАУКИ РФ
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

Суставов О. А. Минералогия и петрография. Учебно-методическое пособие по дисциплине для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург: Изд-во УГГУ

В пособии даются сведения о морфологии, химическом составе и свойствам наиболее распространенных минералов, рассматриваются главные магматические, осадочные и метаморфические горные породы. В связи с нефтегазовым профилем специализаций НФ, ГИС, ГИН, РФ, ТТР особое внимание уделено осадочным породам и условиям их образования. Излагаются данные, необходимые для макроскопической диагностики наиболее распространенных минералов и горных пород. Приводится рекомендуемая литература, контрольные задания и контрольные вопросы по рассматриваемой дисциплине. Пособие может быть использовано при проведении аудиторных лабораторных занятий и для самостоятельной работы студентов.

Рецензент – Е. В. Коророва, ст. преподаватель кафедры литологии и геологии горючих ископаемых УГГУ

© Суставов О. А.
© Уральский государственный горный университет

ОГЛАВЛЕНИЕ

МИНЕРАЛОГИЯ 4
КРИСТАЛЛЫ МИНЕРАЛОВ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ 4
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ 6
СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ 6
СИСТЕМАТИКА МИНЕРАЛОВ 12
Простые вещества 12
Сернистые соединения 13
Оксиды и гидроксиды 13
Галоиды 13
Соли кислородных кислот 13
Силикаты 13
НЕКОТОРЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МИНЕРАЛОВ . 15
Литература 211
Контрольные задания 21
Контрольные вопросы ..... **Ошибка! Закладка не определена.**2

ПЕТРОГРАФИЯ 23
1. МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ 244
Плутонические (интрузивные) породы 288
Вулканические (эффузивные) породы 29
Плотность магматических пород 32
Литература 33
Контрольные вопросы 33
2. ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ 344
Стадии образования осадочных пород 344
Обломочные породы 39
Глинистые породы 422
Хемогенные и биогенные породы 455
Осадочные фации и формации 49
Словарь 53
Литература 54
Контрольные вопросы 54
3. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ 55
Регионально-метаморфические породы 55
Метасоматические породы 59
Литература 60
Контрольные вопросы 60

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 62

МИНЕРАЛОГИЯ

Минералогия занимается изучением свойств, состава и условий образования минералов. Минерал – химический элемент или химическое соединение, обычно кристаллическое, которое образуется в результате геологических процессов. Именно из минералов состоят объекты исследования геологов и геофизиков. Это одна из старейших и главных наук гелогического цикла. Она тесно связана с кристаллографией, физикой и химией. Из них минералогия черпает основные представления о внутреннем атомарном строении минералов, о законах роста и огранения кристалов, о химических реакциях, возможных при образовании минералов.

КРИСТАЛЛЫ МИНЕРАЛОВ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АГРЕГАТЫ

Кристаллы – твердые тела, обладающие упорядоченной атомной структурой и имеющие вследствие этого при определенных условиях форму многогранников.

Признаки кристаллического вещества

Однородность – в любых участках кристаллического вещества все его свойства тождественны.

Анизотропия – зависимость свойств от направления. В кристаллах свойства неодинаковы в непараллельных направлениях (и одинаковы по параллельным направлениям). Например, твердость одной и той же грани в разных направлениях различна. В некоторых случаях это различие можно заметить, царапая в разных направлениях грань кристалла (дистен). Кроме того, неодинакова и твердость разных граней и срезов одного и того же кристалла.

Симметрия – закономерная повторяемость в расположении отдельных частей кристалла на плоскости или в пространстве.

Образование кристаллов

Кристаллы минералов могут возникать в газовой, жидкой и твердой среде.

Жидкие среды минералообразования: *магма* – высокотемпературный раствор-расплав, *водные растворы* – гидротермальные и поверхностные (грунтовые, карстовые, почвенные, озерные, морские воды).

Кристаллы зарождаются и начинают расти при достижении критического пересыщения среды веществом будущих кристаллов. Это часто происходит в результате падения температуры (кристаллизация магматических расплавов) или за счет испарения растворителя (при испарении рассолов в озерах и лагунах кристаллизуются галит, сильвин, гипс, ангидрит). Примером

кристаллизации в твердой среде является рост ограненных кристаллов пирита и других минералов внутри горных пород.

После своего возникновенияния кристаллы минералов в ходе геологической истории могут подвергаться различным преобразованиям, в том числе:

механическим деформациям (хрупким – дроблению с образованием обломков кристаллов, или пластическим – например, сплющиванию, изгибанию и т. п.);

химическим изменениям – например, на месте пирита FeS_2 при выветривании может возникать лимонит $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$;

радиогенным изменениям – например, кварц под действием радиоактивного облучения нередко приобретает дымчатую окраску.

Облик кристаллов

Облик – общий вид кристалла минерала; характеризует развитие кристалла (ограненного или неограненного) по трем взаимно перпендикулярным направлениям:

1) изометрический - примерно одинаковые размеры по трем взаимно перпендикулярным направлениям (кристаллы пирита, граната);

2*)* вытянутый по двум направлениям - таблитчатый, пластинчатый, чешуйчатый (кристаллы слюды);

3) вытянутый в одном направлении - столбчатый, призматический, игольчатый, волокнистый, шестоватый (кристаллы актинолита, турмалина).

Строение минеральных агрегатов

Минералы чаще встречаются не отдельными кристаллами, а образуют различные скопления, называемые минеральными агрегатами.

По величине зерен агрегаты подразделяются на ***плотные*** (зерна на глаз неразличимы), ***мелкозернистые*** (зерна менее 1 мм, но различимы на глаз), ***среднезернистые*** (1-5 мм), ***крупнозернистые*** (5-20 мм), ***гигантозернистые*** (зерна крупнее 20 мм в поперечнике).

По форме выделяют ***чешуйчатые, игольчатые, шестоватые, волокнистые*** агрегаты. Шестоватые агрегаты состоят из вытянутых кристаллов, расположенных параллельно или почти параллельно друг другу.

Кроме того, выделяют:

друзы - совокупности кристаллов, прикрепленных к общему основанию;

конкреции - образования округлой формы, иногда радиально-лучистого строения, рост которых происходил от центра к периферии;

жеоды (например, жеода лимонита у входа в ИГГ);

натечные агрегаты - образуются за счет обволакивания стенок пустот минеральным веществом с образованием гроздьевидных, сталактитовых, почковидных форм.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

Минералы не являются химически чистыми веществами. В них всегда входят различные структурные химические примеси. В некоторых минералах количество таких примесей незначительно – их называют минералами постояного состава (например, кварц, пирит, галит), тогда как в большинстве минералов содержание примесей достаточно высокое и непостоянное – это минералы переменного состава.

Изоморфизм – способность химических элементов (атомов, ионов) замещать друг друга в минералах.

Изовалентный изоморфизм – взаимное замещение ионов одинаковой валентности.

Например, в кристаллической структуре оливина $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ ионы Mg^{2+} могут замещаться на ионы Fe^{2+}. Здесь замещение Mg^{2+} на Fe^{2+} происходит в любых количественных соотношениях – *совершенный,* или *неограниченный* изоморфизм. Минерал оливин можно представить как *изоморфную смесь* $Mg_2[SiO_4]$ и $Fe_2[SiO_4]$.

При *ограниченном* изоморфизме (например, в рубине – разновидности корунда Al_2O_3, в которой 0,05 % ионов Al^{3+} замещено на Cr^{3+}) замещающий элемент (в данном случае Cr) называется *изоморфной примесью*.

От вхождения изоморфных примесей зависят свойства минералов: например, чистый сфалерит ZnS прозрачен и бесцветен, а при частичном замещении Zn^{2+} на Fe^{2+} минерал приобретает бурый цвет. В сфалерите могут быть различные изоморфные примеси, в том числе, например, нередко имеется изоморфная примесь индия. Поэтому при обнаружении сфалеритовых руд их нужно опробовать на индий, который из этих руд в основном и добывается.

Гетеровалентный изоморфизм – взаимное замещение ионов разной валентности. Осуществляется с сохранением электронейтральности (сумма зарядов замещаемых ионов должна быть равна сумме зарядов замещающих ионов). Например, в плагиоклазах имеет место совершенный гетеровалентный изоморфизм с замещением $Na^{1+}+Si^{4+}$ на $Ca^{2+}+Al^{3+}$. В связи с этим плагиоклазы представляют собой изоморфные смеси альбита $Na[AlSi_3O_8]$ и анортита $Ca[Al_2Si_2O_8]$.

Аметист – разновидность кварца SiO_2, в котором доли процента атомов Si^{4+} замещены на $Fe^{3+}+K^{1+}$ (несовершенный гетеровалентный изоморфизм).

СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ

Плотность

Чем больше атомные веса химических элементов, слагающих минерал, тем обычно больше плотность минерала - тяжелые минералы состоят из элементов, располагающихся в нижней части таблицы Д. И. Менделеева.

Грубая оценка плотности состоит в отнесении минерала к одной из категорий - легких (плотность менее 2,5 г/см^3), средних (2,5-4 г/см^3) или тяжелых (более 4 г/см^3). Такое определение требует навыка и производится прикидкой на руке тяжести данного минерала по сравнению с каким-либо известным. Для этого нужно, чтобы образец был достаточно крупным и состоял в значительной своей части из испытуемого минерала.

Определение плотности крупных образцов минералов может проводиться методом гидростатического взвешивания. При этом образец подвешивается к коромыслу весов на тонкой нити и производится определение массы образца на воздухе и в воде (образец на нити опускается в емкость с водой). Величина плотности минерала вычисляется как отношение массы образца на воздухе к разности масс на воздухе и в воде.

Минералы переменного состава имеют непостоянную плотность. Например, плотность плагиоклазов изменяется от 2,61 (альбит $Na[AlSi_3O_8]$) до 2,77 г/см^3 (анортит $Ca[Al_2Si_2O_8]$). Возрастание плотности происходит строго пропорционально увеличению количества анортитового компонента в плагиоклазе.

Входящие в состав минералов анионы (OH, F) и молекулы воды понижают плотность минералов.

Минералы одинакового состава с разной степенью компактности кристаллической структуры имеют разную плотность: например, алмаз - 3,5, графит - 2,2 г/см^3.

Спайность

Спайность - способность минералов раскалываться по определенным кристаллографическим направлениям с образованием плоских зеркальных поверхностей (плоскостей спайности - рис. 1, 2).

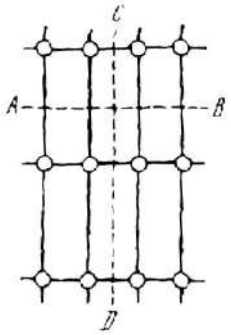


Рис. 1. Спайность по *AB* проявлена в кристаллической решетке сильнее, чем по *CD* (по А. Г. Булаху)

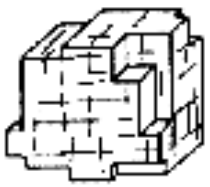


Рис. 2. Спайность по кубу у галенита (по А. Г. Булаху)

Выделяют следующие виды спайности:

весьма совершенная - кристалл легко расщепляется на тонкие гладкие листочки, его трудно разделить в другом направлении (слюды, тальк);

совершенная - поверхности менее гладкие, образуются при большом механическом усилии (раскалывании); наряду со спайными поверхностями может наблюдаться излом (ортоклаз, кальцит);

несовершенная - поверхности спайности отсутствуют или обнаруживаются с трудом (кварц, нефелин).

От естественных граней кристаллов плоскости спайности отличаются тем, что естественную грань можно отбить и она не повторится, а плоскости спайности можно получать многократно - раскалывая кристалл, пока позволяют его размеры. Плоскости спайности более гладкие и совершенные, чем естественные грани (последние могут иметь штриховку, следы растворения и т. д.).

Спайность может быть проявлена по одному (слюда, гипс), двум (ортоклаз, амфиболы, пироксены), трем (галит, галенит, кальцит) и большему числу направлений.

Твердость

Твердость определяется в единицах шкалы Мóоса (1822):

1. Тальк	***6. Ортоклаз***
2. Гипс	***7. Кварц***
3. Кальцит	***8. Топаз***
4. Флюорит	***9. Корунд***
5. Апатит	***10. Алмаз***

В дополнение к минералам шкалы Мооса при определении твердости можно использовать ноготь, твердость которого немного выше 2, и стекло - 5,5. Минералы с твердостью 1 пишут по бумаге, не царапая ее.

Твердость определяется методом царапания: более твердый минерал оставляет царапину на более мягком (отличать царапину от порошковатого следа, который дает менее твердый минерал на более твердом - в отличие от царапины такой след легко стереть).

Сначала образец минерала царапают стеклом и устанавливают его примерную твердость. Затем берется эталонный минерал из шкалы Мооса, имеющий твердость, близкую к предполагаемой. При равенстве твердости минерала и эталона они оставляют царапины друг на друге. Если минерал на одном из соседних эталонов оставляет царапину, а на другом нет, то твердость минерала считается по менее твердому эталону с добавлением 0,5 (например, если минералом можно царапать гипс и нельзя кальцит, то его твердость 2,5).

При некотором навыке твердость можно определять с помощью только стекла - сопоставляя глубину царапины и прилагаемую силу.

Хрупкость, ковкость

Хрупким называется минерал, который крошится при проведении царапины на его поверхности. Под ковкостью понимается притупление острых

краев минерала при ударе молотком. При царапании ковкого минерала на его поверхности получается гладкий блестящий след. Наиболее ярко ковкость проявлена у самородных металлов, например, у золота, зерна которого на наковальне расплющиваются молотком в тонкие пластинки.

Магнитные свойства

Магнитные свойства минералов пределяются магнитными свойствами атомов и магнитной структурой минералов (расположением и взаимодействием атомов). Особенно четко магнитность, т. е. способность намагничиваться в магнитном поле, проявлена у ионов Fe^{3+}, Mn^{2+}, Fe^{2+} и некоторых других.

Диамагнитные минералы обладают незначительной отрицательной магнитной восприимчивостью, слегка отталкиваются магнитом (кальцит, галит).

Парамагнитные минералы характеризуются положительной магнитной восприимчивостью, притягиваются мощными электромагнитами (биотит, пироксены и другие минералы, особенно железосодержащие).

Ферромагнитные минералы имеют наиболее высокую магнитную восприимчивость (на несколько порядков выше, чем у парамагнитных минералов) и в мелких обломках притягиваются подковообразным магнитом (магнетит $FeO{\cdot}Fe_2O_3$, пирротин FeS, слабее ильменит $FeTiO_3$, гематит Fe_2O_3). Магнетит в древности использовался в необработанном виде как компас.

При испытании на магнитность кусочек испытуемого минерала измельчают ударом молотка, после чего к полученному порошку подводят магнит. О магнитности судят по тому, притягиваются или не притягиваются зерна минерала к магниту. Обычным подковообразным магнитом притягиваются зерна наиболее сильно магнитных минералов - магнетита, пирротина. Кроме того, образцы этих минералов отклоняют стрелку поднесенного к ним компаса.

Электрические свойства

Электропроводность минералов изменяется в широких пределах – от лучших проводников (серебро) до лучших изоляторов (мусковит). Удельное электрическое сопротивление зависит от направления в кристалле (например, у кварца в одном направлении $2{\cdot}10^{14}$, а в другом – $2{\cdot}10^{16}$ ом/см) и от наличия примесей (например, в связи с этим светлоокрашенный касситерит не проводит электричества, а темный – проводит).

Деление минералов по электропроводности:

проводники – минералы с металлической связью, например, самородная медь, самородное железо;

полупроводники – некоторые сульфиды и оксиды, преимущественно с ковалентной химической связью; в некоторых полупроводниках повышение температуры на 100º увеличивает электропроводность до 50 раз;

диэлектрики – большинство минералов (например, кварц, полевые шпаты и др.), в том числе минералы с ионной химической связью.

Пьезоэлектрический эффект – электризация кристалла при сжатии или растяжении (кварц). У кварца сжатие кристалла в определенном направлении приводит к смещению ионов Si^{4+} и O^{2-} с появлением разноименных зарядов на поверхности, перпендикулярной направлению сжатия (рис. 3).

Имеется и обратный пьезоэлектрический эффект – кристалл, помещенный в электрическое поле, сжимается или растягивается (в переменном электрическом поле – вибрирует). Наличие пьезоэлектрического эффекта и почти совершенная упругость кварца (кристалл кварца может совершать до 10^5 колебаний в секунду) позволяют использовать этот минерал для стабилизации частот в радиоаппаратуре (пьезокварц). При этом природный кварц используется в наиболее ответственных радиотехнических устройствах, а в рядовых случаях применяются имеющие несколько более низкое качество кристаллы синтетического кварца (ежегодно в мире для этой цели выращивается более 1000 т кристалов искусственного кварца).

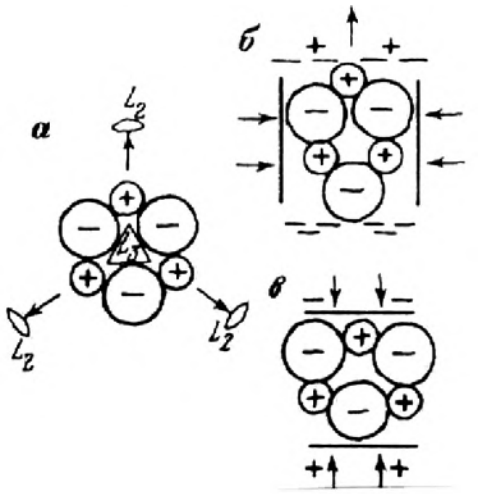


Рис. 3. Схема структуры кварца (*а*) и возникновение пьезоэлектрического эффекта (*б, в*); по А. Г. Булаху

Блеск

Термин "блеск" относится к виду поверхности минерала в отраженном свете. Выделяют два главных различимых на глаз вида блеска - металлический и неметаллический.

Минералы, поверхность которых отражает наибольшее количество света, имеют металлический блеск. Такие минералы непрозрачны и дают черную или очень темную черту (галенит, пирит, халькопирит).

Неметаллический блеск подразделяется по мере уменьшения количества отражаемого света:

а) алмазный - очень сильный, например, у сфалерита;

б) стеклянный - подобный отражению света от стекла, например, у кварца;

в) жирный - менее интенсивный, чем стеклянный: минерал выглядит, как будто его поверхность покрыта тонким слоем масла; возникает при рассеянии света микроскопическими неровностями поверхности, например, у талька;

г) матовый - главным образом у землистых минералов, например, у каолинита.

Минералы со стеклянным блеском в целом светлоокрашены и относительно прозрачны, по крайней мере в тонких сколах; черта минералов со стеклянным блеском светлоокрашенная.

Цвет, черта

Цвет минералов определяется их химическим составом, кристаллической структурой и примесями.

Некоторые ионы, придающие минералам определенный цвет: Fe^{3+} - бурый (лимонит), Fe^{2+} - зеленый (актинолит), Fe^{2+}+Fe^{3+} - черный (магнетит), Cu^{2+} - зеленый (малахит), синий (азурит), Cr^{3+} - красный (рубин), зеленый (изумруд).

Минералам с неметаллическим блеском часто свойственна переменная окраска - например, флюорит бывает бесцветным, желтым, розовым, зеленым, фиолетовым. Окраска таких минералов может быть обусловлена как химическим составом, так и дефектами кристаллической структуры (фиолетовый флюорит, синий галит, дымчатый и черный кварц). Так, синяя окраска галита возникает при замещении в его кристаллической решетке части ионов Na^{1+} на нейтральные атомы Na.

Цвет минерала, имеющего металлический блеск, следует определять на поверхности свежего излома - такие минералы на воздухе нередко покрываются тончайшей пленкой продуктов окисления (так называемой побежалостью), имеющей иную окраску, чем сам минерал.

На окраску минерала оказывает влияние степень его дисперсности: пирит в достаточно крупных кристаллах соломенно-желтый, в порошке - черный; гематит в крупных зернах черный, в порошке – вишнево-красный. Цвет порошка минерала определяется путем прочерчивания минералом по неглазурованной фарфоровой пластинке (по «черте» минерала). Фарфор употребляется потому, что он имеет сравнительно большую твердость (около 6), шероховатую поверхность, на которой остается порошок минерала, и белый цвет - фон, на котором хорошо различимы цветовые оттенки. Цвет черты, как правило, более постоянен, чем цвет самого минерала, и поэтому является важным признаком при идентификации.

Минералы с металлическим блеском дают черную или темноокрашенную черту, а минералы без металлического блеска - белую или светлоокрашенную черту. Землистые и тонкозернистые разновидности минералов имеют цвет, сходный с цветом черты.

Люминесценция

Люминесценция - это способность кристаллов светиться при нагревании (флюорит), под действием ультрафиолетовых (шеелит, кальцит), рентгеновских (алмаз – люминесцирует ярким голубым или желтым цветом, на чем основан способ его выявления в массе дробленой породы на ленте транспортера на обогатительных фабриках) и других лучей.

СИСТЕМАТИКА МИНЕРАЛОВ

В настоящее время известно более 4000 минералов и каждый год открывается несколько десятков новых минералов. Точная диагностика минералов производится с использованием химического и спектрального анализов, лазерного и рентгеноспектрального микроанализов, рентгеноструктурного и ряда других методов.

В основу классификации минералов положены их химический состав и кристаллическая структура.

Простые вещества

Золото, платина, алмаз, графит, сера.

Золото. Пробность (проба) золота – содержание чистого Au, в ‰ (в десятых долях процента). Наиболее распространенная примесь в золоте – серебро. Чем выше пробность, тем золото имеет более желтый оттенок окраски. Характерным признаком золота является его ковкость – стальная игла оставляет на золоте блестящую царапину.

Старейшее в России коренное месторождение золота – Березовское (к востоку от Екатеринбурга, открыто в 1745 г.); за время эксплуатации на нем добыто около 130 тонн золота. На этом месторождении золото преимущественно невидимое на глаз – оно находится главным образом в приуроченных к кварцевым жилам сульфидах (чаще всего в пирите) в виде зерен размерами в сотые доли миллиметра. На обогатительной фабрике из руды получают обогащенный сульфидами концентрат, из которого золото извлекается химическим путем. В настоящее время эксплуатация ведется на глубине 314 – 512 метров, а промышленное оруденение прослежено до глубины 1,1 – 1,2 км.

Всего в мире в 2000 г. добыто 2544 т золота. Самое крупное в мире месторождение золота – Витватерсранд (Южная Африка).

В России в настоящее время золото добывается преимущественно из россыпей (промывкой рыхлых отложений, главным образом песков).

Алмаз. Является одним из самых дорогих драгоценных камней, а также используется в технических целях - для изготовления буровых коронок, сверл, абразивных материалов и т. п. Технические алмазы составляют 75-80 % от общей добычи алмазов. На технические цели обычно идут непригодные для ювелирного дела алмазы, а также искусственные алмазы, которые в достаточно больших количествах производят во многих странах.

К настоящему времени в мире добыто более 500 т алмазов, из них около трети – за последние 25 лет. 10 % кристалов алмазов имеют форму правильных многогранников, а остальные представляют собой кристаллы несовершенной формы и обломки.

Наиболее крупные месторождения алмазов находятся в Южной Африке. В России начало открытию кореннных месторождений алмазов было положено в 1940 г., когда геолог В. С. Соболев установил, что территория Западной Якутии сходна по геологическому строению с Южно-Африканской платформой и сделал вывод, что алмазы следует искать именно здесь.

Планомерное изучение территории Западной Якутии на алмазы началось с 1945 г. При этом обычные методы поисков долгое время не приводили к обнаружению месторождений алмазов. В 1953 г. молодой геолог Л. Попугаева в ходе проведения поисковых работ нашла кристаллики красного минерала - граната на дне у берега одного из ручьев. Во время камеральной обработки их случайно увидел минералог, профессор Ленинградского университета А. А. Кухаренко. Он сразу определил, что это пироп -

разновидность гранатов, являющаяся в Южной Африке спутником алмазов. То есть по нему нужно искать алмазы и в Якутии.

В 1954 г. Л. Попугаева промывала пески в ручьях, ориентируясь на пироп. В одном из ручьев этот минерал привел ее к косе, где была найдена галька зеленоватой породы с кристаллами пиропа, а затем выше по склону, на водоразделе – содержащие алмазы коренные выходы подобной породы. Так было обнаружено первое местонахождение алмазов (алмазная трубка). После этого поиски алмазов по пиропу (минералогический метод поисков) стали общепринятыми и таким путем были обнаружены десятки алмазных трубок. Из геофизических методов при поисках алмазов начали использовать методы магниторазведки.

Наряду с якутскими месторождениями алмазов, в 1979 г. была выявлена Архангельская алмазоносная провинция. Она была открыта на основании находки при промывке песков в реках и ручьях на обширной изученной территории всего лишь двух зерен пиропа. Вокруг мест находки каждого из этих зерен на карте описали круг радиусом 11 км (при переносе с речным песком на 10 км зерна пиропа полностью истираются, т. е. коренной источник не может быть удален от места находки пиропа на расстояние более 10 км), и внутри каждого круга провели очень детальную и чувствительную магнитную съемку, которая и выявила ряд алмазных трубок.

Сернистые соединения

Пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит, галенит, антимонит, сфалерит, киноварь.

Оксиды и гидроксиды

Магнетит, гематит, хромит, пиролюзит, рутил, корунд, лимонит.

Галоиды

Галит, сильвин, флюорит.

Соли кислородных кислот

А) карбонаты: *кальцит, доломит, магнезит, сидерит, малахит*.

Б) фосфаты: *апатит.*

В) сульфаты: *гипс, ангидрит, барит.*

Г) вольфраматы: *вольфрамит, шеелит.*

Галоиды, сульфаты, карбонаты легко растворимы и определяют солевой состав подземных вод и наличие ряда примесей в нефти.

Силикаты

Силикаты - это наиболее многочисленный класс минералов - на их долю приходится около половины всех известных минералов. Силикаты слагают до 95 % объема земн коры.

Рентгеноструктурным анализом (Брэгг, 1937) показано, что основой кристаллической структуры силикатов является кремнекислородный тетраэдр $[SiO_4]^{4-}$. Силикаты, в которых часть Si^{4+} в кремнекислородных тетраэдрах замещена на Al^{3+}, – алюмосиликаты.

Островные силикаты – с изолированными кремнекислородными тетраэдрами в кристаллической структуре: *оливин, гранаты, топаз, эпидот, циркон, берилл, турмалин.*

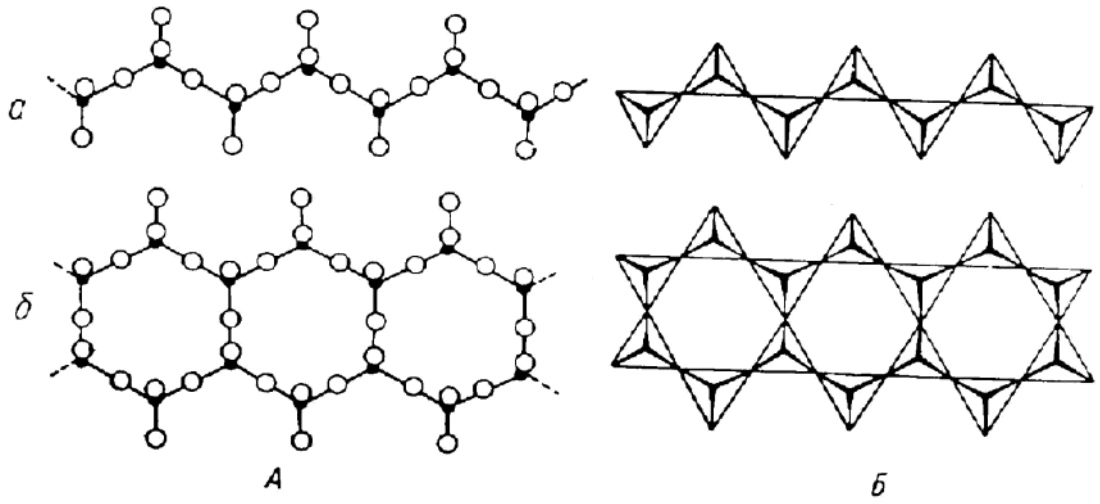


Рис. 4. Одинарная кремнекислородная цепочка $[Si_2O_6]^{4-}$ (*а,* пироксены) и сдвоенная кремнекислородная цепочка $[Si_4O_{11}]^{6-}$ (*б,* амфиболы). *А* – разреженная модель, *Б* – модель из кремнекислородных тетраэдров

Цепочечные силикаты: *пироксены, амфиболы (актинолит, роговая обманка)*.

Слоистые силикаты: *тальк, слюды (мусковит, биотит, серицит), хлорит, серпентин (хризотил-асбест), глинистые минералы (каолинит, гидрослюды, монтмориллонит)*.

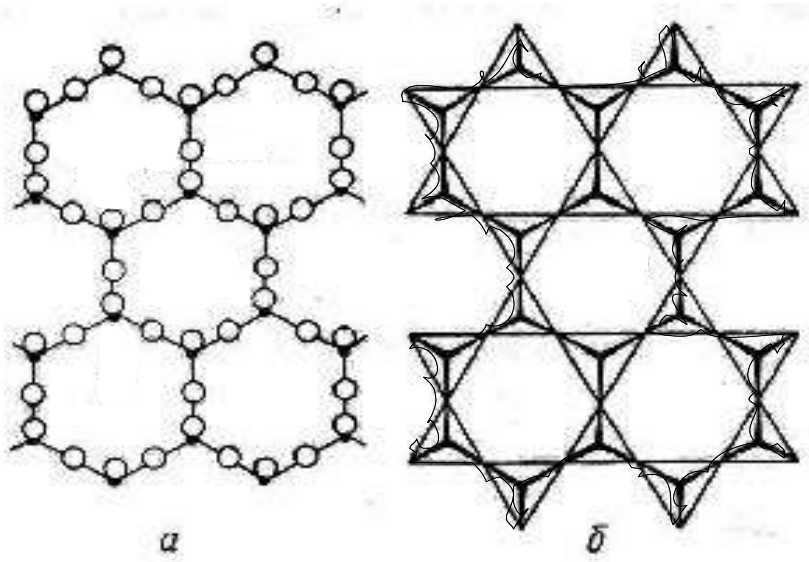


Рис. 5. Кремнекислородный лист $[Si_4O_{10}]^{4-}$: *а* – разреженная модель; *б* – в тетраэдрах

Каркасные силикаты – кремнекислородные тетраэдры в кристаллической решетке соединены друг с другом общими вершинными атомами кислорода, образуя трехмерную структуру (каркас) с достаточно большими пустотами. *Кварц, халцедон. Полевые шпаты - калиевые (ортоклаз, микроклин) и плагиоклазы (альбит, анортит), нефелин.*

НЕКОТОРЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МИНЕРАЛОВ

Название минерала, химическая формула	Цвет	Твердость	Плотность	Другие свойства
Простые вещества				
Золото Au	Желтый	2,5-3	15,6-19,2	Ковкость
Платина Pt	Серый	4-4,5	15-19	Ковкость
Алмаз C	Бесцветный	10	3,5-3,6	Люминесцирует в ультрафиолетовых и рентгеновских лучах
Графит C	Серый	1	2,1-2,2	Жирный на ощупь, пачкает руки, пишет на бумаге
Сера S	Желтый	1,5-2	2,0-2,1	Хрупкость
Сернистые соединения				
Молибденит MoS_2	Светло-серый	1	4,7-4,8	Чешуйчатый
Антимонит Sb_2S_3	Серый	2		Игольчатый
Галенит PbS	Серый	2,5-3	7,4-7,6	Спайность совершенная
Арсенопирит FeAsS	Серый	5,5-6,0		
Халькопирит $CuFeS_2$	Латунно-желтый	3-4		
Пирротин FeS	Бронзово-желтый	3.5-4.5		Магнитен
Пирит FeS_2	Светло-желтый	6-6,5		Черта черная, нередко кристаллы в форме куба
Сфалерит ZnS	Бурый и др.	3,5-4,0		Черта бурая
Ки́новарь HgS	Красный	2,5	8,1	

Название минерала, химическая формула	Облик кристаллов, строение агрегата	Цвет	Черта	Твер-дость	Другие свойства
Оксиды и гидроксиды					
Пиролюзит MnO_2	Землистый Плотный	Черный	Черная		Землистые разности пачкают руки
Магнетит $FeO{\cdot}Fe_2O_3$		Черный	Черная	5-6	Магнитен
Ильменит $FeTiO_3$		Черный	Черная бурая	5-6	
Лимонит (полиминеральная смесь примерного состава $Fe_2O_3{\cdot}nH_2O$)	Плотный, натечный, охристый	Бурый , черный	Бурая	1-5,0	
Гематит Fe_2O_3	Пластинчатый, плотный	Черный, серый	Красно-бурая	5,5-6	
Хромит $FeCr_2O_4$		Черный	Бурая	5,5-7,5	
Опал $SiO_2{\cdot}nH_2O$	Плотный, натечный	Белый и др.		5-6	
Рутил TiO_2	Игольчатый	Красный Черный		6,5	
Корунд Al_2O_3		Серый		9	
Галоиды					
Галит NaCl		Бесцветный		2-2,5	Растворяется в воде, соленый на вкус
Сильвин KCl		Белый		2,0	Растворяется в воде, горьковатый на вкус
Флюорит CaF_2		Бесцветный, фиолетовый, зеленый		4	

Название минерала, химическая формула	Цвет	Твер-дость	Спайность	Другие свойства
Соли кислородных кислот: а) карбонаты				
Кальцит $CaCO_3$	Бесцветный, белый	3,0	Совершенная	Вскипает от капли соляной кислоты
Доломит $CaMg(CO_3)_2$	Бесцветный, белый, серый	3,5-4	Совершенная	Реагирует с соляной кислотой в порошке
Магнезит $MgCO_3$	Бесцветный, белый, серый	4-4,5	Совершенная	Не реагирует с холодной соляной кислотой
Сидерит $FeCO_3$	Бурый, серый	3,5-4,5	Совершенная	Плотность 3,9
Малахит $Cu(CO_3)\cdot Cu(OH)_2$	Зеленый	3,5		Вскипает от капли соляной кислоты
б)фосфаты				
Апатит $Ca_5[PO_4]_3(F,Cl)$	Бесцветный зеленый голубой	5	Несовершен-ная	Призматический
в) сульфаты				
Гипс $Ca[SO_4]\cdot 2H_2O$	Бесцветный, белый	2	Весьма совершенная	Плотность 2,3
Ангидрит $CaSO_4$	Голубовато-серый	3,5	Совершенная	
Барит $BaS0_4$	Белый	3-3,5	Совершенная	Плотность 4,5
г) вольфраматы				
Вольфрамит $(Fe, Mn)WO_4$	Черный, бурый	4,5-5,5	Совершенная	Плотность 6,7-7,5 черта бурая

Название минерала, химическая формула	Облик кристаллов Строение агрегата	Цвет	Твер-дость	Спайность	Другие свойства
Силикаты: а) островные					
Оливин $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$	Зернистый	Зеленый черный	6,5-7	Несовер-шенная	Бурая корка выветривания
Гранаты $T_3R_2[SiO_4]_3$ (T=Mg, Fe, Ca R=Al, Fe, Cr)	Изометри-ческий	Бурый	6,5-7,5	Отсутствует	
Топаз $Al_2[SiO_4](F, OH)_2$		Бесцвет-ный	8	Совершен-ная	
Эпидот $Ca_3(Al,Fe)_2[SiO_4] \cdot [Si_2O_7]\ O(OH)$	Призмати-ческий	Желтовато - зеленый	6-6,5	Совершен-ная	
Циркон $Zr[SiO_4]$	Призмати-ческий	Бурый	7-7,5		Иногда радиоактивен
Берилл $Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$	Призмати-ческий	Зеленова-тый, жел-товатый	7,5-8	Несовер-шенная	Шестиугольная форма сечений кристаллов
Турмалин $NaFe_3Al_6[Si_6O_{18}] \cdot [BO_3]_3(OH)_4$	Игольчатый	Черный	7-7,5	Отсут-ствует	
б) цепочечные					
Пироксены $R_2[Si_2O_6]$ (R=Mg, Fe, Ca, Na, Al)	Призмати-ческий (часто корот-копризма-тический)	Темно-зеленый, черный	5-6,5	Совершен-ная по 2 направлениям под углом 87°	

Название минерала, химическая формула	Облик кристаллов, строение агрегата	Цвет	Твердость	Спайность	Другие свойства
Амфиболы: $R_7[Si_4O_{11}]_2 \cdot (OH)_2$ (R=Na, Mg, Ca, Fe) **актинолит** **роговая обманка**	Призматические	Зеленый Черный	5,5-6	Совершенная по 2 направлениям под углом 124°	Игольчатый
в) слоистые					
Тальк $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	Чешуйчатый	Белый светло-зеленый	1	Весьма совершенная	Жирный наощупь
Слюды: **мусковит** $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ **биотит** $K(Mg, Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$	Чешуйчатый	Бесцветный Черный, бурый	2-2,5 2,5-3	Весьма совершенная	
Хлорит $R_n[T_2O_5](OH)_8$ (R=Mg, Al, Fe, T=Si, Al, Fe)	Чешуйчатый	Зеленый	2-2,5	Весьма совершенная	
Серпентин $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ **Хризотил-асбест** $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$	Волокнистый	Зеленый Белый, зеленый	3-4 2,5		Жирный блеск Расщепляется на тонкие волокна

Название минерала, химическая формула	Облик кристаллов, строение агрегата	Цвет	Твердость	Спайность	Другие свойства
Глинистые минералы: **каолинит** $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$ **монтмориллонит** $(Al,Mg)_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH2O$ **гидрослюда** $K_{0,65}Al_2[Al_{0,65}Si_{3,35}O_{10}](OH)_2$	Землистые, плотные, с водой становятся пластичными	Белый и др.	2-2,5		При смачивании водой увеличивается в объеме
г) каркасные					
Кварц SiO_2	Зернистый	Белый и др.	7	Отсутствует	Плотность 2,6
Халцедон SiO_2	Скрытозернистый	Белый и др.	7	Отсутствует	Полосчатый - агат
Полевые шпаты: **калиевые (ортоклаз, микроклин)** $K[AlSi_3O_8]$ **плагиоклазы (альбит** $Na[AlSi_3O_8]$, **анортит** $Ca[Al_2Si_2O_8]$**)**	Зернистый	Белый, серый, буро-красный	6	Совершенная по 2 направлениям под прямым углом	Плотность 2,6-2,8
Нефелин $Na_3K[AlSiO_4]$		Серый, серо-зеленый	5,5-6	Отсутствует	

ЛИТЕРАТУРА

Основная:
Миловский А. В. Минералогия и петрография. М., Недра, 1979.
Булах А. Г. Минералогия с основами кристаллографии. М., Недра, 1989.
Дополнительная:
Булах А. Г. Общая минералогия. Изд. СПб ун-та, 1999.
Лазаренко Е. К. Курс минералогии. М., Высшая школа. 1971.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Студентами заочной формы обучения содержание дисциплины осваивается путем самостоятельной проработки рекомендованной литературы и изучения коллекционного материала на кафедре и в экспозиции геологического музея.

До приезда на сессию студент-заочник должен выполнить домашнее задание по составлению конспекта свойств перечисленных выше (выделены курсивом) минералов (форма конспекта – табл. 1). Конспект свойств составляется по рекомендованной учебной литературе.

Таблица 1

Форма конспекта свойств минералов

Название минерала, химическая формула	Сингония	Облик кристаллов	Строение агрегата	Спайность	Цвет, черта
1	2	3	4	5	6

Блеск	Твердость	Плотность	Особые свойства	Сходные минералы	Месторождения	Применение
7	8	9	10	11	12	13

При составлении конспекта следует обратить внимание на химический состав минералов, наиболее важные диагностические признаки и на применение минералов.

Успешное овладение минералогией невозможно без практической работы с минералами. При самостоятельном изучении предмета полезно использование коллекций минералов геологических объектов, на которых работает студент-заочник, а также ознакомление с экспозицией ближайшего геологического или краеведческого музея.

Студент, занимающийся по индивидуальному плану, перед изучением дисциплины может получить на кафедре для изучения в межсессионный

период шкалу твердости и коллекцию минералов (в последующем возвращаются на кафедру).

Занимаясь со шкалой твердости, следует научиться определять твердость, царапая одним минералом по другому, а также царапая минералом по стеклу или стеклом по минералу, запомнить каждый минерал шкалы и значение его твердости. При изучении спайности следует заполнить в табл. 2 колонки, описывающие спайность ряда минералов шкалы твердости (при этом можно контролировать себя по характеристике спайности этих минералов в конспекте свойств минералов)

Используя составленный конспект свойств минералов, следует изучить полученную на кафедре коллекцию минералов с тем, чтобы запомнить и научиться определять эти минералы.

Таблица 2

Спайность минералов шкалы твердости

Твер-дость	Минерал	Спайность		
		Вид (степень совершенства)	Число направлений спайности	Угол между плоскостями спайности (прямой или косой)
1 2 3 4 6 7 8	Тальк Гипс Кальцит Флюорит Ортоклаз Кварц Топаз			

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите разновидности минеральных агрегатов.
2. Что такое изоморфизм? Приведите примеры изоморфизма.
3. Охарактеризуйте зависимость удельного веса от химического состава и структуры кристаллов.
4. Перечислите минералы шкалы твердости.
5. Охарактеризуйте спайность минералов шкалы твердости.
6. Электрические и магнитные свойства минералов.
7. Окраска и люминесценция минералов.

8. Сернистые соединения.
9. Назовите минералы - руды свинца, цинка, меди.
10. Назовите минералы, в состав которых входят: мышьяк, ртуть, сурьма.
11. Охарактеризуйте сульфиды, содержащие железо.
12. Дайте характеристику оксидов и гидроксидов.
13. Назовите минералы - руды железа и марганца.
14. Назовите минералы, в состав которых входят: титан, хром, марганец.
15. Галоиды.
16. Сульфаты.
17. Перечислите минералы из группы карбонатов. Охарактеризуйте их диагностические признаки.
18. Кристаллические структуры силикатов.
19. Назовите силикаты, содержащие: натрий, магний.
20. Приведите химические формулы островных силикатов.
21. Охарактеризуйте химический состав и диагностические признаки цепочечных силикатов.
22. Слоистые силикаты.
23. Глинистые минералы.
24. Каркасные силикаты.
25. Кварц и его применение.
26. Калинатровые полевые шпаты и плагиоклазы.

ПЕТРОГРАФИЯ

Петрография изучает горные породы – минеральные агрегаты, сложенные одним или несколькими минералами и занимающие значительные участки земной коры.

Как самостоятельная наука петрография начала развиваться после того, как для изучения горных пород был использован микроскоп (Сорби, 1858). До введения микроскопа породы изучались при помощи лупы и химического анализа. С появлением микроскопа стало возможным значительно более точное определение породообразующих минералов и их взаимоотношений.

С 20-х годов XX века эксперименты по образованию горных пород в лабораторных условиях положили начало аналитическому этапу в развитии петрографии. Применение большого числа разнообразных точных методов исследования и экспериментальных данных сделало петрографию точной наукой (петрология).

Новый этап развития петрографии начался в 60-х годах XX века в связи с внедрением рентгеноспектрального микроанализатора (электронного микрозонда), позволившего с большой точностью изучать химический состав отдельных зерен минералов в горных породах.

Горные породы подразделяются на магматические, осадочные и метаморфические. Земная кора на 95 % сложена магматическими и метаморфическими породами; однако выходы этих пород занимают лишь 25 % поверхности суши (остальные 75 % поверхности суши заняты распространяющимися на относительно небольшую глубину осадочными породами).

1. МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Магматические породы образуются из флюидно-силикатных расплавов (магм). Магмы являются продуктами частичного плавления вещества мантии и континентальной земной коры на глубинах от 200-300 до 10-20 км, и могут подниматься из глубин в верхние части земной коры и на земную поверхность.

При застывании магмы на глубине возникают интрузивные породы (плутонические и жильные), а на земной поверхности (на суше или в море) – вулканические породы (эффузивные и вулканогенно-обломочные). Вулканогенно-обломочные породы образуются, когда магмы выбрасываются взрывами в атмосферу в виде обломков - вулканических бомб, лапиллей, пепловых частиц. Многие обломки образуются при разрушении твердеющих лав, особенно подводных.

Химический состав

Химический состав положен в основу общей классификации магматических пород.

90 % объема земной коры (47 % по весу) приходится на кислород – в земной коре преобладают кислородсодержащие минералы. Результаты химических анализов горных пород представляют в форме процентного содержания оксидов.

Породообразующие оксиды (в сумме составляют 97 весовых % от среднего состава магматических пород): SiO_2 (*кремнезем, кремнекислота*), Al_2O_3 (*глинозем*), Fe_2O_3, FeO (*окись и закись железа*), MgO, CaO (*основания*), Na_2O, K_2O (*щелочи*).

По химическому составу магматические породы разделяются на группы:

ультраосновные породы - 30-44 % SiO_2 *(*дуниты, перидотиты, кимберлиты);

основные породы - 44-53 % SiO_2 (базальты, габбро);

средние породы - 53-64 % SiO_2 (андезиты, диориты, трахиты, сиениты);

кислые породы - 64-78 % SiO_2 (риолиты, граниты).

Кроме перечисленных выше главных химических элементов, в породах имеются элементы-примеси: в ультраосновных и основных породах - Cr, Co, Ni и др., в кислых породах - Li, Be, Zr и др. Радиоактивные элементы (U, Th) в минимальном количестве содержатся в ультраосновных породах, а в максимальном – в кислых породах (гранитах). В связи с этим в районах

развития гранитов уровень γ-радиации в 3-4 раза выше фонового значения. В современных домах при использовании в качестве наполнителя бетона гранитного щебня уровень радиации в несколько раз выше, чем в деревянных домах, и при использовании в качестве наполнителя бетона щебня основных и ультраосновных пород.

Минеральный состав

По количественному значению минералы магматических пород разделяются на главные - присутствуют в породе в количестве более 5 %, и второстепенные - менее 5 %. Главные минералы делятся на светлые (салические) и темноцветные (фемические).

Светлые минералы:	***Темноцветные минералы***:
кварц	биотит
полевые шпаты (плагиоклазы,	пироксены
калинатровые полевые шпаты)	амфиболы
	оливин

Второстепенными могут быть как перечисленные, так и более редкие специфические (акцессорные) минералы, например, хромит, магнетит, апатит, сфен, циркон (из этих минералов циркон содержит наибольшее количество радиоактивных элементов-примесей).

Кварц SiO_2 распознается по отсутствию спайности, стеклянному блеску, раковистому излому, высокой твердости (его зерна легко царапают стекло), изометричной форме зерен; в породах встречается как бесцветный, так серый и черный кварц.

Полевые шпаты (плагиоклазы и калинатровые полевые шпаты) обладают твердостью 6 (свежие) и спайностью по двум направлениям под углом около 90°. Цвет белый, серый, розовый, редко светло-зеленый. В неизмененных вулканических породах они прозрачны и напоминают кварц, отличаясь от него удлиненной формой зерен и наличием спайности.

Плагиоклазы - минералы переменного состава, представляют собой изоморфные смеси альбита $Na[AlSi_30_8]$ и анортита $Ca[A1_2Si_20_8]$; процентное содержание анортита в плагиоклазе называется номером плагиоклаза.

Номер плагиоклаза		
0 - 10	альбит	кислый плагиоклаз
10 - 30	олигоклаз	"
30 - 50	андезин	средний плагиоклаз
50 - 70	лабрадор	основной плагиоклаз
70 - 90	битовнит	"
90 - 100	анортит	"

Отличить плагиоклаз от калинатрового полевого шпата $K[AlSi_30_8]$ макроскопически часто затруднительно, в этом случае следует пользоваться общим названием "полевой шпат".

Биотит $K(Mg, Fe)_3(OH, F)_2[AlSi_3O_{10}]$. Из всех породообразующих минералов биотит может концентрировать в себе наибольшее количество изоморфных примесей редких элементов – Ba, Sr, Rb, Cs, Rb, Ge, U, Th и др.

Характерны черный цвет, пластинчатая форма зерен, весьма совершенная спайность (чешуйки расщепляются по плоскостям спайности), низкая твердость.

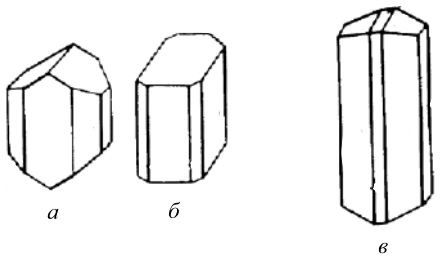


Рис. 6. Форма кристаллов пироксенов (*а* – авгит; *б* – диопсид) и амфиболов (*в* – роговая обманка)

Пироксены и амфиболы внешне сходны друг с другом и нередко трудно различимы, особенно при мелких размерах зерен. Для отличия пироксенов и амфиболов (роговой обманки) могут быть использованы следующие признаки:

1) те и другие минералы имеют спайность по двум направлениям, но угол спайности у пироксенов - около 90°, а у амфиболов - около 120°;

2) облик кристаллов пироксенов обычно короткопризматический (кроме эгирина $NaFe[Si_2O_6]$, который образует длиннопризматические кристаллы), а амфиболов - длиннопризматический (рис. 6);

3) окраска роговой обманки черная, пироксенов - как черная, так с серыми и зелеными оттенками.

Оливин $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$ встречается в виде изометричных зерен с несовершенной спайностью. В свежем виде имеет зеленый цвет и стеклянный блеск. Легко подвергается серпентинизации, приобретая матовый блеск и черную окраску. При выветривании буреет (на поверхности образца возникает характерная бурая корка выветривания) .

Структуры

Понятие "структура" охватывает особенности строения горной породы, которые обуславливаются размерами, формой и взаимоотношениями минералов и вулканического стекла.

Равнозернистые структуры:

гигантозернистая - более 20 мм
крупнозернистая - 5-20 мм
среднезернистая - 1-5 мм
мелкозернистая - менее 1 мм, но зерна видны невооруженным глазом
афанитовая - зернистость обнаруживается лишь под микроскопом

Неравнозернистые структуры:

порфировая - заметные невооруженным глазом зерна (вкрапленники) располагаются среди стекловатой, афанитовой или очень мелкозернистой основной массы; порфировая структура характерна для эффузивных пород (рис. 7).

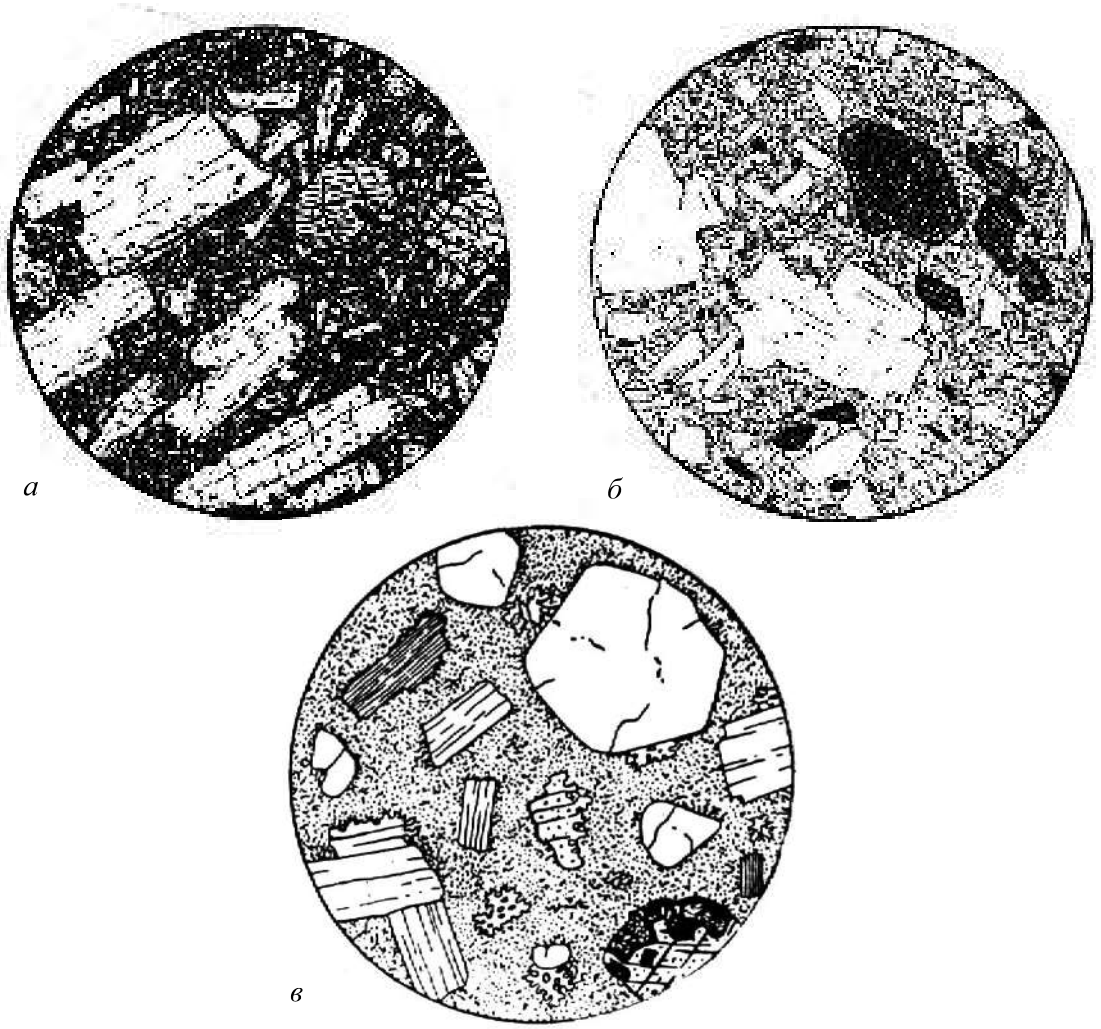


Рис. 7. Эффузивные породы порфировой структуры (по А. Н. Заварицкому и Х. Вильямсу):

а - плагиоклазовый ***базальт*** **(**вкрапленники - плагиоклаз, пироксен, оливин);

б – роговообманковый ***андезит*** **(**вкрапленники - роговая обманка, плагиоклаз; в основной массе преобладает вулканическое стекло);

в – ***риолит*** (вкрапленники - кварц, калинатровый полевой шпат, олигоклаз, биотит; основная масса афанитовой структуры).

Диаметр поля зрения: а – 5,3 мм, б – 3,4 мм, в – 4 мм

Текстуры

Текстуры определяются ориентировкой, относительным расположением составных частей породы и характером заполнения ими пространства:

однородная (массивная) – состав и структура породы в любом направлении одинаковы, ориентировка минералов изотропна; возникают при спокойной кристаллизации магмы;

- пятнистая (пятна образованы группами зерен);
- шаровая, подушечная – в эффузивах основного состава образуются при подводном излиянии лав;
- полосчатая (рис. 7);
- директивная – плоскостная или линейная ориентировка каких-либо зерен (преимущественная ориентировка оливина в мантийных перидотитах - причина сейсмической анизотропии мантии);
- пористая – в эффузивных породах (поры - газовые пузырьки, образующиеся при кипении лавы);
- миндалекаменная – поры в эффузивных породах заполнены более поздними минералами.

Рис. 8. Габбро полосчатой текстуры с Денежкина Камня на Урале (по Ф.Ю.Левинсон-Лессингу)

Рис. 9. Гранит. Плагиоклаз, калиевый полевой шпат, кварц и биотит; акцессорный магнетит; диаметр поля зрения 4,3 мм (по А. Н. Заварицкому)

Плутонические (интрузивные) породы

Плутонические породы образовались при длительной кристаллизации магматических расплавов в земной коре.

Они имеют яснозернистую, большей частью средне- или крупнозернистую, реже гиганто- или мелкозернистую структуру; обычно не бывает порфировой структуры.

Минеральный состав плутонических пород:

Дунит - оливин (> 90 %)

Перидотит - оливин (>40 %), пироксен

Га́ббро - основной плагиоклаз (35-65 %), темноцветный минерал (пироксен, реже роговая обманка, оливин)

Диорит - средний плагиоклаз (>60 %), темноцветный минерал (пироксен, реже роговая обманка, оливин)

Сиенит - калинатровый полевой шпат, плагиоклаз (не всегда), темноцветный минерал (часто биотит) - 20-30 %

Гранит - кварц (25-40 %), полевые шпаты (50-65 %), темноцветные минералы (биотит, мусковит, роговая обманка) - 3-10 %

Вулканические (эффузивные) породы

Вулканические (эффузивные) породы – продукты кристаллизации магмы, вышедшей на земную поверхность по вулканическим каналам и быстро застывшей на суше или в подводных условиях.

Структуры: порфировая, мелкозернистая, афанитовая, стекловатая; текстуры: массивная, пористая, миндалекаменная.

Минеральный состав вулканических пород отвечает минеральному составу соответствующих плутонических аналогов (табл. 3; породы, находящиеся в таблице в одной строке, имеют одинаковый минеральный состав: риолит имеет состав гранита, трахит - сиенита и т. д.). Макроскопическая диагностика вулканических пород ведется по составу порфировых вкрапленников; минеральный состав основной массы на глаз не определяется.

Таблица 3

Вулканические аналоги плутонических пород

Плутонические породы	Вулканические породы
габбро (диорит) сиенит гранит	базальт андезит трахит риолит

Окраска базальтов и андезитов темно-серая до черной (между собой базальты и андезиты нередко различимы лишь под микроскопом), а трахиты и риолиты имеют более светлую окраску. Иногда трахиты внешне сходны с андезитами - те и другие породы могут иметь одинаковую серую окраску. Измененным (палеотипным) эффузивным породам свойственны буроватая, красноватая, зеленоватая окраска (последняя особенно характерна для основных и средних эффузивных пород).

Измененные (палеотипные) разности вулканических пород обозначают приставкой "мета-": например, метабазальты (ранее называемые базальтовыми

порфиритами), метаандезиты (андезитовые порфириты), метатрахиты (бескварцевые порфиры), метариолиты (кварцевые порфиры).

Наиболее распространенные эффузивные породы – базальты. В пределах континентов их количество (объем) в 5 раз превышает все остальные вместе взятые эффузивные породы. Вторыми по распространенности эффузивами являются андезиты. В отличие от базальтов, которые широко развиты на океаническом дне, андезиты распространены на островных дугах и в окраинно-континентальных вулканических поясах (например, в обрамлении Тихого океана).

Одной из разновидностей **вулканогенно-обломочных** пород являются *вулканические туфы* – породы, состоящие из обломков вулканического материала и цементирующей обломки массы. По размерам обломки разделяются на вулканические бомбы (более 50 мм), лапилли (2-50 мм) и вулканический пепел (менее 2 мм).

Если обломки образованы породами (андезитом, риолитом и т.д.), туфы называются литокластическими; если обломки образованы отдельными минералами – кристаллокластическими, а если обломки сложены вулканическим стеклом – витрокластическими.

При наличии обломков различного типа даются смешанные названия - например, при совместном присутствии обломков кристаллов и большего количества обломков пород - кристаллолитокластический туф (первым упоминается тот компонент, которого в породе меньше).

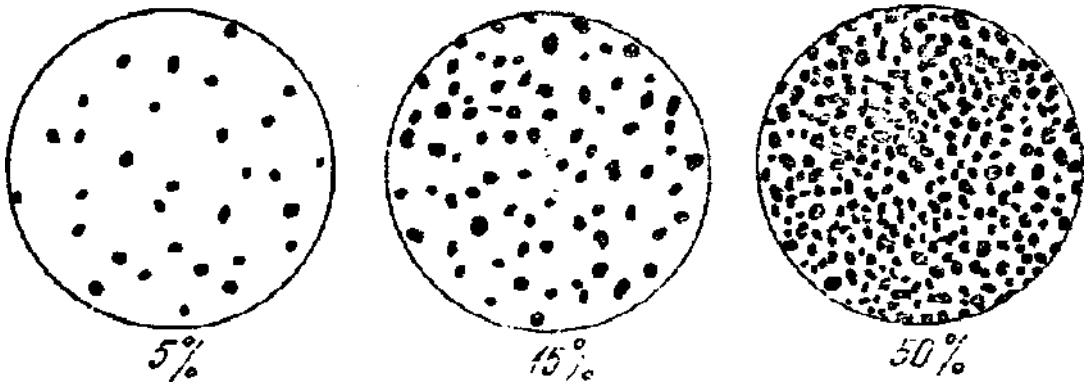
Геолог в поле изучает и картирует геологические тела, обычно образованные той или иной совокупностью (ассоциацией) горных пород. Устойчивые ассоциации магматических пород, которые, закономерно повторяясь в разных регионах, всюду формируются в сходных геологических условиях, называются магматическими формациями. Например, дунит-перидотитовая формация, габбро-пироксенит-дунитовая формация
(к последней относится, например, Уктусский массив), базальт-риолитовая формация (в том числе в районе Сухоложской геологической практики), трапповая формация (наземные излияния базальтов на громадных площадях, в том числе на Сибирской платформе) и др.

Описание образцов

План описания образца магматической породы:

- название, текстура, структура, окраска породы;
- минеральный состав, в процентах (точность 5-10 %; для пород порфировой структуры указывается процентное содержание порфировых вкрапленников и основной массы);
- характеристика каждого минерала породы - размеры зерен, диагностические признаки (цвет, спайность, форма зерен и др.).

Трафареты для визуального определения процентного содержания минералов



Примеры описания образцов плутонической (А) и вулканической (Б) пород (по Л. И. Кравцовой, М. Н. Чукашевой, с изменениями).

А) Роговообманковый кварцевый диорит. Массивная среднезернистая порода серой окраски, состоящая из плагиоклаза (60-65 %), темноцветного минерала (20-25 %) и кварца (около 15 %).

Плагиоклаз зеленоватой окраски, со спайностью, образует прямоугольные в изломе зерна размером до 5-6 мм.

Кварц серого цвета, с раковистым изломом, в виде изометричных зерен размерами 2-3 мм, выполняющих промежутки между зернами плагиоклаза.

Темноцветный минерал представлен роговой обманкой – черная, с блестящими плоскостями спайности (по двум направлениям под косым углом), образует вытянутые призматические зерна шириной до 1-2 мм, длиной до 5-6 мм.

Б) Биотитовый риолит. Массивная порода порфировой структуры с вкрапленниками кварца, полевого шпата, биотита и буровато-серой афанитовой основной массой. Вкрапленники составляют третью часть породы и сложены на 70 % полевым шпатом, 20 % - кварцем, 10 % - биотитом.

Вкрапленники полевого шпата имеют размер от 3 до 6 мм, правильную форму и хорошо выраженную спайность. По окраске выделяются два вида полевых шпатов - белый, местами слегка зеленоватый, по-видимому, плагиоклаз, и розоватый, очевидно, калинатровый полевой шпат.

Вкрапленники кварца имеют округлую форму, их размеры колеблются от 3 до 5 мм, обладают дымчато-серым цветом, стеклянным блеском и раковистым изломом.

Биотит образует шестиугольные блестящие чешуйки черного цвета размерами 1-2 мм.

Плотность магматических пород

Плотность светлых (салических) минералов (калиевый полевой шпат 2,55, кварц 2,65, альбит 2,61, анортит 2,76 г/см^3) ниже плотности темноцветных (мафических) минералов (3,2-3,3 г/см^3).

Плотность плутонических пород находится в строгом соответствии с их минеральным и химическим составом и повышается по мере перехода от кислых к средним и далее к основным и ультраосновным породам (средние значения плотности гранитов 2,58, гранодиоритов - 2,69, габбро - 2,95, дунитов – более 3,2 г/см^3). Уменьшение содержания кремнезема на 20 % соответствует увеличению плотности на 0,37 г/см^3.

Плотность вулканических пород в целом ниже, чем соответствующих плутонических пород (из-за пористости, наличия стекла и других особенностей вулканических пород), но также возрастает по мере перехода от кислых к средним, основным и ультраосновным вулканическим породам. Из-за большего разнообразия структур и текстур диапазон изменения плотности вулканических пород шире, чем у плутонических пород. За счет отсутствия значительной пористости измененные (палеотипные) вулканические породы обычно имеют более высокую плотность, чем свежие (кайнотипные) вулканические породы того же состава.

Плотность плутонических пород при вторичных изменениях обычно уменьшается. Например, плотность ультраосновных пород при их серпентинизации (при замещении оливина и пироксена серпентином – рис. 10) уменьшается (плотность серпентина ниже, чем плотность замещаемых им оливина и пироксена). В массиве Рай-Из (Полярный Урал) слабо- (5 %) серпентинизированные перидотиты имеют плотность (объемный вес)

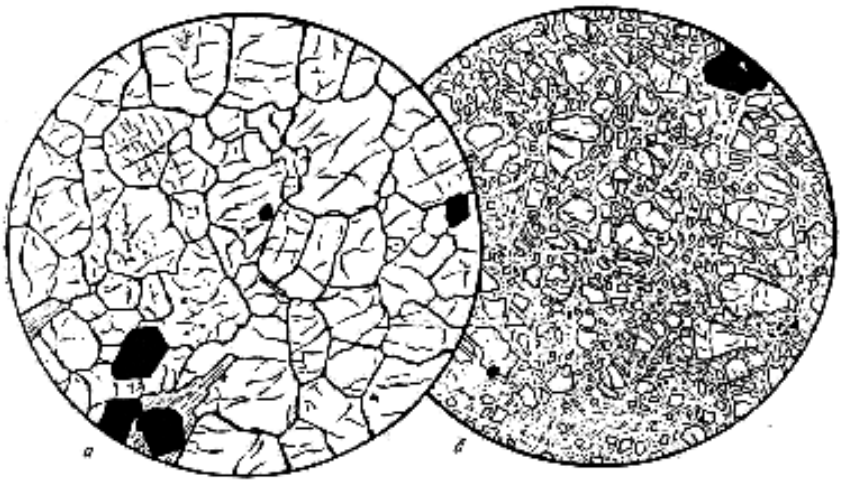


Рис. 10. Дунит: *а* – свежий (оливин, отдельные зерна хромита);
б - серпентинизированный (остатки оливина в в массе серпентина);
диаметр поля зрения: *а* – 4,7 мм, *б* – 4,0 мм (по А. Н. Заварицкому).

3,06 г/см^3, средне- (40 %) серпентинизированные – 2,91 г/см^3, сильно- (70 %) серпентинизированные – 2,70 г/см^3.

При выветривании плотность пород также уменьшается (до 20-25 %) – за счет минеральных превращений (например, образования глинистых минералов) и особенно за счет увеличения пористости (которая в результате выветривания может достигать 25 %).

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Белоусова О. Н., Михина В. В. Общий курс петрографии. М., Недра, 1972.

Миловский А. В. Минералогия и петрография. М., Недра, 1979.

Дополнительная:

Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических пород. М., Логос, 2001.

Петрографический кодекс. Л., Недра, 1995.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

В процессе изучения дисциплины необходимо подготовить ответы на эти вопросы в письменном виде.

1. Химический состав магматических пород
2. Ультраосновные магматические породы
3. Минеральный состав базальтов, андезитов, риолитов
4. Назвать разновидности структур плутонических и вулканических пород
5. Магматические породы основного состава
6. Светлые минералы магматических пород
7. Плотность плутонических и вулканических пород
8. Кислые магматические породы
9. Структуры и текстуры магматических пород
10. Плутонические породы основного и среднего состава
11. Структуры и текстуры эффузивных пород
12. Темноцветные минералы магматических пород

2. ОСАДОЧНЫЕ ПОРОДЫ

Наука об осадочных породах - литология. Это одна из наиболее молодых наук геологического цикла - как геохимия и геофизика, она обязана своим развитием XX веку. Задачей литологии является всестороннее изучение осадочных пород и условий их образования.

Особое значение осадочных пород состоит в том, что они занимают 75 % поверхности суши (мощность осадочной оболочки 0-24 км) и вмещают около 70 % всех извлекаемых человеком полезных ископаемых – уголь, нефть, газ, руды Al, Fe, Mn, U, соли, фосфориты, полезные ископаемые россыпей и др., а также вмещают основную массу подземных вод.

Осадочная порода – геологическое тело, образованное из продуктов физического и химического выветривания литосферы в результате их механического, химического или биологического переноса и осаждения.

Стадии образования осадочных пород

Гипергенез

Гипергенез - это образование исходного материала для осадочных пород – физическое и химическое выветривание более древних горных пород.

Физическое выветривание приводит к преобразованию массивной породы в совокупность обломков (глыбы, щебень, песок). В аридных областях (например, пустынях и полупустынях), в полярных и холодных горных странах развито преимущественно только физическое выветривание.

Химическое выветривание сопровождается разложением исходных минералов выветривающейся породы и образованием новых минералов. При этом происходят различные химические реакции, главной из которых является гидролиз – реакция взаимодействия между минералом и водой. В результате гидролиза наиболее распространенные минералы – полевые шпаты - преобразуются в такие глинистые минералы, как *гидрослюда и каолинит*; при этом кремнезем из полевых шпатов частично переходит в воду, а Na, K, Ca полевых шпатов полностью выносятся водой:

$K[AlSi_3O_8]$ (ортоклаз) + $H_2O \rightarrow$

$KAl[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2 \cdot mH_2O$ (гидрослюда) + KOH + $SiO_2 \rightarrow$

$Al_2[Si_2O_5](OH)_4$ (каолинит) + KOH + $SiO_2 \rightarrow$

$Al(OH)_3$ (гиббсит) + SiO_2

Для обеспечения процесса гидролиза нужна интенсивная циркуляция воды, которая уносит с собой растворимые продукты выветривания (в данном случае KOH и SiO_2).

Рассмотренное выше образование каолинита и гиббсита на месте полевых шпатов происходит *во влажном тропическом климате*. В этом климате в каолинит, гидроксиды Fe, Al и растворенные ионы K^{1+}, Na^{1+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} преобразуются все минералы, кроме кварца. *В умеренном климате* химическое

выветривание проявлено слабее и сопровождается образованием на месте минералов магматических пород таких глинистых минералов, как гидрослюды и монтмориллонит.

Седиментогенез

Седиментогенез - это перенос осадков с места их образования при физическом и химическом выветривании главным образом в морские бассейны; он осуществляется преимущественно реками. Обломки минералов и горных пород переносятся реками преимущественно волочением по дну, глинистые минералы – в виде тонкой взвеси; K^{1+}, Na^{1+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} и другие ионы – в виде растворов.

Осаждение в морских бассейнах

При впадении рек в морские бассейны материал, принесенный речной водой, осаждается на дне моря.

Механическое осаждение. Скорость осаждения частиц в воде пропорциональна квадрату размера частиц, поэтому крупные частицы осаждаются быстро, а мелкие – значительно медленнее, т. е. могут переноситься водами на большее расстояние от берега. В связи с этим достаточно крупнообломочный материал (галька, песок) захороняется в прибрежной зоне. По мере увеличения глубин и расстояния от суши на дне моря происходит отложение все более мелких частиц. Например, песок на дне Черного моря отлагается на глубинах до 20-30 м. Еще более мелкие алевритовые и пелитовые (глинистые) частицы, переносимые в виде взвеси, осаждаются на более значительных глубинах.

Глубоководный шельф и материковый склон в морских бассейнах покрыты главным образом алевропелитовыми осадками, а главная часть ложа океана является областью развития глубоководной глины и биогенных илов. Хотя иногда мутьевыми (суспензионными) потоками по подводным каньонам, которые прорезают шельф и материковый склон, мелководный грубый материал достигает и ложа океана.

В осадках водных бассейнов почти всегда присутствует органическое вещество. В глинистых отложениях его значительно больше, чем в алевритовых и песчаных осадках.

Химическое осаждение. Воды морей и океанов, особенно на глубинах до 100 м, периодически насыщены и пересыщены бикарбонатами кальция, что приводит к осаждению из морской воды кальцита:

$$Ca(HCO_3)_2 \leftrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O.$$

Повышение температуры увеличивает летучесть CO_2 и смещает реакцию вправо. Поэтому карбонатные осадки образуются преимущественно в теплых морях, причем особенно на малых глубинах в зоне действия волн. Часто образование карбонатных осадков связано с жизнедеятельностью организмов (биохимическое осаждение).

При жарком аридном климате и повышенной солености морской воды в прибрежно-морских условиях (в лагунах и заливах) происходит осаждение солей (рис. 11). Они выпадают из морской воды в следующей последовательности: гипс (ангидрит) – галит – сильвин – карналлит.

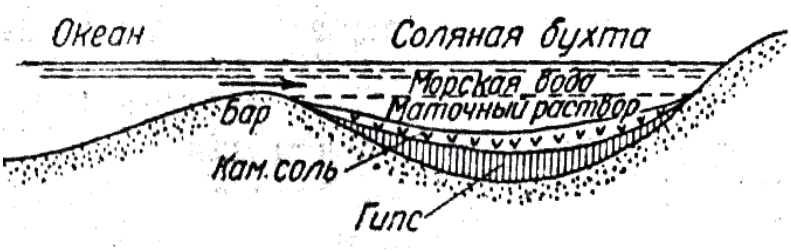


Рис. 11. Схема осаждения солей (по Оксениусу)

Слоистость - характерная особенность строения осадочных пород. Слои обособляются друг от друга или вследствие различия в составе или благодаря наличию поверхностей напластования, являющихся следствием пауз в седиментации (рис. 12). Одна из основных причин слоистого строения осадочных толщ, чередования в разрезе пород различного состава – тектонические колебательные движения при осадкообразовании.

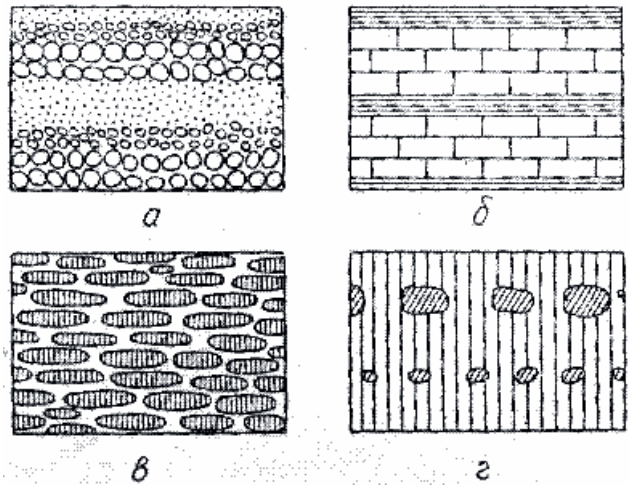


Рис. 12. Слоистость, обусловленная: *а* – изменением крупности зерна; *б* – чередованием слоев разного состава; *в* – горизонтальной ориентировкой частиц; *г* – расположением в одной плоскости какого-либо материала (конкреций, валунов и т.п.); по Л. В. Пустовалову

Отдельные слои могут состоять из мелких (мощностью от долей миллиметра до первых сантиметров) *слойков* (слойчатость); слойки, в отличие от слоев, не имеют какой-либо внутренней структуры и образуются за значительно меньший период времени, в связи с колебаниями факторов седиментации. Граничные поверхности слоя или слойка могут быть параллельными и непараллельными, волнистыми и изогнутыми.

Слоистая текстура породы часто определяет анизотропию коллекторских свойств породы – перпендикулярно слоистости проницаемость пород значительно меньше, чем вдоль слоистости.

Горизонтальная слоистость может быть свойственна различным - аллювиальным, озерным, пролювиальным, водно-ледниковым, лагунным и морским - отложениям. Например, она наблюдается в алевритовых и пелитовых

осадках, которые образуются из частиц, переносимых в виде взвеси и медленно осаждающихся в спокойной воде. Горизонтальная слоистость озерных отложений нередко характеризуется чередованием песчаных слойков, возникших в период весеннего снеготаяния и дождевых периодов, когда в озеро поступает большое количество обломочного материала, и глинистых слойков, возникающих в зимнее время.

Косая (по отношению к горизонтальной плоскости) слоистость – элементарные слойки располагаются под углом к плоскостям наслоения. В большинстве случаев образуется в перемещающихся осадках (прибрежно-морская, дельтовая, речная косая слоистость); встречается в песчаниках, алевролитах, карбонатных породах.

Градационная слоистость – от подошвы к кровле слоя размерность осадочного материала измененяется (например, снизу вверх галька в слое сменяется песком, а затем глиной – рис. 12, *а*); обычно образуется в толщах флишевого типа при отложении осадков из мутьевых (суспензионных) потоков.

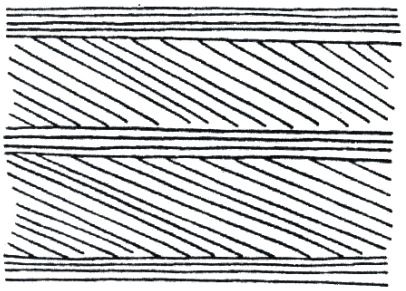


Рис. 13. Потоковая слоистость (по Н.В. Логвиненко)

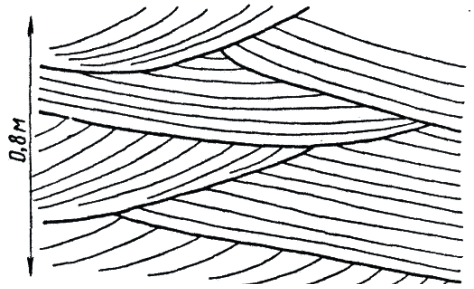


Рис. 14. Диагональная слоистость прибрежно-морского типа

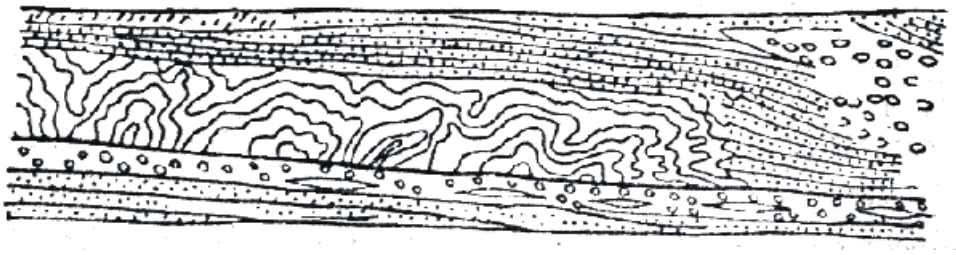


Рис. 15. Подводный оползень в артинских отложениях на западном склоне Урала (по А. А. Иванову)

Диагенез

Свежевыпавший осадок представляет собой рыхлую массу, состоящую из обломков, химически осажденных компонентов и органического вещества, в том числе бактерий. Изменения, происходящие в осадке после его образования, называются диагенезом. В водных бассейнах эти изменения определяются стремлением к достижению химического равновесия между осадком и наддонной водой.

• В морских осадках при высокой солености воды и теплом климате происходит образование доломита на месте первоначально выпавшего кальцита:

$$CaCO_3 + Mg^{2+} \text{ (морской воды)} \rightarrow CaMg(CO_3)_2 .$$

• Характерная особенность осадка, образовавшегося в водной среде – обилие микроорганизмов. Они развиваются в осадке за счет органического вещества. Чем выше дисперсность осадка и меньше глубина погружения осадка, тем больше в нем микроорганизмов.

Сульфатвосстанавливающие бактерии, присутствующие на дне водных бассейнов в восстановительной обстановке, окисляют органическое вещество, отнимая кислород из сульфат-иона наддонной воды. Для бактерий эта реакция играет роль дыхательного акта. Окисленный углерод выделяется при этом в виде углекислого газа CO_2, а восстановленная сера - в форме сероводорода H_2S.

Сероводород может взаимодействовать в осадке с оксидами железа с образованием сульфидов железа, в том числе пирита FeS_2. Пирита образуется тем больше, чем больше в осадке органического вещества, за счет которого развиваются микроорганизмы. В результате пестроты физико-химических условий в разных участках осадка пирит, как и другие диагенетические минералы, может перераспределяться, уходя из одних мест и создавая в других местах сгущения: пятна, линзы, конкреции.

Катагенез

Катагенез - изменения осадков при их погружении на глубину более нескольких десятков метров. Отложения в зоне катагенеза называют не осадками, а осадочными породами.

Зона катагенеза - область развития подземных вод. Нижняя граница зоны катагенеза находится в области прекращения свободного перемещения растворов при почти полном исчезновении пористости пород. Температура при катагенезе может достигать 200 ºС, давление – 200 МПа.

• По мере увеличения глубины залегания пород их пористость и проницаемость понижаются, а плотность и хрупкость возрастают (катагенез глинистых пород – см. ниже).

• При разложении присутствующего в осадочных породах органического вещества на глубинах 2-4 км при температуре 60-150 ºС в осадочных бассейнах образуются нефть и газ (по некоторым авторам, нефть образуется на глубинах 1,8-3,5 км, газ – 3,5-5 км).

• При взаимодействии карбонатов с водой (при температуре выше 75 ºС) может происходить их гидролиз, сопровождающийся выделением CO_2. Гидролиз карбонатов происходит в том случае, если CO_2 может удаляться с места реакции, т. е. при достаточной проницаемости вышележащих пород. Растворение CO_2 в воде приводит к образованию углекислых водных

растворов, из которых при катагенезе может происходить отложение карбонатов в трещинах пород и в виде цемента песчаников.

• В результате процессов растворения под давлением происходит снижение пористости обломочных пород и образование стилолитовых швов (рис. 16).

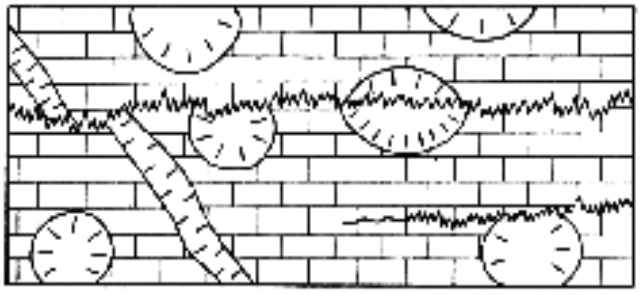


Рис. 16. Стилолитовые швы в известняке, пересекающие стебли кораллов и прожилок кальцита. Верхняя юра, Крым; ½ нат. вел. (по Г. И. Бушинскому)

При более высоких температурах и давлении катагенез сменяется метаморфизмом. В связи с этим ниже осадочных пород часто залегают метаморфические породы, являющиеся в значительной своей части продуктом преобразования осадочных пород. Кроме того, осадочные породы иногда залегают на коре выветривания магматических, метаморфических или более древних осадочных пород.

Обломочные породы

Грубообломочные породы

Псефитовая (грубообломочная) структура - обломки имеют размеры более 2 мм.

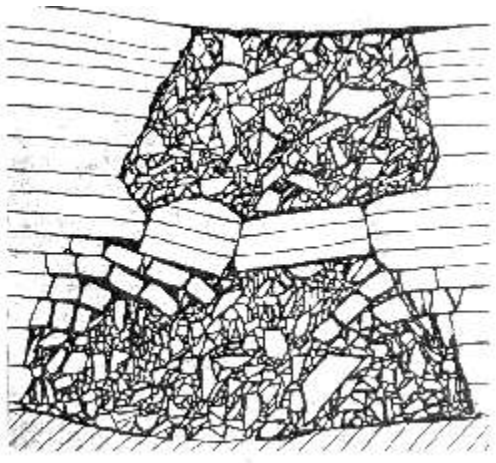


Рис. 17. Доломитовая брекчия, образовавшаяся в результате обрушения слоистых доломитов в полости карстовой пустоты. Среднее Поволжье, 1/20 нат. вел.

Сцементированные породы:
конгломераты (обломки окатаны), *брекчии* (обломки не окатаны – рис. 17)

Несцементированные породы:

(окатанные)	(не скатанные)	(размер обломков)
валуны	*глыбы*	> 200 мм
галька	*щебень*	20-200 мм
гравий	*дресва*	2-20 мм

Песчаные породы

Песчаные породы составляют около 15 % общего объема осадочных пород. Псаммитовая (песчаная) структура - обломки имеют размеры 0,05-2,0 мм:

пески (несцементированные) и *песчаники* (сцементированные)

По размеру обломков пески и песчаники разделяются на крупнозернистые (0,5-2,0 мм), среднезернистые (0,25-0,5 мм), мелкозернистые (0,1-0,25 мм) и тонкозернистые (0,05-0,1 мм).

По составу обломков (определяют с помощью лупы) пески и песчаники разделяются на *кварцевые* и *полимиктовые* (среди обломков наряду с кварцем присутствуют и другие минералы). Среди полимиктовых песчаников выделяют *аркозовые* (светло-серые, розовые - состоят из кварца, полевого шпата, мусковита) и *граувакковые* (темные зеленовато-серые /«грау» - серый/, состоят из кварца, полевого шпата, темных обломков пород).

Граувакковые песчаники – наиболее широко распространенные песчаные породы. Они образуют мощные толщи в складчатых областях. Подавляющее большинство современных континентальных и шельфовых песков также представлено граувакками.

Типы цемента в песчаниках*:*

базальный – зерна не соприкасаются друг с другом (*а* на рис. 18);
поровый – зерна соприкасаются друг с другом (*б* на рис. 18);
пленочный – цемент покрывает поверхность зерен пленкой (*в* на рис. 18);
контактовый – локальный, только в местах контактов зерен (*г* на рис. 18).

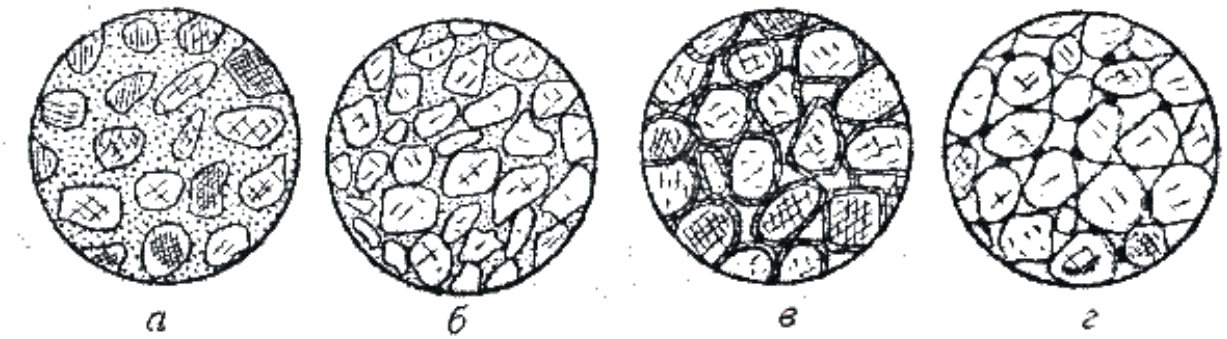


Рис. 18. Типы цемента обломочных пород

По составу цемент в песчаниках может быть глинистым, карбонатным, опаловым, кварцевым и др. Наличие в цементе песчаника карбонатов (кальцита, доломита) устанавливается реакцией с соляной кислотой.

Фациальные разновидности песчаных пород

Прибрежно-морские песчаные породы - преимущественно средне- и мелкозернистые.

Морские песчаные породы - образуют значительные по размерам геологические тела, имеющие форму пластов с постепенно возрастающей в сторону моря мощностью. Встречаются и локальные песчаные тела – бары (протягиваются в море параллельно берегу валами протяженностью до десятков километров при ширине 2-5 км и мощности несколько метров).

Окраска морских песчаников обычно серая, близ поверхности из-за проникновения по порам и трещинам поверхностных вод - серовато-желтая. Цемент морских песчаников часто глинистый или кальцитовый.

Речные песчаные породы - дают геологические тела протяженностью в сотни и тысячи километров при относительно небольшой ширине, мощность – единицы метров.

Дельтовые песчаные породы - образуют тела сложной формы и резко меняющейся мощности. По мере удаления от берега в дельтовых песчаных отложениях возрастает роль алевритового и глинистого материала. При этом из-за повышения содержания органического материала песчаники приобретают все более темную окраску.

Эоловые песчаные породы – в пустынях, полупустынях, на островах и прибрежных частях суши (дюны).

Алевритовые породы

Алевритовая (пылеватая) структура - обломки имеют размеры 0,005-0,05 мм: *лёсс* (несцементированный), *алевролит* (сцементированный).

Пористость обломочных пород

Обломочные породы – одни из самых распространенных коллекторов нефти, газа, подземных вод. Из обломочных пород-коллекторов добывается более половины общего мирового объема добываемых углеводородов, в России и США – это главные породы-коллекторы.

Чаще всего коллекторами являются морские песчаные и алевритовые образования шельфа, прилегающие к континентам морей, дельтовые, речные и эоловые отложения. Типичные представители обломочные пород-коллекторов – мелкозернистые пески и песчаники, крупнозернистые алевриты и алевролиты, песчано-алевритовые породы, реже среднезернистые песчаники. Грубообломочные породы, крупнозернистые пески и песчаники, мелкозернистые алевриты и пелиты редко бывают коллекторами.

Одним из основных факторов, определяющих фильтрационную способность обломочных пород и продуктивность нефтегазоносных пластов, является размер пор в породах. Поровое пространство в обломочные породах представляет собой систему извилистых каналов изменяющегося сечения. Основные пути фильтрации флюидов - самые крупные поры в породе и соединяющие их каналы. Мелкие поры (менее 1-2 мкм) заполнены физически связанной водой и практически непроницаемы.

Размеры межзерновых пор тем больше, чем крупнее и однороднее по размеру обломочные зерна. Поэтому чем больше размер обломочных частиц, тем проницаемость пород выше. Породы, сложенные окатанными частицами, более проницаемы, чем сложенные неокатанными частицами.

Чем однороднее частицы по размерам, тем выше пористость и проницаемость пород (и несколько ниже их плотность). При слабой отсортированности мелкие обломочные частицы заполняют пространство между крупными частицами и снижают пропускную способность поровых каналов.

Песчано-алевритовые породы с большим количеством слюды, чешуйки которой ориентированы параллельно слоистости, отличаются сильной анизотропией проницаемости. В направлении, перпендикулярном ориентировке чешуек слюды, она резко понижена по сравнению с направлением параллельно ориентировке слюды.

Межзерновые поры могут быть первичными – образовавшимися при седиментогенезе, и вторичными – образовавшимися при катагенезе. Кроме межзерновых пор в обломочные породах могут быть и трещинные поры (зияющие трещины).

Пористость во многом определяется характером цемента обломочных пород. При базальном и поровом типах цемента межзерновая пористость очень низка или отсутствует. В песчаниках с карбонатным (кальцитовым) цементом иногда отмечается частичное растворение цемента при катагенезе; это приводит к повышению пористости пород. Например, в мезозойских песчаных и алеритовых породах Прикаспийской впадины при погружении на 2-2,5 км растворяется до 60 % кальцита, в результате чего пористость пород на этих глубинах возрастает до 20-25 % (в целом пористость песчаных пород изменяется от долей процента до 50 %).

Глинистые породы

Глинистые породы - это наиболее распространенные осадочные породы, на них приходится около 70 % от общего объема осадочных пород. Глинистые породы характеризуются высоким содержанием (20-50 %) Al_2O_3 (глинозема).

Глины - тонкодисперсные породы особого минерального состава, размокающие в воде. По мере насыщения водой мельчайшие частицы глинистых минералов покрываются водной оболочкой, в результате чего глины в смеси с водой дают вязкое тесто и становятся пластичными.

Минеральный состав глин (каолинитовые, монтмориллонитовые, гидрослюдистые) может быть макроскопически определен лишь в отдельных случаях для некоторых чистых глин. Многие каолинитовые глины - белые, светло-серые, в воде не разбухают. Монтмориллонитовые глины - светло-серые с желтовато-зеленоватыми оттенками, разбухают или "мылятся" в воде. Гидрослюдистые глины - различной окраски, в воде не разбухают. Точное определение минерального состава глин производится рентгеновским и другими специальными методами.

Каолинитовые глины образуются при химическом выветривании горных пород во влажном тропическом климате. Попадая в море, каолинит преобразуется в гидрослюды.

Гидрослюдистые глины образуются при более слабом химическом выветривании, в том числе в холодном и умеренном климате; это наиболее распространенные глины, к ним относится большинство четвертичных глин России.

Монтмориллонитовые глины – наиболее пластичные и наименее водопроницаемые глинистые породы. Нередко монтмориллонит присутствует в некоторых гидрослюдистых глинах. Иногда среди морских глин встречаются почти мономинеральные протяженные пласты монтмориллонитовых глин (мощностью в единицы или десятки см), которые образуются за счет морского подводного химического разложения вулканического пепла. Это светлые кремовые, светло-зеленые или желтовато-серые породы.

Морские глинистые породы из-за примеси тонкодисперсного органического вещества имеют серую или черную окраску (последнюю придает породе 3-4 % органического вещества). Глинистые породы с тонкодисперсным органическим веществом часто содержат повышенные концентрации U, V, Mo, Ni, Co, Cu.

Глины морского происхождения, состоящие почти исключительно из глинистых частиц, имеют ***пелитовую*** структуру (размер глинистых частиц менее 0,005 мм), в то время как глины континентального происхождения обычно содержат примесь алевритового или псаммитового материала - имеют алевропелитовую или псаммопелитовую структуру.

Катагенез глинистых пород

В ходе катагенеза пористость глинистых пород уменьшается: на глубине до 1 км пористость морских глин составляет десятки процентов, а на глубине 3-5 км - первые проценты (рис. 19). Седиментогенные воды, заполняющие поры в глинистых породах, при катагенезе отжимаются из этих пор в смежные более жесткие пласты (сложенные, например, песчаниками), где еще сохраняется достаточно высокая пористость.

При температуре 100-140 ºС (на глубине 1-3,5 км) монтмориллонит начинает превращаться в глинистых породах в гидрослюду. В ходе этого

процесса из 1 м^3 глины в окружающие породы выделяется до 100-110 л воды, которая находилась в монтмориллоните в химически связанном состоянии.

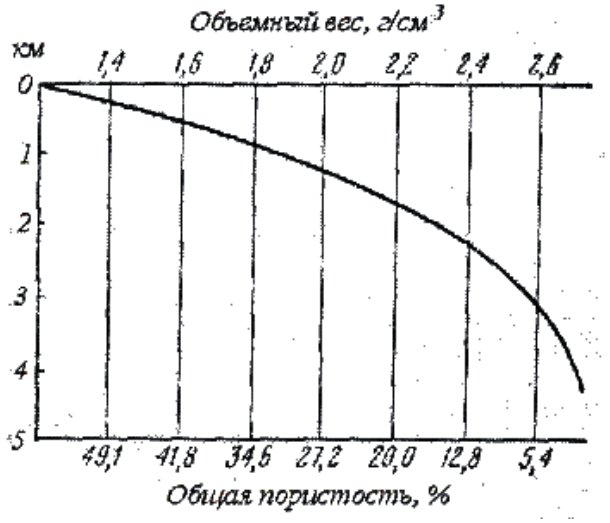


Рис. 19. Зависимость пористости и объемного веса глинистых пород от глубины их погружения (по Белоусовой и Михиной)

Каолинит при повышении температуры в присутствии К также начинает превращаться в гидрослюду, а в присутствии Mg (который может поставляться в раствор при гидрослюдизации монтмориллонита) – в хлорит. В связи с этим глинистые породы преобразуются при катагенезе в хлорит-гидрослюдистые глинистые породы, которые не размокают в воде, не пластичны, имеют пористость 1-2 % – *аргиллиты* (массивной текстуры) или *глинистые сланцы* (раскалываются на тонкие плитки).

Глинистые породы на месторождениях углеводородов

Хотя глинистые породы – флюидоупоры, в некоторых случаях в них может содержаться нефть – в трещинах, образовавшихся после уплотнения глинистых пород. То есть глинистые породы иногда могут быть. трещинными и кавернозно-трещинными коллекторами.

В баженовской свите верхней юры Западной Сибири черные битуминозные гидрослюдистые глины с тонкими прослоями и линзочками алевритистых, кремнистых и карбонатных разностей являются нефтепродуцирующей толщей. В этих глинах наряду с преобладающими гидрослюдами широко развиты смешанослойные минералы (гидрослюда-монтмориллонит), имеются примеси каолинита и хлорита. Темная окраска глин обусловлена примесью органического вещества. Генерируемая нефть накапливается в глинах в микротрещинах длиной 0,01-0,03 мкм и по плоскостям наслоения.

Отложения баженовской свиты образовались в морских и прибрежно-морских условиях. При этом в центральных частях морского бассейна отлагались наиболее битуминозные глины, а в прибрежных частях морских бассейнов в глинах появляются прослои песчаников и алевролитов. В результате периодического поступления в морской бассейн холодных

арктических вод и массовой гибелью в связи с этим теплолюбивых морских организмов, в глинистых осадках накапливалось большое количество органического вещества, за счет которого при катагенезе генерировалась нефть.

Хемогенные и биогенные породы

Хемогенные породы образуются в результате выделения из морской воды тех или иных минералов без участия организмов, а биогенные – при участии организмов. Оба вида пород рассматриваются вместе, так как могут иметь одинаковый химический и минеральный состав, часто встречаются совместно и не всегда различимы между собой.

Карбонатные породы

Карбонатные породы составляют 20 % от всех осадочных пород, образуются в теплых мелководных морях, по способу осаждения в основном биогенные.

Обычно имеют светлую окраску, но в случае присутствия органического вещества (обычно являющегося спутником глинистой примеси) могут иметь темно-серую окраску, а нефтеносные карбонатные породы могут быть черными или буровато-черными.

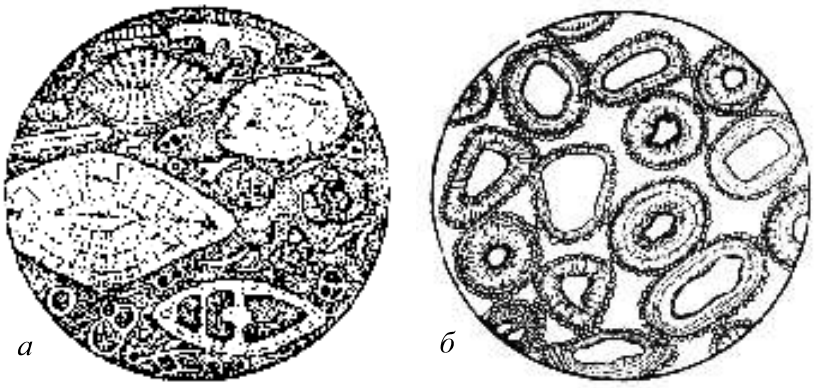


Рис. 20. Известняки под микроскопом: *а* – органогенный (раковины фораминифер находятся в связующей массе, состоящей из микрокристаллического кальцита); *б* – оолитовый (оолиты состоят из обломочных зерен кварца, окруженных каемкой карбоната). Диаметр 3 мм (по Х. Вильямсу)

Известняк - состоит из кальцита $CaCO_3$, вскипает при взаимодействии с разбавленной (2-5 %) соляной кислотой:

- органогенный (цельнораковинный и детритовый - состоящий из обломков раковин);
- оолитовый (оолиты - шарики концентрического строения размерами до 1-2 мм);
- пелитоморфный (зерна менее 0,005 мм);
- перекристаллизованный: микрозернистый 0,005-0,05 мм
  мелкозернистый 0,05-0,25 мм

среднезернистый	0,25-0,5 мм
крупнозернистый	0,5-1,0 мм
грубозернистый	>1,0 мм

(те же названия структур используются и для других приводимых ниже осадочных пород).

Цельнораковинные органогенные известняки могут быть рифовыми и ракушняковыми.

Рифы – подводные или надводные известковые постройки, сложенные скелетами организмов в их прижизненном положении. В период своего образования риф возвышался над дном моря и организмы жили вблизи поверхности воды (рифы образуются в зоне прогибания морских бассейнов).

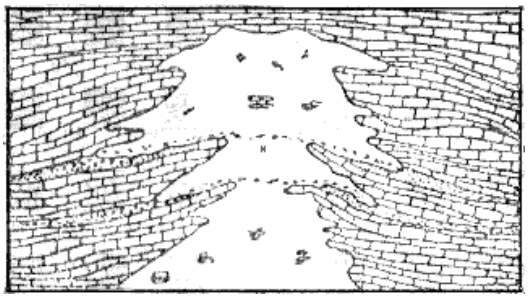


Рис. 21. Коралловый риф (по У. Твенхофелу)

Рифовые известняки могут состоять из скелетов известковых водорослей, кораллов, мшанок и др. Карбонат выпадает на поверхностях, а иногда и внутри клеток водорослей в результате поглощения ими CO_2 из морской воды и практически сразу становится твердым; последнее объясняет каркасообразующую роль водорослевых известняков в теле рифа. В современных морях главные рифоообразующие организмы – кораллы, коралловые водоросли и фораминиферы.

Ракушняковые известняки образуются на отмелях.

Пелитоморфные известняки могут иметь хемогенное и биогенное происхождение. Писчий мел - одна из разновидностей пелитоморфных известняков – сложен главным образом мельчайшими известковыми фрагментами водорослей.

Ме́ргель близок к писчему мелу, но содержит до 50% глинистой примеси. С глинистой примесью часто ассоциирует органическое вещество, придающее породам серый и черный цвет. Так как мергель представляет собой смесь кальцита и глинистого вещества, под действием разбавленной соляной кислоты он вскипает и на месте капли кислоты остается грязное глинистое пятно.

Доломит $CaMg(CO_3)_2$ - под действием разбавленной соляной кислоты не вскипает или вскипает значительно слабее, чем известняк (доломит вскипает в порошке, который можно получить, поцарапав породу куском стекла).

Коллекторские свойства карбонатных пород

Карбонатные породы обладают достаточно высокой пористостью (средняя пористость известняков 5,3 %). Иногда пористость даже на больших глубинах (более 8 км) достигает 20 %. Поры сообщаются между собой и

жидкость через них может фильтроваться. Таким характером пористости во многом объясняется как сильная обводненность карбонатных пород, так и приуроченность к карбонатным породам значительной части мировых промышленных запасов нефти.

Поры в карбонатных породах разделяются на первичные (образуются на стадии седиментогенеза) и вторичные (образуются на стадии катагенеза и при гипергенезе). Поры располагаются между зернами карбонатов, между раковинами, их обломками, между оолитами, внутри раковин (фораминифер, кораллов и др.). Наиболее высокая пористость и наиболее благоприятные коллекторские свойства - у биогенных, органогенно-детритовых и обломочных известняков. Микрозернистые и пелитоморфные известняки и доломиты имеют низкую пористость и проницаемость.

Состоящие из раковин карбонатные породы из-за жесткого каркаса раковин при погружении практически не уплотняются и пористость в них поэтому не сокращается, тогда как пелитоморфные и микрозернистые карбонатные породы при погружении значительно уплотняются и их пористость в связи с этим уменьшается.

В связи с растворимостью карбонатов в воде (растворимость кальцита воде при наличии CO_2 может достигать 1 г/л) в карбонатных породах могут образовываться вторичные поры. Вода, попадая в первичные поры и трещины карбонатных пород, частично растворяет (выщелачивает) карбонат, что приводит к увеличению размеров пор и возрастанию пористости.

Подобное выщелачивание происходит в первично-пористых и исходно-трещиноватых карбонатных породах, в которые может проникать и через которые может фильтроваться вода. В пелитоморфных и микрозернистых карбонатных породах, которые обладают низкой исходной пористостью, вторичные пустоты выщелачивания возникают преимущественно лишь вдоль трещин в породах.

Соляные породы (эвапориты)

Каменная соль - состоит из галита NaCl (бесцветный, красноватый, синий; соленый на вкус).

Образует мощные (от сотен метров до 1-2 км) толщи однородной породы, на флангах переслаивающиеся с другими соляными породами, доломитами и известняками, а также с глинами. Каменной соли свойственны высокие экранирующие свойства – она обладает высокой пластичностью и поэтому, в отличие от других осадочных пород, обычно не содержит трещин, по которым могла бы происходить фильтрация жидкости или газа.

Сильвинит - смесь галита NaCl и сильвина KCl (сильвин молочно-белый с буро-красными оторочками, горько-соленый на вкус).

Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - белый, серый, твердость 2. Гипс растворяется в воде в 10-20 раз сильнее, чем карбонаты: его растворимость в воде достигает 2,6 г/л.

Ангидрит $CaSO_4$ - серый, реже белый, красноватый, твердость 3,5. Нередко возникает при дегидратации гипса на глубинах 100-200 м и более.

Кремнистые породы

Рис. 22.Схема залегания кремня в известняке (по Теодоровичу)

Кремнистые породы, сложенные **опалом** $SiO_2 \cdot nH_2O$:

диатомит (сложен скорлупками диатомовых водорослей), *трепел* (состоит из комочков опала, возникает при преобразовании диатомитов) - легкие, светлые, рыхлые;

опока (наиболее глинистая разность опаловых кремнистых пород, в которой отдельные комочки опала в той или иной степени сцементированы между собой) - серая, белая, очень легкая, хрупкая, с раковистым изломом, тонкопористая (прилипает к языку).

Кремнистые породы, сложенные **халцедоном и кварцем**:

кремни - серые, черные, нередко встречаются в виде конкреций в карбонатных породах;

яшмы - бурые, красные, серые, зеленые, темносерые, черные; образуются в результате преобразования кремнистых илов, содержащих органические остатки, при осаждении кремнезема в местах подводной вулканической деятельности и др.

Глиноземистые породы

Бокситы (содержание глинозема Al_2O_3 более 46 %)- внешне разнообразны: от белых глиноподобных пород до очень плотных темно-серых, почти черных зернистых пород; часто красно-коричневый цвет, бобовая и оолитовая структура.

Каустобиолиты

Торф – полуразложившиеся растительные остатки от бурого до почти черного цвета (содержание углерода до 57-59 %). Образуется при избытке влаги и отсутствии или слабом доступе кислорода (в восстановительных условиях).

Сапропель – ил, содержащий большое количество органических веществ (до 60-70 % углерода), – образуется на дне болот и озер, часто вместе с торфом.

Горючие сланцы – глинистые или известковистые породы, содержащие 20-60 % органического вещества, загораются от спички; образуются в озерах, лагунах, морях.

При катагенезе под влиянием давления вышележащих осадков и повышения температуры торф превращается в ископаемый уголь. Сначала образуется *бурый уголь* (рыхлый землистый бурого цвета или плотный черного

цвета), затем *каменный уголь* (содержание углерода до 82 %). Наиболее высокой степенью углефикации отличаются *антрациты*, состоящие из почти чистого углерода.

Осадочные фации и формации

Важная задача литологии – определение условий образования осадочных пород на основе их детального изучения (литолого-фациальный анализ). Фация – комплекс отложений, отличающийся составом и физико-географическими условиями образования от соседних отложений того же стратиграфического интервала. Фация характеризует обстановку образования породы.

Морские фации

Являются наиболее широко распространенными среди осадочных пород. Морским фациям свойственно постоянство состава пород на обширных территориях и обилие органических остатков животного происхождения.

Фации прибрежных частей шельфа (глубина моря до 30 м). Здесь образуются песчаники с незначительной примесью глинистых частиц, окатанными зернами и характерной разнонаправленной косой слоистостью; алевролиты и глины с примесью песка; оолитовые, органогенно-обломочные и обломочные известняки (пористость возникающих здесь карбонатных пород достигает 20-30 %).

Пляжевые отложения образованы береговыми валами, сложенными хорошо отсортированными осадками с различными косослоистыми текстурами (углы наклона косых слойков до 15º). Пляжевые отложения образуются за счет песков, выбрасываемых морем.

В прибрежных частях шельфа встречаются бары – песчаные валы, выходящие гребнем на поверхность моря, которые образуются за счет перемещения обломочного материала волнами со стороны моря к суше. Они располагаются параллельно берегу моря, имеют плоское основание и выпуклую верхнюю поверхность. Длина отдельных баров более 100 км при ширине 10-16 км.

Коллекторами в прибрежно-морских фациях могут быть терригенные (подводные валы и гряды, бары, отложения пляжа, береговых дюн), терригенно-карбонатные и карбонатные породы. Среди этих отложений практически нет флюидоупоров - глинистых пород (они более глубоководные). Поэтому прибрежно-морские фации обычно перспективны на нефть и газ лишь в случае их перекрытия трансгрессивными глинистыми отложениями более глубоководных частей морских бассейнов.

Фации мелководных частей шельфа (глубина моря 30-100 м). Образованы главным образом мелкозернистыми и среднезернистыми песчаниками, алевролитами. Глинистых пород мало (присутствуют в отдельных впадинах), они обычно содержат примесь обломочного материала. Встречаются известняки, в том числе рифовые. Характерна горизонтальная и

пологоволнистая слоистость. Условия для накопления органического вещества лучше, чем в прибрежных фациях, но из-за преобладания окислительной геохимической обстановки все же малоблагоприятны.

К мелководно-морским фациям в нефтегазоносных провинциях часто приурочены основные скопления углеводородов (коллекторы - терригенные и карбонатные породы). Среди карбонатных пород наибольшее промышленное значение имеют рифовые известняки (пористость 25-35 %), меньшее – органогенные, органогенно-обломочные и обломочные карбонатные породы (пористость 17-25 %), образовавшиеся в мелководных морях со значительной гидродинамической активностью.

Из-за примеси песчано-алевритового материала глинистые отложения мелководно-морских фаций дают покрышки невысокого качества.

Фации умеренно-глубоководных частей шельфа (глубина моря 100-200 м, реже до 400 м). Характерны слабые течения и бедный органический мир.

Здесь образуются гидрослюдистые и монтмориллонитовые глины, отмученные, без примеси песчаных частиц. В зонах донных течений присутствуют песчаники. Имеются как планктоногенные органогенные породы – фораминиферовые известняки, диатомиты, опоки, так биохемогенные и хемогенные породы. Наблюдается тонкая горизонтальная слоистость.

Эти отложения благоприятны для накопления органического вещества (планктона). Горючие сланцы доманикового горизонта и баженовской свиты, являющиеся генераторами нефти в Волго-Уральской и Западно-Сибирской нефтегазоносных провинциях, накопились в этих частях морских бассейнов.

В образовавшихся в зонах морских течений песчано-алевритовых и грубообломочных породах, изолированных глинами, могут быть нефть и газ. Мощные чисто глинистые толщи умеренно-глубоководной фации являются региональными глинистыми покрышками высокого качества.

Глубоководные фации (глубина более 400 м). В современных глубоководных отложениях 60% составляют глины, 25 % - пески, 10 % - галька и гравий, 5 % - раковины и оолиты. Осадочный материал привносится морскими течениями и подводными мутьевыми потоками по каньонам, рассекающим материковый склон от шельфа до абиссальных глубин. Отложения мутьевых потоков встречаются на глубинах до 10 км.

Глубоководные фации благоприятны для образования глинистых флюидоупоров высокого качества. В периферических частях глубоководных областей накапливается планктоногенный органический материал, а центральные наиболее глубоководные части этих областей резко обеднены органической жизнью и неблагоприятны для образования потенциально нефтегазоматеринских толщ.

Фации, переходные от морских к континентальным

Для этих фаций характерны пестрота состава, невыдержанность его по площади и разрезу, наличие органических остатков.

Лагунные фации (лагуны - мелководные части морских бассейнов, отделенные от основного моря песчаными косами, пересыпями или барами). Сложены мелкозеристыми песками, алевритами, глинами.

В условиях влажного климата лагуны опресняются и постепенно превращаются в торфяные болота, происходит образование лагунных угленосных песчано-глинистых толщ. В теплом климате в лагунах может также накапливаться сапропелевое органическое вещество, за счет которого происходит образование природного газа.

В сухом и жарком климате происходит засолонение лагун и отложение в них эвапоритов (см. рис. 11), которые являются регионально выдержанными флюидоупорами - некоторые соленосные лагуны занимали в прошлом громадные территории и в них могли накапливаться скопления солей мощностью более 1,5 км.

Дельтовые фации (в устьях рек и в прилегающих прибрежных зонах морских бассейнов или озер). Отложения дельт могут занимать площади во многие тысячи км^2, мощность дельтовых отложений может достигать нескольких километров.

Эти фации образованы преимущественно тонкозернистыми аллювиальными отложениями русловых потоков, часто меняющих свое положение, а также отложениями озер и болот, периодически возникающих на месте дельт, прибрежно-морскими образованиями. Доля песчаных пород составляет около 25 %. Характерно широкое развитие косослоистых текстур.

Дельтовые отложения являются нефтегазоматеринскими – из-за смешения вод различной солености и температуры в дельтах происходит массовая гибель планктона и в большом количестве накопливаются органические остатки. Из-за резкой фациальной изменчивости в дельтовых отложениях имеются многочисленные литологические ловушки нефти и газа; их покрышками служат глинистые дельтовые отложения.

Континентальные фации

Элювиальные фации (коры выветривания). При длительных перерывах осадконакопления на породах нередко образуются коры выветривания мощностью до нескольких десятков метров. Они представляют собой коллекторы с высокой пористостью (особенно нижние части кор выветривания). Залежи нефти и газа известны, например, в корах выветривания доюрских отложений Западной Сибири и в корах выветривания фундамента Русской платформы.

Аллювиальные фации. Русловые песчаные и алевритовые отложения узкими извилистыми полосами (с линзовидным поперечным сечением) прослеживаются среди пойменных отложений, преимущественно глинистых. Характерна направленная вниз по течению реки косая слоистость. Потенциальными коллекторами являются наиболее грубозернистые русловые аллювиальные фации (пористость русловых песчаников 3-20 %).

Озерные и болотные фации. Озерные фации гумидного климата благоприятны для накопления органического вещества сапропелевого типа (особенно в неглубоких хорошо проветриваемых озерах с восстановительной обстановкой в придонном слое). В болотных фациях накапливаются громадные массы органического вещества преимущественно гумусового типа, в дальнейшем преобразующегося в каменные угли.

Осадочные формации

Осадочные формации – литологически однородные крупные геологические тела, образующиеся в определенных палеотектонических и палеогеографических условиях и соответствующие по своему стратиграфическому объему ярусу или отделу, реже – нескольким отделам или части яруса. Осадочные формации – это комплексы фаций, сформировавшихся в постоянных или слабо изменяющихся тектонических и климатических условиях. Например, песчано-глинистые угленосные формации состоят из прибрежно-морских, лагунных, дельтовых, аллювиальных, озерных и болотных фаций, возникавших в гумидном климате при существенной дифференциации тектонических движений. Смена формаций обусловлена существенным изменением тектонического режима и (или) климата.

Для формаций платформ характерна относительно небольшая мощность при обширных площадях распространения. Образование этих формаций происходило преимущественно в мелководно-морских, переходных и континентальных условиях при небольшой скорости осадконакопления (метры, первые десятки метров за 1 миллион лет). Формации складчатых областей имеют огромные мощности, измеряемые километрами, полосовидное распространение.

Формации, благоприятные для формирования скоплений нефти и газа:

- песчано-глинистые и карбонатные (для древних платформ);
- песчано-глинистые угленосные, песчано-глинистые глауконитовые, карбонатные и карбонатно-терригенные (для молодых платформ);
- угленосные, карбонатные, терригенно-карбонатные, терригенно-туффито-кремнистые, тонкая моласса, флиш (для геосинклинальных и переходных областей).

Среди терригенно-карбонатных нефтегазоносных формаций выделяются доманиковые формации – с аномально высоким содержанием рассеянного органического вещества преимущественно сапропелевого типа. Характерна тонкодисперсность и повышенная кремнистость терригенных пород, тонкая слоистость. Доманиковая субформация баженовской свиты Западной Сибири на 80 % сложена глинами (см. выше).

В Апшеронской нефтегазоносной области развита тонкая молассовая формация – переслаивание глин, алевролитов, песчаников, гравеллитов и конгломератов общей мощностью более 4 км (речные, дельтовые, озерные фации). На глинистые породы приходится 50-60 % от общего количества пород.

Коллекторами являются песчаникики и алевролиты. Образование формации происходило в условиях пресноводного мелководного бассейна озерного типа, куда реками сносился обильный обломочный материал с окружающей суши (большое значение имеют отложения палеодельты Волги).

Флиш – мощная серия морских осадочных отложений с регулярным чередованием не менее трех разновидностей пород, зернистость которых уменьшается вверх по разрезу (градационная слоистость – рис. 12, *а*). Характерен полимиктовый состав песчано-алевритового материала и малое количество органических остатков.

Флиш образуется в узких морских бассейнах глубиной до 1 км (например, Кавказский флишевый бассейн – прогиб длиной в несколько сотен километров при ширине 50-150 км). Осадки отлагаются на значительной глубине у подножья крутых склонов из мутьевых потоков, которые возникают в результате подводных оползней при землетрясениях или при сильных паводках рек (некоторые потоки перемещаются на расстояние до 1000 км со скоростью до сотен километров в час).

СЛОВАРЬ

Аридный климат – жаркий засушливый, с малыми годовыми суммами осадков при очень сильном солнечном нагреве.

Глауконит – зеленый минерал из группы гидрослюд, встречающийся в морских осадках.

Гравеллит – сцементированный гравий.

Гумидный климат – влажный, с резким преобладанием количества осадков над испарением.

Коллектор – пористая, проницаемая порода, в которой возможно перемещение воды и углеводородов.

Покрышки – непроницаемые породы, перекрывающие залежи углеводородов.

Пролювий – отложения селевых потоков горных рек или других временных потоков, возникающих в периоды интенсивного выпадения осадков или таяния снега и ледников в горах.

Терригенные осадки – состоящие в основном из твердых продуктов денудации суши (обломков пород, минералов, глинистых частиц).

Трансгрессия – наступание моря на сушу.

Туффит – осадочно-вулканогенная порода, состоящая из осадочного и вулканогенного материала (последнего не менее 50%).

Флюидоупор – порода, непроницаемая или мало проницаемая для углеводородов и воды.

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Прошляков В. К., Кузнецов В. Г. Литология. М., Недра, 1991.

Логвиненко Н. В. Петрография осадочных пород. М., Недра, 1974.

Дополнительная:

Фролов В. Т. Литология. М., Изд. МГУ, 1992 (кн. 1), 1993 (кн. 2), 1995 (кн. 3).

Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород. М., Недра, 1986.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается физическое и химическое выветривание в условиях разного климата?
2. Механическое и химическое осаждение осадков в морских водоемах.
3. Типы слоистости осадочных пород.
4. Охарактеризуйте процессы диагенеза и катагенеза.
5. Приведите классификацию обломочных пород.
6. Назовите разновидности песчаников по размеру обломков и по минеральному составу.
7. Фациальные разновидности песчаных пород.
8. Условия образования и применение каолинитовых, гидрослюдистых и монтмориллонитовых глин.
9. Катагенез глинистых пород и переход воды из химически связанного в свободное состояние.
10. Разновидности карбонатных пород и условия их образования.
11. Пористость, прочность и растворимость карбонатных пород.
12. Коллекторские свойства песчаных и карбонатных пород.
13. Охарактеризуйте соляные породы и условия их образования.
14. Фации морских отложений.
15. Лагунные и дельтовые фации.
16. Континентальные фации.
17. Приведите примеры осадочных формаций, с которыми могут быть связаны месторождения нефти и газа.

3. МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ

Метаморфизм – изменение структуры и состава породы, происходящее при повышении температуры и давления, при участии растворов, без расплавления породы. Например, при метаморфизме на месте глинистой породы может образоваться гранат-мусковит-кварцевый сланец. Метаморфизму подвергаются осадочные, магматические и ранее образованные метаморфические породы. Температура метаморфизма – от 100-200 ºС до температуры частичного плавления пород (650-1000 ºС).

Изохимический метаморфизм – не сопровождающийся изменением химического состава породы.

Текстуры метаморфических пород

Выделяются следующие разновидности текстур метаморфических пород:

- *сланцеватая* - параллельное расположение чешуек слоистых силикатов, из-за чего порода раскалывается на тонкие плитки; породы сланцеватой текстуры называются сланцами;
- *гнейсовидная* - менее строгая параллельность чешуек слоистых силикатов и их меньшее содержание, чем в сланцах; при раскалывании порода гнейсовидной текстуры дает, в отличие от сланцеватой текстуры, плитки толщиной не менее нескольких сантиметров;
- *линейная* – призматические минералы ориентированы в одном направлении (линейность);
- *полосчатая*;
- *массивная*.

Метаморфические породы разделяются на 5 классов: 1) регионально-метаморфические; 2) контактово-метаморфические; 3) ультраметаморфические; 4) тектоно-метаморфические; 5) метасоматические.

Регионально-метаморфические породы

Регионально-метаморфические породы - это наиболее распространенные метаморфические породы, которые развиты на обширных площадях в областях складчатости и гранитообразования. В не подвергшихся складчатости прогибах, несмотря на значительное (до 25 км) погружение толщ, региональный метаморфизм не проявляется.

Метаморфическая фация – совокупность горных пород, образовавшихся при определенных температурах и давлении.

Зеленосланцевая фация (350-450 ºС)

В породах присутствуют хлорит, серицит, тальк, серпентин и др. Зерна минералов нередко очень мелкие.

Филлиты - тонкозернистые сланцеватые породы с шелковистым блеском плоскостей сланцеватости (из-за параллельного расположения обычно не различимых на глаз чешуек серицита и хлорита) и низкой твердостью. В связи с примесью углеродистого вещества часто имеют окраску от темно-серой до черной. Образуются при метаморфизме глинистых пород (метапелиты).

Зеленые сланцы - тонкозернистые породы, содержат хлорит, а также более твердые минералы (актинолит, эпидот, альбит и др.), из-за чего царапают стекло. Образуются при метаморфизме основных магматических пород, главным образом базальтов (метабазиты).

Серпентиниты – состоят из серпентина (иногда содержат хризотил-асбест), образуются по ультраосновным магматическим породам (дунитам, перидотитам).

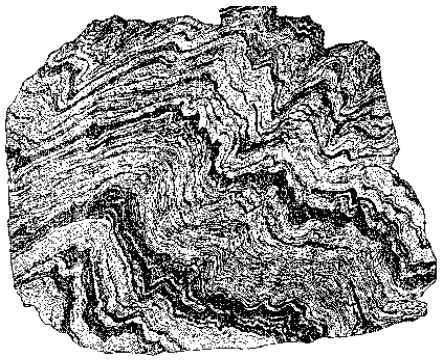


Рис. 23. Зеленый сланец плойчатой текстуры (по Ю. И. Половинкиной)

Рис. 24. Гранат (*гр*)-кварц (*кв*)-биотитовый (*би*) сланец

Амфиболитовая фация (550-750 ºС, 400-800 МПа)

Зерна минералов достаточно крупные, различимы макроскопически. Названия породам даются путем перечисления минералов в порядке возрастания их количества: например, гранат-биотитовый сланец, мусковит-кварцевый сланец и т. п.

Кристаллические сланцы (*кристаллосланцы*) - содержат гранат, биотит, мусковит, кварц и др. минералы; полевых шпатов не более 20 % (рис. 24). Образуются при метаморфизме глинистых пород.

Гнейсы - гнейсовидная текстура, более 20 % полевых шпатов. Образуются при метаморфизме кварц-полевошпатовых магматических (граниты) и осадочных (песчаники) пород.

Амфиболиты - содержат в значительных количествах роговую обманку; в зависимости от сопутствующих минералов выделяются плагиоклазовые, гранатовые, эпидотовые и другие амфиболиты. Образуются при метаморфизме основных магматических пород, преимущественно базальтов.

Гранулитовая фация (700-800 ºС, высокое давление)

Гранулиты - пироксеновые гнейсы (кварц, полевые шпаты, пироксен, гранат).

Большинство пород гранулитовой фации образуется в докембрии. Они обычно находятся в пределах щитов, но иногда присутствуют и в фанерозойских орогенических поясах (например, на Урале) в виде поднятых блоков докембрийского фундамента.

Эклогитовая фация (700 ºС, 1300 МПа)

Эклогиты - содержат красно-бурый гранат и зеленый пироксен.

Во всех фациях метаморфизма встречаются:

- *кварциты* - состоят из зерен кварца, отличаются от исходных кварцевых песчаников тем, что раскалываются с разрывом кварцевых зерен и образованием ровной поверхности скола;
- *мраморы* - состоят из зерен карбонатов (кальцита, доломита), отличаются от исходных карбонатных осадочных пород (например, известняков) более крупной зернистостью.

Таблица 4

Некоторые метабазиты и метапелиты

Исходные породы	Фация зеленых сланцев	Амфиболитовая фация	Эклогитовая и гранулитовая фации
Магматические породы основного состава	Зеленые сланцы	Амфиболиты	Эклогиты
Глинистые и кварц-полевошпатовые породы	Филлиты	Кристаллические сланцы и гнейсы	Гранулиты

С повышением степени метаморфизма плотность метаморфических пород возрастает: зеленые сланцы – 2,6-2,7 г/см^3, амфиболиты – 2,9-3,3 г/см^3, эклогиты – 3,3-3,6 г/см^3.

Ультраметаморфические породы

Ультраметаморфические породы образуются в условиях начинающегося плавления пород (550-670 ºС). *Мигматиты* - кристаллические сланцы и гнейсы с многочисленными возникающими в результате начинающегося плавления гранитными, аплитовыми или пегматитовыми выделениями.

Наиболее широко развиты полосчатые мигматиты. Присутствующий в них жильный материал гранитного состава в виде параллельных полос прослеживается иногда на десятки метров и первые километры.

Контактово-метаморфические породы

Контактово-метаморфические породы образуются на относительно небольших глубинах (до 1-3 км) вокруг массивов интрузивных пород. Температуры контактового метаморфизма 300-800 ºС, давление до 100-300 МПа. Магма, нагретая до 800 ºС и застывающая на глубине 1-2 км от земной поверхности, может прогреть породы у контакта до 550 ºС. Продукты контактового метаморфима – *контактовые роговики* - нередко имеют очень мелкозернистую структуру.

Динамометаморфические породы (тектониты)

Динамометаморфические породы образуются главным образом в зонах разломов.

Тектонические брекчии – остроугольные обломки исходных пород сцементированы мелкодробленой массой (рис. 13, *а*).

Катаклазиты – продукты начальной стадии дробления (рис. 13, *б*).

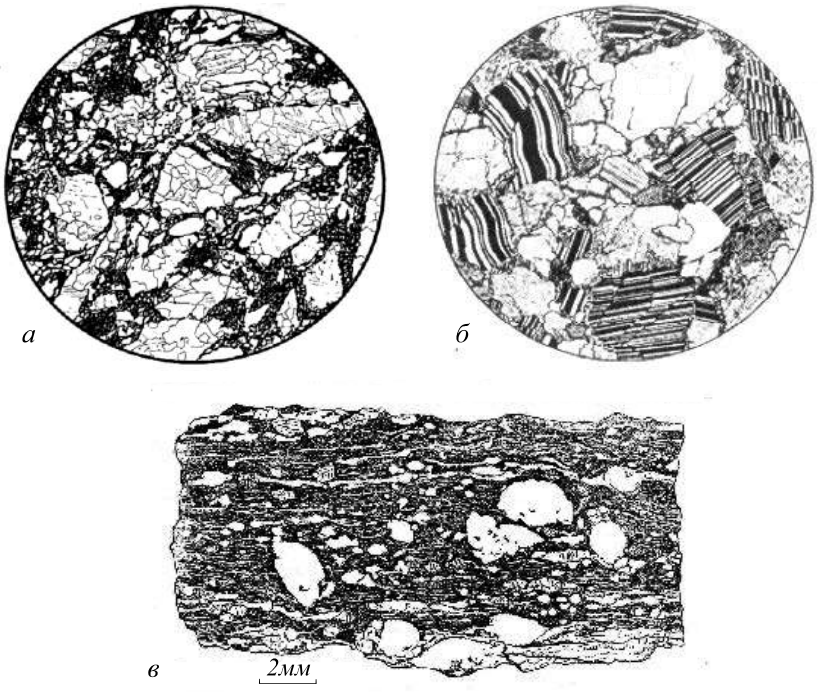


Рис. 25. Динамометаморфические породы: *а*- ***брекчия*** гранита; гранит разбит на угловатые обломки, связанные тонкоперетертым материалом того же гранита; *б* – ***катаклазированный*** гранит (ув. 30); *в* – ***милонитизированный*** гранит; обломки зерен полевых шпатов в тонко «истертой» породе; текстура породы параллельная, сланцеватая и очковая (по Ю. И. Половинкиной)

Милониты – результат самой сильной деформации, сложены более, чем на 50 % новообразованным мелкозернистым агрегатом. В отличие от катаклазитов, им свойственны сланцеватые и полосчатые текстуры. В мелкозернистой массе имеются реликты минералов исходной породы (рис. 13, *в*).

Метасоматические породы

Метасоматоз – метаморфизм с изменением химического состава породы (сопровождается привносом и выносом компонентов).

При метасоматических изменениях пористость пород часто увеличивается, объемный вес и предел прочности пород на сжатие нередко уменьшается.

А) **Кислотные метасоматиты**

Образуются под действием кислых растворов (кислотность обусловлена высокой концентрацией в растворах CO_2, Cl^{1-}, F^{1-}).

Грейзены - кварц, мусковит (крупные чешуйки), иногда флюорит, турмалин, топаз и др. Образуются по породам кислого состава. Температура образования грейзенов (грейзенизации) 350-450 град. Часто встречаются на месторождениях олова и вольфрама (рис. 26).

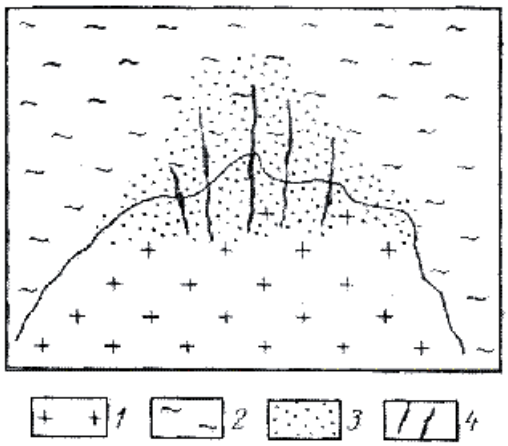
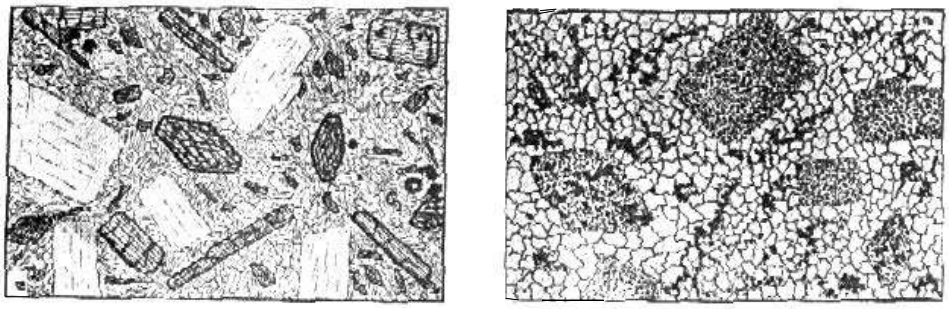


Рис. 26. Схема пространственных соотношений гранитов (1) и вмещающих их сланцев и гнейсов (2) с грейзенизированными породами (3) и рудными жилами (4); по Б. И. Омельяненко.

Березиты - кварц, серицит (очень мелкая белая слюда), пирит, карбонат. Образуются по породам кислого и среднего состава (рис. 27). Температура березитизации менее 350ºС. Встречаются на месторождениях золота (например, на Березовском месторождении золота, по которому и дано название породы), урана и др.

Лиственити - железисто-магнезиальный карбонат (не вскипает под действием разбавленной соляной кислоты), кварц, зеленая хромовая слюдка. Возникают по ультраосновным породам. Встречаются на месторождениях золота (Березовское) и др.



а *б*

Рис. 27. Березитизация диоритового порфирита (по Б. И. Омельяненко):
а – неизмененная порода: порфировые вкрапленники плагиоклаза и роговой обманки в мелкозернистой основной массе; *б* – березитизированная порода (внутренняя зона березитизации): вкрапленники плагиоклаза и роговой обманки замещены мелкозернистым пирит-кварц-серицитовым, а основная масса – пирит-кварцевым агрегатом (пирит – черное)

Тальк- и хлорит-карбонатные породы - образуются по ультраосновным породам (например, на Шабровском месторождении талька).

Б) **Скарны**

Известковые скарны - *высокотемпературные* (гранат-андрадит, пироксен, магнетит и др.) и *низкотемпературные* (эпидот, амфиболы, кальцит, халькопирит и др.). Образуются преимущественно на контактах карбонатных пород с гранитами.

В) **Щелочные метасоматиты**

К щелочным метасоматитам относятся, например, а*льбитизированные породы* и к*алиевые метасоматиты*

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

Белоусова О. Н., Михина В. В. Общий курс петрографии. М., Недра, 1972.

Миловский А. В. Минералогия и петрография. М., Недра, 1979.

Дополнительная:

Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических пород. М., Логос, 2001.

Петрографический кодекс. Л., Недра, 1995.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите факторы метаморфизма.
2. Охарактеризуйте текстуры метаморфических пород и условия их образования.
3. Назовите минеральный состав пород зеленосланцевой и амфиболитовой фаций регионального метаморфизма.
4. Продукты метаморфизма глинистых пород.

5. Продукты метаморфизма основных пород.
6. Приведите примеры метасоматических пород, возникших по а) кислым, б) ультраосновным магматическим породам.
7. Минеральный состав и условия образования скарнов.
8. Охарактеризуйте метасоматические изменения пород под действием кислых растворов.
9. Изменения плотности и пористости горных пород при регионально-метаморфических и метасоматических изменениях.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

(Минералы, породы, термины)

Актинолит 19
Акцессорные минералы.....25
Алевритовая структура.....41
Алевролит 41
Аллювиальные фации.....51
Алмаз.....12, 15
Альбит.....20
Алюмосиликаты 13
Аметист 6
Амфиболит.....56
Амфиболы.....19, 26
Ангидрит.....17, 47
Андезит 29
Анизотропия 4
Анортит.....20
Антимонит 15
Апатит 17
Аргиллит 44
Аридный климат 53
Арсенопирит.....15
Афанитовая структура.....26
Базальт 29, 30
Барит.....17
Бар.....41, 49
Берилл 18
Биотит.....19, 25
Биохимическое осаждение.....35
Боксит.....48
Болотные фации 51
Брекчия.....40
Вольфрамит 17
Вулканический туф.....30
Вулканогенно-обломочные породы...24, 30
Габбро 29
Галенит.....15
Галит.....16
Гематит.....16
Гиббсит 34
Гидрослюда.....20, 34
Гипс 17, 47
Глауконит.....53
Глинистый сланец.....44
Глинозем 24
Глина 42
Гнейс 56
Гнейсовидная текстура.....55
Горючие сланцы.....48
Гравеллит.....53
Гравий 39
Гранаты.....18
Гранит 29
Гранулит 56
Графит.....15
Грейзен.....59
Гумидный климат 53
Дельтовые фации 41, 51
Диамагнитные минералы 9
Диатомит.....48
Диорит.....29
Доломит 17, 38, 46
Доманиковые формации 52
Дресва 39
Друза 5
Дунит.....28, 32
Зеленый сланец 55
Золото.....12, 15
Известняк.....45
Ильменит 16
Калиевый полевой шпат.....20
Кальцит 17
Каменная соль 47
Каолинит.....20, 34,
Катаклазит 58
Кварц.....20, 25
Кварцевый диорит 31
Кварцит.....56
Киноварь.....15
Кислые породы 24
Коллектор 53
Конгломерат 40
Конкреция.....5, 38
Корунд 16
Кремнекислота 24
Кремень.....48
Кристаллические сланцы 56
Лагунные фации.....50
Лапилли 30
Лесс 41
Лимонит.....16
Линейная текстура.....55
Лиственит 59
Магматическая формация 30

Магнезит 17
Магнетит 16
Малахит....17
Ме́ргель 46
Метаморфическая фация....55
Метасоматоз 58
Мигматит 57
Микроклин....20
Милонит....58
Молассовая формация 52
Молибденит 15
Монтмориллонит 20
Морские фации....41, 49
Мрамор....57
Мусковит....19
Мутьевые потоки 35, 37, 53
Натечные агрегаты....5
Нефелин 20
Озерные фации 51
Оливин 18, 26
Оолит....45
Опал....16
Опока....48
Ортоклаз....20
Осадочная формация 52
Основные породы 24
Парамагнитные минералы 9
Пелитовая....43
Пелитоморфный известняк 45, 46
Перидотит 28
Песчаник 40
Пирит....15, 38
Пироксены 18, 26
Пиролюзит 16
Пироп 12
Пирротин....15
Плагиоклазы 6, 7, 20, 25
Платина 15
Побежалость 11
Покрышки 53
Полевые шпаты 20, 25
Порфировая структура....27
Прибрежно-морские фации....41
Пролювий....53
Псаммитовая структура....40
Псефитовая структура 39
Пьезоэлектрический эффект 9
Растворения под давлением....39
Речные фации 41
Риолит 29, 31
Риф 46
Роговая обманка....19
Рубин....6
Рутил 16
Сапропель 48, 51
Сера 15
Серпентин....19
Серпентинизация 33
Серпентинит....55
Сидерит....17
Сиенит....29
Сильвин....16
Сильвинит....47
Скарн....60
Сланцеватая текстура 55
Слоистость....36
Слойчатость....36
Слюды 19
Средние породы....24
Стилолитовый шов 39
Сфалерит....6, 15
Тальк- 19, 59
Тектоническая брекчия 58
Терригенные осадки 53
Топаз 18
Торф 48
Трансгрессия 53
Трапповая формация 30
Трахит 29
Трепел 48
Турмалин 18
Туффит....53
Ультраосновные породы....24
Фация осадочная....49
Ферромагнитные минералы....9
Филлит 55
Флиш 53
Флюидоупор....53
Флюорит 16
Халцедон....20
Халькопирит....15
Хлорит....19
Хлорит-карбонатные породы 59
Хризотил-асбест....19
Хромит 16
Циркон....18
Эклогит 56
Элювиальные фации....51
Эоловые фации....41
Эпидот....18

Олег Анатольевич Суставов

МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине для студентов специальностей 080400 - «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» (РФ) и 080900 - «Геофизические методы исследования скважин» (ГИС)

.

Корректура кафедры минералогии, петрографии и геохимии

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат 60x84 1/16. Печать на ризографе.
Печ .л. 4,0. Уч.-изд. л. 3,6. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Лаборатория множительной техники

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

В. В. Сынбулатов, Д. В. Прищепа

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

*Учебно-методическое пособие к самостоятельной работе,
выполнению контрольных и практических работ по дисциплине
«Взрывные работы при разведке и разработке»
для студентов специальности
21.05.03 «Технология геологической разведки»*

Екатеринбург – 2020

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

В. В. Сынбулатов, Д. В. Прищепа

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

Учебно-методическое пособие к самостоятельной работе, выполнению контрольных и практических работ по дисциплине «Взрывные работы при разведке и разработке» для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки»

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

Рецензенты: Лель Ю. И., зав. кафедрой РМОС УГГУ, профессор,
д-р техн. наук.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие к самостоятельной работе, выполнению контрольных и практических работ по дисциплине «Взрывные работы» для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки» / В. В. Сынбулатов, Д. В. Прищепа; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 65 с.

Материал пособия охватывает все раздела дисциплины.

Пособие предназначено для организации самостоятельной работы студентов, выполнению контрольных и практических заданий всех специализаций специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки» по курсу «Буровзрывные работы».

© Уральский государственный
горный университет, 2020
©Сынбулатов В.В., Прищепа Д. В.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 5
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА 6
2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА, КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ 7
3. ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ 19
Практико-ориентированное задание №1 19
Практико-ориентированное задание №2 23
Практико-ориентированное задание №3 26
Практико-ориентированное задание №4 30
Практико-ориентированное задание №5 32

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студента является важнейшей составной частью образовательной программы подготовки дипломированного специалиста. В соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования объем учебной нагрузки студента составляет 144 часов или 4 зачетных единиц.

По курсу «Буровзрывные работы» обязательная самостоятельная работа студента осуществляется в следующих направлениях – *освоение материалов по отдельным темам, входящим в Рабочую учебную программу дисциплины; подготовка, оформление, защита практико-ориентированных заданий; подготовка и защита контрольной работы*. Дополнительная самостоятельная работа связана с углубленным изучением отдельных разделов курса на основе научно-исследовательской работы студента (НИРС).

Данное учебно-методическое пособие предназначено для организации самостоятельной работы студентов – освоения отдельных тем дисциплины.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА

В следующем разделе пособия приведена развернутая программа дисциплины «Технология и безопасность взрывных работ». Она содержит названия 30 основных тем с указанием основных вопросов и разделов каждой темы. Каждая тема является основой вопросов в экзаменационном билете. При чтении лекций по курсу преподаватель указывает те темы дисциплины, которые выносятся на самостоятельную проработку студентами. Причем в экзаменационный билет может включаться один из вопросов по такой теме. Основной объем информации по каждой теме содержится в учебнике по курсу [1].

При освоении указанных ниже тем *рекомендуется следующий порядок самостоятельной работы студента:*

1. Ознакомьтесь со структурой темы.

2. По учебнику [1] освойте каждый структурный элемент темы. Во всех темах указаны разделы и страницы учебника, содержащие данный материал.

3. При необходимости используйте указанную дополнительную литературу. Консультацию по использованию дополнительной литературы Вы можете получить у преподавателя.

4. Ответьте на контрольные вопросы. При затруднениях в ответах на вопросы вернитесь к изучению рекомендованной литературы.

5. Законспектируйте материал. При этом конспект может быть написан в виде ответов на контрольные вопросы.

При самостоятельной работе над указанными темами рекомендуется вести записи в конспектах, формируемых на лекционных занятиях по курсу, и в том порядке, в котором данные темы следуют по учебной программе.

2. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА, КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Тема 1. **Краткая история развития взрывных работ.**

Значение взрывных работ в горнодобывающей промышленности и в строительстве. История развития взрывных работ.

Литература: [1]

Контрольные вопросы:

1. Охарактеризуйте основные вехи развития взрывных работ.
2. Опишите первую технологию ведения взрывных работ в горном деле.
3. Назовите первое нитроглицериновое взрывчатое вещество.
4. Опишите историю развития средств инициирования.

Тема 2. Современные виды взрывных работ.

Современные виды взрывных работ в промышленности. Основные виды взрывных работ. Специальные виды взрывных работ.

Литература: [1]

Контрольные вопросы:

1. Назовите современные виды взрывных работ.
2. Назовите современные виды специальных взрывных работ.

Тема 2. Способы бурения шпуров и скважин.

Классификация способов бурения шпуров и скважин. Механическое бурение и его виды. Термическое бурение и его виды. Специальные виды бурения шпуров и скважин.

Литература: [1, 5]

Контрольные вопросы:

1. Приведите классификацию способов бурения шпуров и скважин.
2. Опишите суть механических видов бурения шпуров и скважин.
3. Опишите суть термических видов бурения шпуров и скважин.
4. Опишите суть специальных видов бурения шпуров и скважин.
5. Укажите рациональные области применения механических, термических и специальных видов бурения шпуров и скважин.

Тема 3. Ударно-поворотный способ бурения.

Механизм разрушения горных пород при ударно-поворотном бурении. Механизмы скола и выкола. Зависимость скорости ударно-поворотного бурения от осевого усилия, частоты вращения. Оборудование.

Литература: [1, 5]

Контрольные вопросы:

1. Укажите рациональную область применения ударно-поворотного бурения.

2. Охарактеризуйте механизмы скола и выкола.
3. Опишите механизм разрушения горных пород при ударном внедрении инструмента.
4. Укажите бурильные машины ударно-поворотного бурения.
5. Отметьте факторы, которые повышают энергоемкость ударного бурения по сравнению с другими способами.
6. Укажите последовательность процессов, происходящих при разрушении породы при ударном бурении.

Тема 4. Вращательный способ бурения.

Технические средства вращательного бурения. Работа ядра уплотнения при резании пород. Зависимость объема разрушения от толщины стружки. Режимы самозаточки и затупления режущей грани сверла. Оборудование.

Литература: [1, 5]

Контрольные вопросы:

1. Назовите преимущества вращательного бурения.
2. Укажите бурильные машины вращательного бурения.
3. Охарактеризуйте основные механизмы износа и затупления бурового инструмента при вращательном бурении.
4. Опишите механизм разрушения горных пород при вращательном бурении.

Тема 5. Ударно-вращательный и вращательно-ударный способ бурения.

Технические средства бурения. Совместное действие механизмов удара и резания. Зависимость энергоемкости бурения от усилий полдачи на инструмент.

Литература: [1, 5]

Контрольные вопросы:

1. Укажите область применения вращательно-ударного бурения.
2. Укажите область применения ударно-вращательного бурения.
3. Назовите преимущества вращательно-ударного бурения.
4. Охарактеризуйте зависимость энергоемкости бурения от усилия подачи.
5. Назовите машины и механизмы, реализующие ударно-вращательный способ бурения.
6. Назовите машины и механизмы, реализующие вращательно-ударный способ бурения.

Тема 6. Шарошечное бурение.

Технические средства бурения. Механизм шарошечного бурения. Режимы бурения в зависимости от осевого усилия. Контактная прочность пород как критерий буримости.

Литература: [1, 5]

Контрольные вопросы:

1. Назовите особенности шарошечного бурения.
2. Опишите зависимость скорости бурения от величины осевого усилия.
3. Назовите машины и механизмы, реализующие шарошечное бурение.
4. Укажите область применения шарошечного бурения.

Тема 7. Основы теории взрыва и взрывчатых веществ.

Виды взрыва: механический, тепловой, электрический, ядерный, химический. Необходимые условия химического взрыва. Взрывчатое вещество. Классификация взрывчатых систем по физическому состоянию.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение понятию взрыв.
2. Приведите пример механического взрыва.
3. Приведите пример Теплового взрыва.
4. Приведите примеры тепловых взрывов.
5. Охарактеризуйте химический взрыв.
6. Назовите необходимые условия химического взрыва.

Тема 8. Свойства взрывчатых веществ.

Классификация свойств взрывчатых веществ. Технологические свойства взрывчатых веществ. Специальные свойства взрывчатых веществ.

Литература: [1, 2]

Контрольные вопросы:

1. Приведите классификацию свойств взрывчатых веществ.
2. Назовите основные технологические свойства взрывчатых веществ.
3. Что такое кислородный баланс.
4. Назовите виды кислородного баланса.
5. Какие газы выделяются при положительном кислородном балансе.
6. При каком кислородном балансе образуется окись углерода (CO)?

Тема 9. Начальный импульс и чувствительность взрывчатых веществ.

Начальный импульс. Виды начального импульса. Инициирование. Чувствительность взрывчатых веществ. Способы изменения чувствительности.

Литература: [1]

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение понятию «Начальный импульс».
2. Охарактеризуйте тепловой начальный импульс.
3. Какой вид начального импульса является основным для горного дела?
4. Перечислите пробы на чувствительность.
5. Что такое сенсибилизатор?
6. Приведите пример веществ вводимых в состав взрывчатых веществ для флегматизации.

Тема 10. Формы химического превращения взрывчатых веществ.

Основные формы химического превращения взрывчатых веществ. Режимы химического превращения: термический распад, горение, конвективное горение, детонация

Литература: [1, 2, 3]

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные формы химического превращения.
2. Дайте характеристику горению как форме химического превращения.
3. Дайте характеристику детонации как форме химического превращения.

Тема 11. Основные положения теории детонации.

Механизм детонации. Графическая интерпретация процесса детонации – адиабата Гюгонио. Количественная оценка характеристик процесса детонации.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Перечислите особенности детонационной волны.
2. Дайте определение понятию «Детонация».
3. Приведите основные детонационные характеристики взрывчатых веществ.

Тема 12. Экспериментальные методы определения скорости детонации.

Классификация методов определения скорости детонации взрывчатых веществ. Метод Дотриша. Осциллографический метод. Метод скоростной фотосъемки. Реостатный метод.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Охарактеризуйте метод Дотриша, для определения скорости детонации взрывчатых веществ.
2. Назовите отличительные особенности осциллографического метода для определения скорости детонации взрывчатых веществ.

3. Опишите процедуру измерения скорости детонации используя реостатный метод.

Тема 13. Факторы, влияющие на скорость и устойчивость детонации.

Группы факторов влияющие на скорость и устойчивости детонации. Влияние внутреннего состава и строения на скорость и устойчивость детонации. Влияние условий взрывания на скорость детонации.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Как влияет дисперсность взрывчатого вещества на скорость и устойчивость детонации?
2. Как влияет плотность взрывчатого веществ на скорость детонации?
3. Дайте определение понятию «критический диаметр детонации».
4. Как влияет на скорость и устойчивость детонации наличие плотной оболочки на заряде взрывчатого вещества.
5. Влияние величины начального импульса на устойчивость детонации.

Тема 14. Работа взрыва.

Работа взрыва: баланс энергии при взрыве. Потери при переходе потенциальной энергии взрывчатого вещества в механическую работу взрыва. Полезная работа взрыва. Бризантность и фугасность. Пробы на бризантность и фугасность.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Опишите переход потенциальной энергии взрывчатого вещества в механическую работу взрыва.
2. Чем обусловлены химические потери при взрыве?
3. Чем обусловлены тепловые потери при взрыве?
4. Охарактеризуйте бесполезные формы работы взрыва.
5. Что такое бризантность взрывчатых веществ.
6. Назовите формы проявления фугасной работы взрыва.

Тема 15. Основные положения теории предохранительных взрывчатых веществ.

Необходимость применения предохранительных взрывчатых веществ. Теории предохранительных взрывчатых веществ. Методы испытаний предохранительных взрывчатых веществ.

Литература: [1, 2]

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение понятию пламегаситель.
2. Дайте определение понятию ингибитор.
3. Перечислите основные гипотезы воспламенения горючих шахтных сред.
4. Перечислите возможные пути предотвращения воспламенения горючих шахтных сред.
5. Охарактеризуйте методы испытаний предохранительных взрывчатых веществ.

Тема 16. Заряд взрывчатого вещества.

Заряды взрывчатых веществ. Классификация. Воронка взрыва и ее элементы. Показатель действия взрыва.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. По каким признакам классифицируются заряды взрывчатых веществ.
2. Перечислите элементы воронки взрыва.
3. Что такое показатель действия взрыва.
4. Как классифицируются заряды взрывчатых веществ по показателю действия взрыва.

Тема 17. Действие взрыва.

Действие сосредоточенного заряда в твердой однородной безграничной среде и при наличии обнаженной поверхности. Стадии разрушения: образование газовой полости, зоны дробления, зона радиальных и кольцевых трещин, откольные явления. Соотношение бризантного и фугасного действия взрыва в зависимости от акустической жесткости разрушаемых пород.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Отразите последовательность развития взрыва в горных породах.
2. Отметьте области действия взрыва, образующие зону регулируемого дробления.
3. Какие трещины образуются в горной породе при падении давления и обратной деформации пород в сторону зарядной полости?
4. Какие трещины образуются при отражении волны сжатия от свободной поверхности горной породы?

Тема 18. Классификации промышленных взрывчатых веществ.

Классификация ВВ: по характеру воздействия на окружающую среду, по чувствительности к простым формам начального импульса, физическому состоянию. Классификация по химическому составу – индивидуальные ВВ и взрывчатые смеси. Классы ВВ по условиям применения.

Литература: [1, 2, 4, 6]

Контрольные вопросы:

1. К какой группе относятся взрывчатые вещества, имеющие скорость детонации 4000 м/с?
2. Какие классы промышленных ВВ выделяют по химическому составу?
3. К какому классу промышленных ВВ по химическому составу относится тротил, детонит?
4. Какие ВВ можно использовать только при взрывных работах на поверхности, в шахтах опасных по газу и пыли? Укажите номер класса и цвет оболочки.
5. Какой цвет имеют патроны предохранительных ВВ?
6. По какому характерному признаку выделяют первичные и вторичные ВВ?

Тема 19. Непредохранительные взрывчатые вещества I класса по условиям применения.

Предъявляемые требования. Нитросоединения: свойства, ассортимент, область применения. Аммиачно-селитренные взрывчатые вещества: свойства, ассортимент, область применения. Эмульсионные взрывчатые вещества: свойства, ассортимент, область применения.

Литература: [1, 2, 7]

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные свойства гранулотола.
2. Особенности аммиачно-селитренных взрывчатых веществ.
3. Бестротиловые взрывчатые вещества: особенности, свойства.
4. Назовите отличительные особенности эмульсионных взрывчатых веществ.

Тема 20. Непредохранительные взрывчатые вещества II класса по условиям применения.

Предъявляемые требования. Аммиачно-селитренные взрывчатые вещества: свойства, ассортимент, область применения. Эмульсионные взрывчатые вещества: свойства, ассортимент, область применения. Порошкообразные ВВ – аммониты и аммоналы. Свойства и область применения.

Литература: [1, 2, 7]

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные свойства граммонита 79/21.
2. Особенности аммиачно-селитренных взрывчатых веществ, применяемых в подземных условиях.
3. Назовите отличительные особенности патронированных аммонитов.
4. Назовите отличительные особенности эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых в подземных условиях.

Тема 21. Предохранительные взрывчатые вещества III – VII классов по условиям применения.

Требования к энергетическим и детонационным характеристикам предохранительных ВВ. Требования к кислородному балансу. Требования к составу и строению зарядов.

Литература: [1, 2, 7]

Контрольные вопросы:

1. Перечислите названию взрывчатых веществ III класса по условиям применения.
2. Какие добавки вводят в состав предохранительных взрывчатых веществ?
3. Укажите требования, предъявляемые к предохранительным ВВ.

Тема 22. Методы производства взрывных работ.

Классификация методов производства взрывных работ. Метод шпуровых зарядов. Метод скважинных зарядов. Метод камерных зарядов. Метод наружных зарядов. Область применения, достоинства и недостатки методов.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Укажите области применения метода шпуровых зарядов в подземных условиях.
2. Укажите область применения метода шпуровых зарядов при открытой разработке месторождений.
3. Укажите область применения метода скважинных зарядов.
4. Укажите область применения метода наружных зарядов.

Тема 23. Метод шпуровых зарядов при проведении подземных горных выработок.

Состав проходческого цикла. Коэффициент использования шпуров (КИШ). Коэффициент излишка сечения (КИС). Врубовые, отбойные и оконтуривающие шпуры. Очередность взрывания. Конструкции шпуровых зарядов. Размер и качество забойки. Прямое и обратное инициирование зарядов.

Назначение и типы врубов. Конструкции наклонных врубов; их достоинства и недостатки. Конструкции прямых врубов; их достоинства и недостатки. Комбинированные врубы. Принципы расчета параметров буровзрывных работ.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Укажите типы шпуров при проходке выработки.
2. Укажите очередность взрывания шпуров в типовой технологии проходки выработок.
3. Укажите условия, соответствующие обратному инициированию заряда.
4. Отметьте достоинства прямого инициирования заряда ВВ по сравнению с обратным.
5. Отметьте достоинства обратного инициирования заряда ВВ по сравнению с прямым.

Тема 24. Метод шпуровых зарядов при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

Технология шпуровой отбойки при разработке рудных месторождений. Расчет параметров БВР. Технология шпуровой отбойки угля. Правила безопасности при использовании метода шпуровой отбойки.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Опишите существо метода шпуровых зарядов при добыче полезных ископаемых подземным спопобом.
2. Укажите классы ВВ допущенные к применению при шпуровой отбойке по углю.
3. Какой способ взрывания допущен к применению при шпуровой отбойке угля?
4. Какова допустимая величина уходки (м) при добыче угля методом шпуровых зарядов?
5. Какова величина предельного содержание метана в забое (в %), при котором разрешена отбойка угля методом шпуровых зарядов?

Тема 25. Метод скважинных зарядов при подземной разработке месторождений полезных ископаемых.

Отбойка вертикальными и горизонтальными слоями. Параллельное и веерное расположение скважин – преимущества и недостатки. Схемы отбойки руды в блоке. Расчет параметров скважинной отбойки. Бурение, заряжание и взрывание скважин. Правила безопасности при скважинной отбойке.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Укажите преимущества параллельного расположения скважин при подземной отбойке руды (по сравнению с веерным расположением скважин).
2. Укажите преимущества веерного расположения скважин при подземной отбойке руды (по сравнению с параллельным расположением скважин).
3. Укажите способы бурения скважин при отбойке руды в подземных условиях.
4. Какой тип ВВ обычно применяют при механизированном заряжании скважин?
5. Укажите показатели, входящие в формулу определения удельного расхода ВВ при скважинной отбойке руды в подземных условиях.

Тема 26. Метод скважинных зарядов при открытой разработке месторождений полезных ископаемых.

Расположение скважин на уступе и их бурение. Принципы расчета параметров буровзрывных работ. Схемы взрывания скважинных зарядов при однорядном и многорядном взрывании скважин.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Укажите рациональные способы бурения скважин при открытой разработке месторождений.
2. Удельный расход ВВ на карьерах определяется по эталонному $q_э$ с учетом поправочных коэффициентов. Укажите факторы, определяющие величину данных коэффициентов.
3. Укажите основные способы взрывании зарядов взрывчатых веществ, используемых на земной поверхности.
4. Перечислите основные взрывчатые вещества, используемые при ведении взрывных работ на земной поверхности.

Тема 27. Метод камерных зарядов.

Расположение выработок при использовании камерных зарядов. Камерные заряды рыхления и их расчет. Камерные заряды выброса и их расчет. Камерные заряды на сброс и их расчет.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. В каких случаях целесообразно использовать метод камерных зарядов при открытой разработке месторождений?
2. Назовите достоинства и недостатки метода камерных зарядов.

Тема 28. Взрывное разрушение негабарита.

Характеристики, область применения, достоинства и недостатки различных способов разделки негабарита: наружными, шпуровыми, кумулятивными зарядами, гидровзрывание.

Литература: [1, 3]

Контрольные вопросы:

1. Укажите достоинства и недостатки способа разделки негабарита накладными зарядами.
2. Укажите достоинства и недостатки способа разделки негабарита шпуровыми зарядами.
3. Укажите способы взрывного дробления негабарита при открытой разработке месторождений.

Тема 29. Техническая документация для производства взрывных работ.

Необходимая техническая документация для производства взрывных работ: типовой проект взрывных работ, проект массового взрыва, паспорт буровзрывных работ, схема взрывных работ.

Литература: [1, 4, 6, 8]

Контрольные вопросы:

1. Что входит в состав типового проекта взрывных работ?
2. Опишите процедуру составления и утверждения паспорта буровзрывных работ.
3. Для каких работ составляется схема взрывных работ.
4. В каких случаях составляется проект массового взрыва?

Тема 30. Персонал для взрывных работ.

Требования к лицам, допущенным к ведению взрывных работ: руководитель взрывных работ, мастер-взрывник, заведующий складом ВМ, раздатчики ВМ и лаборанты складов ВМ.

Литература: [1, 4, 6, 8]

Контрольные вопросы:

1. Какие требования предъявляются к руководителям взрывных работ?
2. Какие требования предъявляются к взрывникам?

3. В течение какого периода времени проходит стажировка взрывника?
4. Требования в заведующему склада взрывчатых материалов.

3. ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

Практико-ориентированное задание №1

Расчет кислородного баланса и составление рецептур промышленных взрывчатых веществ.

Цель: овладение методикой расчета кислородного баланса взрывчатых веществ и принципами составления рецептур промышленных взрывчатых веществ.

Краткая теория

Определение кислородного баланса

Кислородным балансом называется отношение избытка или недостатка кислорода во взрывчатом веществе (ВВ) для полного окисления горючих элементов (водорода, углерода, металлов и т. п.), выраженное в грамм-атомах, к грамм-молекулярной массе ВВ. Кислородный баланс выражается в долях или процентах.

Под полным окислением понимается окисление водорода в воду, а углерода в углекислый газ. При этом выделяется также молекулярный азот и кислород. Если в составе ВВ находится металл, то образуется его высший окисел.

Реакции полного окисления:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 396 \text{ кДж/моль};$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O \rightarrow H_2O + 283 \text{ кДж/моль при воде жидкой};$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + 241 \text{ кДж/моль при воде парообразной};$$

$$2Al + 1.5O_2 \rightarrow Al_2O_3 + 1671 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, если ВВ имеет состав в виде $C_aH_bN_cO_d$, то кислородный баланс (%)

$$K_б = \frac{\left[d - \left(2a + \frac{b}{2}\right)\right] \cdot 16}{M_{BB}} 100\%, \quad (1.1)$$

где 16 – относительный атомная масса кислорода; M_{BB} – молекулярная масса ВВ.

При

$$d > 2a + \frac{b}{2} \quad (1.2)$$

имеет положительный кислородный баланс;

при

$$d = 2a + \frac{b}{2} \quad (1.3)$$

нулевой кислородный баланс;

при

$$d < 2a + \frac{b}{2} \quad (1.4)$$

отрицательный кислородный баланс.

Взрывчатые вещества с нулевым кислородным балансом выделяют максимальное количество энергии и минимальное количество ядовитых газов.

При взрыве ВВ с отрицательным кислородным балансом в зависимости от относительного количества кислорода образуются либо ядовитая окись углерода (угарный газ) с меньшим выделением тепла, чем при образовании углекислоты, т. е.

$$C + 0{,}5O_2 \rightarrow CO + 109 \text{ кДж/моль;}$$

либо чистый углерод в виде сажи, резко снижающий образование газов.

При положительном кислородном балансе уменьшается выделение энергии, так как образуется ядовитая окись азота с поглощением тепла по реакции

$$0{,}5N_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow NO - 90{,}5 \text{ кДж/моль.}$$

Пример 1. Определить кислородный баланс тротила $C_7H_5(NO_2)_3$, относительная молекулярная масса которого 227.

Для полного окисления необходимо $2a + b/2$ или $2 \cdot 7 + 5/2 = 16{,}5$ атомов кислорода.

В наличии имеется 6 атомов кислорода.

Следовательно,

$$K_6 = \frac{\left[6 - \left(2 \cdot 7 + \frac{5}{2}\right)\right] \cdot 16}{227} 100\% = -74\%.$$

Пример 2. Определить кислородный баланс граммонита 30/70. Граммонит 30/70 состоит из 30% аммиачной селитры NH_4NO_3 и 70% тротила.

Кислородный баланс аммиачной селитры АС, определенный вышеуказанным способом, равен +20%.

Кислородный баланс граммонита 30/70:

$$0{,}3 \cdot 20 + 0{,}7 \cdot -74 = -45{,}5\%.$$

Составление рецептуры промышленных ВВ

При изготовлении промышленных ВВ обычно состав подбирается таким, чтобы был нулевой кислородный баланс. Для изготовления патронированных ВВ принимается небольшой положительный кислородный баланс для окисления материала оболочки патронов. Для подземных работ при взрыве 1 кг ВВ должно выделятся не более 40 л ядовитых газов в пересчете на условную окись углерода. Если образуются окислы азота и сернистый газ, то для перевода их к условной окиси углерода принимается поправочный коэффициент соответственно 6,5 и 2,5.

Для открытых горных работ, особенно для ВВ, применяемых в обводненных условиях, требования к кислородному балансу ВВ не такие жесткие.

Пример 1. Составить рецептуру игданита с нулевым кислородным балансом па основе аммиачной селитры и дизельного топлива (ДТ) с кислородным балансом – 320%.

Количество весовых частей аммиачной селитры для окисления одной части дизельного топлива равно

$$n = \frac{[\text{КБ}_{DT}]}{[\text{КБ}_{\text{АС}}]},$$

где КБ_{DT} – кислородный баланс дизельного топлива;

$\text{КБ}_{\text{АС}}$ – кислородный баланс аммиачной селитры.

$$n = \frac{320}{20} = 16.$$

Содержание дизельного топлива во взрывчатом веществе:

$$x = \frac{100}{1+n},$$

$$x = \frac{100}{1+16} = 5{,}9\ \%.$$

Соответственно содержание аммиачной селитры

$$100 - x = 100 - 5{,}9 = 94{,}1\%.$$

Следовательно, формула игданита:

$$94{,}1\%\ \text{аммиачной селитры};\ 5{,}9\%\ \text{дизельного топлива}.$$

Пример 2. Определить рецептуру ВВ с пулевым кислородным балансом на основе аммиачной селитры (NH_4NO_3) и тротила ($C_7H_5(NO_2)_3$).

Кислородный баланс тротила –74%, относительная молекулярная масса 227. Кислородный баланс аммиачной селитры +20%, относительная молекулярная масса 80.

Состав смеси должен отвечать условию:

$$x\ (-74\%) + (100 - x)\ 20\% = 0,$$

где x – содержание в смеси тротила, %.

Решение данного уравнения показывает, что $x \approx 21\%$ и $(100 - x) = 79\%$. Такому составу смеси отвечают граммонит 79/21 и аммонит 6ЖВ.

Обозначим число молей аммиачной селитры через y, число молей тротила через z. Тогда из соотношения

$$\frac{y \cdot 80}{x \cdot 227} = \frac{79}{21},$$

получим

$$y = \frac{79 \cdot z \cdot 227}{21 \cdot 80} = 10{,}7z.$$

Приняв z = 1, получим y = 10,7.

Следовательно, молекулярное уравнение граммонита имеет вид

$$z + 10{,}7y = C_7H_5(NO_2)_3 + 10{,}7NH_4NO_3.$$

Пример 3. Определить молекулярную формулу гранулита АС-8, имеющего следующий состав: 89% аммиачной селитры NH_4NO_3; 3% солярового масла $C_{16}H_{34}$ (относительная молекулярная масса 226); 8% алюминиевой пудры А1 (относительная молекулярная масса — 27).

Обозначив число молей солярового масла x, аммиачной селитры y, алюминиевой пудры z, можно написать химическую формулу в виде

$$y NH_4NO_3 + x\ C_{16}H_{34} + z\ Al.$$

В соответствии с весовым составом можно записать следующие соотношения

$$\frac{y \cdot 80}{x \cdot 226} = \frac{89}{3};\quad \frac{z \cdot 27}{x \cdot 226} = \frac{8}{3},$$

Отсюда y = 83,9x; z = 22,4x.

Примем x = 1, тогда молекулярное уравнение гранулита АС-8 имеет вид

$$83{,}9\ NH_4NO_3 + C_{16}H_{34} + 22{,}4\ Al.$$

Практико-ориентированное задание №2

Определение работоспособности взрывчатых веществ и работы взрыва.

Цель: овладение методикой определения работоспособности взрывчатых веществ и работы взрыва.

Краткая теория

Расчет идеальной работоспособности ВВ

Из первого закона термодинамики следует, что изменение внутренней энергии газов равно количеству тепла, сообщенного окружающей среде и произведенной работе:

$$-dE = dQ + pdV. \quad (2.1)$$

Если техническим назначением взрыва ВВ является производство механической работы, то затраты на теплообмен продуктов взрыва (ПВ) с окружающей средой являются энергетическими потерями (dQ). Эти потери называются термодинамическими.

Идеальным с точки зрения отсутствия термодинамических потерь является адиабатический процесс расширения ПВ, т.е. $dQ = 0$. В этом случае изменение внутренней энергии ПВ равно количеству работы, совершаемой газами, т.е.

$$-dE = pdV = dA. \quad (2.2)$$

В реальных условиях взрывания наиболее близким к адиабатическому процессу является взрыв ПВ в воздушной среде, а, например, в горных породах термодинамические потери возрастают. Они существенно выше в пористых, хрупких, легко дробимых породах и минимальны в пластичных средах типа глин.

Мерой идеальной работоспособности ВВ может служить максимальная работа, которую совершают ПВ при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды (воздушной, водной, горной), т.е. когда остаточное давление ПВ уравновешивается противодавлением среды атмосферным, гидростатическим или горным давлением.

Идеальная работоспособность ВВ является одной из важнейших энергетических характеристик ВВ. Она дополняет теплоту взрыва, показывая теоретическую возможность реализации энергетического потенциала ВВ в механическую работу.

Идеальную работоспособность (полную идеальную работу взрыва) можно определить, как разность между значениями внутренней энергии ПВ в момент их образования и к концу расширения:

$$\mathrm{A_и} = \int dE = \int_{T_1}^{T_2} \overline{C_V} dT = \overline{C_V} * (T_1 - T_2) = \overline{C_V} T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = Q_{\text{взр}} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \quad (2.3)$$

где $\overline{C_V}$ - средняя теплоемкость продуктов взрыва в интервалах изменения температуры взрыва от T_1 до T_2;

T_1 - начальная температура взрыва;

T_2 - конечная температура ПВ.

Для газовых взрываемых систем, расширение ПВ которых происходит вдоль изоэнтропы вида pV' = const, пользуясь уравнением Клайперона $(PV'=RT)$, получаем

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{y-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{y-1}{y}} \quad (2.4)$$

Окончательно получаем

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right); \quad (2.5)$$

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{y-1}\right); \quad (2.6)$$

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{y-1}{y}}\right); \quad (2.7)$$

где $Q_{\text{взр}}$- потенциальная энергия ВВ (полная тепловая энергия), кДж/кг;

V_1 и V_2 - начальный и конечный удельные объемы ПВ, м^3/кг;

P_1 и P_2 - начальное и конечное давление ПВ, Па;

$y = Cp/Cv$ – показатель адиабаты.

Эти же формулы могут быть использованы для расчета A_u конденсированных ВВ.

При взрыве в воздухе (P_2 = 1,01·10^{5}Па) полная идеальная работа взрыва определяется

$$A_u = Q_{\text{взр}} \left(1 - \left(\frac{1{,}01 * 10^5}{P_{\text{пв}}}\right)^{\frac{y-1}{y}}\right), \text{ кДж/кг.} \quad (2.8)$$

Расчет полного термодинамического КПД взрыва

Вышеприведенную формулу (2.8) можно представить в виде

$$A_u = Q_{\text{взр}} - q_T \quad (2.9)$$

Здесь величина $q_T = Q_{\text{взр}} - A_u = C_{v2} * T_2$ - термодинамические потери энергии ВВ в продуктах взрыва по достижении ими атмосферного давления. Это остаточное тепло идет на свечение ПВ после их расширения.

Отношение идеальной работоспособности к выделившейся тепловой энергии взрыва называется идеальным термодинамическим КПД взрыва

$$\eta = \frac{A_u}{Q_{\text{взр}}}, \tag{2.10}$$

или с учетом формулы (2.7)

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{y-1}{y}}, \tag{2.11}$$

Идеальный термодинамический КПД взрыва определяет часть тепловой энергии, которая может быть использована для совершения механической работы взрыва.

Величины идеальной работоспособности (A_u) и полного термодинамического КПД (П) существенно зависят от свойств продуктов взрыва, влияющих на показатель адиабаты, $y = Cp/Cv$. Если в ПВ содержится 2/3 молекул двухатомных газов и 1/3 — одноатомных (гексоген), то y = 1,25. Если в ПВ содержится 2/3 трехатомных газов и 1/3 двухатомных (нитроглицерин), то y = 1,2. Величина y снижается (соответственно снижается A_u и η), если в ПВ содержатся четырех и пятиатомные газы, а также твердые продукты (NaCl, $A1_2O_3$ и др.). В этих случаях y = 1,15, и 1,05.

Пример 1. Определить полную идеальную работоспособность и термодинамический КПД аммонита 6ЖВ при плотности заряжания 900 кг/м^3 и следующих параметрах взрывного превращения:

$V_{пв}$= 0,86 м^3/кг,

$Q_{взр}$ = 4300кДж/кг;

$T_{взр}$=2600^o К.

Для расчета показатель адиабаты принимается у=1,25. Определение давления ПВ при взрыве аммонита 6ЖВ:

$$P = \frac{1{,}01*10^5*0{,}86*2600*900}{273*(1-0{,}001*0{,}86*900)} = 3{,}3 * 10^9,$$

Откуда полная идеальная работоспособность

$$A_u = Q_{\text{взр}}\left(1 - \left(\frac{1{,}01 * 10^5}{P_{\text{пв}}}\right)^{\frac{y-1}{y}}\right) = 4300 * \left(1 - \left(\frac{1{,}01 * 10^5}{3{,}3 * 10^9}\right)^{\frac{1{,}25-1}{1{,}25}}\right) = 3762{,}2\,\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Полный термодинамический КПД взрыва

$$\eta = \frac{A_u}{Q_{\text{взр}}} = \frac{3762{,}2}{4300} = 0{,}875$$

или $\eta = 87{,}5\%$

Практико-ориентированное задание №3

Расчет скважинного заряда при уступной отбойке на карьере

Цель работы – овладение методикой расчета параметров буровзрывных работ при использовании скважинной отбойки при открытой разработке месторождений полезных ископаемых.

Краткая теория

При разработке месторождений открытым способом (на карьерах и разрезах) используют в основном метод скважинных зарядов. В слабых породах используют вращательное (шнековое) бурение. В более прочных породах преобладает шарошечное бурение. В крепчайших породах с коэффициентом крепости f > 14-16 наиболее эффективно термическое бурение скважин. Скважины на уступе карьера располагают в один или несколько рядов по различным схемам в зависимости от свойств разрушаемых пород и требуемой конфигурации забоя. Расположение скважин на уступе характеризуют следующими показателями (рис. 1):

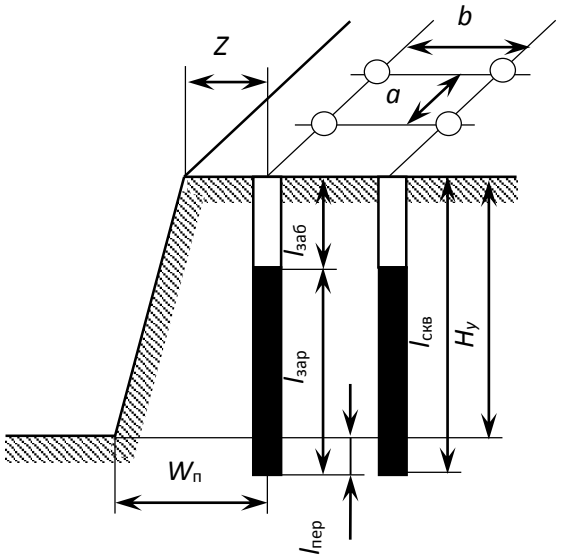


Рис. 3.1. Схема расположения скважин на уступе

$H_у$ – высота уступа, м;
$W_п$ – линия сопротивления по подошве (ЛСПП);
a – расстояние между скважинами, м;
b – расстояние между рядами скважин, м;
Z – безопасное расстояние от оси скважины до верхней бровки уступа, м;
$l_{зар}$ – длина заряда, м;
$l_{пер}$ – длина перебура, м;
$l_{заб}$ – длина забойки, м;
$l_{скв}$ – длина (глубина) скважины, м;
α - угол откоса уступа.

Характеристики и расположение скважин в первую очередь зависят от удельного расхода ВВ. Оптимальная величина удельного расхода ВВ определяется множеством факторов. При этом определяющую роль играют свойства разрушаемого массива, размеры его блоков (расстояние между трещинами), степень и качество заполнения трещин, их расположение относительно вектора смещения породы и т. п. Учесть все эти факторы в единой теоретической модели не представляется возможным. Поэтому во многом оптимальные параметры процесса определяются путем опытного взрывания и интерпретации его результатов на основе общефизических представлений.

Удельный расход «эталонного» ВВ ($q_э$) может быть определен по данным таблицы 1.

Таблица 3.1

Эталонный удельный расход ВВ, кг/м^3

Категория пород по степени трещиноватости	Коэффициент крепости горных пород f по шкале проф. М. М. Протодьяконова			
	2 - 6	6 - 10	10 – 14	более 14
I	0,2	0,25	0,3	0,35
II	0,3	0,35	0,4	0,45
III	0,45	0,5	0,6	0,67
IV	0,67	0,75	0,8	0,9
V	0,9	1,0	1,1	1,2

Реальный удельный расход ВВ рекомендуется определять путем введения серии поправочных коэффициентов, учитывающих тип ВВ, конструкцию заряда, наличие свободных поверхностей, заданную степень дробления и др:

$$q_р = q_э \cdot e \cdot k_d \cdot \frac{\rho_{гп}}{2{,}6}, \quad (3.1)$$

где $q_э$ – эталонный расход Граммонита 79/21, кг/м^3;

e – коэффициент относительной работоспособности ВВ, определяемый по формуле

$$e = A_{эт} / A_{ВВ}, \quad (3.2)$$

$A_{эт}$ = 3560 кДж/кг - идеальная работа взрыва эталонного ВВ (Граммонит 79/21);

$A_{ВВ}$ – идеальная работа взрыва принятого ВВ, кДж/кг;

k_d - поправочный коэффициент на кондиционный размер куска;

$\rho_{гп}$ – плотность горных пород, т/м^3.

Таблица 3.2

Значения поправочного коэффициента на кондиционный размер куска k_d

Допустимый размер крупных кусков, мм	250	500	750	1000	1250	1500
k_d	1,3	1,0	0,85	0,75	0,7	0,65

Диаметр заряда определяется диаметром рабочего органа буровой машины (долота, коронки или резца) $d_{скв}$ с учетом характеристик разрабатываемых пород:

$$d_{зар} = k_р d_{скв}, \tag{3.3}$$

где $k_р$ = 1,06 – (f – 2) 0,003 – коэффициент расширения скважин.

Удельная вместимость 1 м скважины:

$$P = 0{,}785 \cdot d_{зар}^2 \cdot \Delta, \tag{3.4}$$

где Δ, кг/м^3 - плотность заряда в скважине.

Линия сопротивления по подошве (ЛСПП) для одиночной скважины:

$$W_п = 0{,}9 \cdot \sqrt{\frac{P}{q_р}}, \tag{3.5}$$

В соответствии с правилами безопасности при бурении первого ряда скважин станок располагается перпендикулярно верхней бровке уступа, за призмой обрушения, но не ближе 2 м от верхней бровки уступа, поэтому минимально допустимая по условиям безопасного расположения бурового станка линия сопротивления по подошве (W_{min}) для вертикальных скважин рассчитывается из соотношения

$$W_{min} = H_у \operatorname{ctg}\alpha + Z, \tag{3.6}$$

где α – угол откоса рабочего уступа, град;

Z – ширина призмы обрушения, $Z \geq 2$ м.

Величина принимаемой при расчетах линии сопротивления по подошве ($W_п$) должна удовлетворять соотношению:

$$W_{min} < W_п. \tag{3.7}$$

Если значения $W_{min} > W_п$, это означает, что принятые параметры скважин и характеристики ВВ не обеспечивают проработку подошвы уступа. В этом случае следует изменить диаметр скважины, тип применяемого ВВ или перейти к наклонным скважинам.

Глубина перебура:

$$l_{пер} = (10 \div 15) \cdot d_{скв} \tag{3.8}$$

Глубина забойки:

$$l_{\text{заб}} = (20 \div 35) \cdot d_{\text{скв}} \tag{3.9}$$

Глубина скважины:

$$l_{\text{скв}} = H_{\text{у}} + l_{\text{пер}} \tag{3.10}$$

Расстояние между скважинами в ряду:

$$a = mW_{\text{п}}, \tag{3.11}$$

где m = 0,8 – 1,4 - коэффициент сближения скважин; меньшее значение m принимается для крепких пород.

Расстояние между рядами скважин:

$$b = (0{,}9\text{-}1{,}0)W_{\text{п}}. \tag{3.12}$$

Масса заряда в скважине:

$$Q = q_{\text{р}} \cdot a \cdot W_{\text{п}} \cdot H_{\text{у}} \tag{3.13}$$

Длина заряда:

$$l_{\text{зар}} = \frac{Q}{P}. \tag{3.14}$$

Задание: рассчитать параметры буровзрывных работ при скважинной отбойке в условиях открытой разработки месторождений полезных ископаемых.

Практико-ориентированное задание №4

Расчёт безопасных расстояний по разлету кусков породы при взрывании скважинных зарядов

Цель работы – овладение методикой расчета безопасных расстояний по разлету кусков породы при взрывании скважинных зарядов.

При определении зон, опасных по разлету отдельных кусков породы при взрывании скважинных зарядов на земной поверхности, следует выделять и отдельно рассчитывать безопасные расстояния для людей зданий и сооружений, машин и механизмов.

При взрывании скважинных зарядов рыхления (дробления) расстояние опасное для людей, рассчитывается по формуле:

$$r_{разл} = 1250 \cdot h_з \cdot \sqrt{\frac{f}{1 + h_{заб}} \cdot \frac{d}{a}} \qquad (4.1)$$

где $h_з$ – коэффициент заполнения скважины взрывчатым веществом, определяемый по формуле

$$h_з = \frac{l_{зар}}{l_c}, \qquad (4.2)$$

$l_{зар}$ – длина заряда ВВ, м;

$l_{зар}$ – глубина скважины, м;

f – коэффициент крепости горных пород;

$h_з$ – коэффициент заполнения скважины забойкой:

$$h_з = \frac{l_{заб}}{l_н}, \qquad (4.3)$$

$l_{зар}$ – длина забойки, м;

$l_н$ – длина свободной от заряда верхней части скважины, м;

d – диаметр взрываемой скважины, м;

a – расстояние между скважинами в ряду или между рядами, м.

Расчётные значения радиусов разлета осколков округляются в большую сторону до значения, кратного 50 м. Окончательно принимаемое безопасное расстояние не должно быть меньше указанных в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Минимально допустимые безопасные расстояния для людей при взрывных работах

№ п/п	Методы взрывных работ	Минимально допустимые радиусы опасных зон, м
1.	Наружных зарядов, в том числе кумулятивных	300 (по проекту)
2.	Шпуровых зарядов	200
3.	Котловых шпуров	200
4.	Малокамерных зарядов (рукавов)	200*
5.	Скважинных зарядов	Не менее 200**
6.	Котловых скважин	Не менее 300
7.	Камерных зарядов	Не менее 300

* - при взрывании на косогорах в направлении вниз по склону величина радиуса опасной зоны должна приниматься не менее 300 м.

** - радиус опасной зоны указан для взрывания зарядов с забойкой.

Практико-ориентированное задание №5

Составление паспорта буровзрывных работ на проведение горизонтальной горной выработки.

Цель работы – овладение методикой расчета параметров буровзрывных работ (БВР) при проведении подземных горных выработок и составления паспорта БВР.

Краткая теория

Проведение горных выработок буровзрывным способом осуществляется по паспортам буровзрывных работ (БВР). Паспорта утверждаются руководителем того предприятия, которое ведёт взрывные работы. С паспортом БВР ознакомляется весь персонал, осуществляющий буровзрывные работы в данной выработке.

Паспорт составляется для каждого забоя выработки на основании расчетов и утверждается с учётом результатов не менее трёх опытных взрываний. По разрешению руководителя предприятия (шахты, рудника) допускается вместо опытных взрываний использовать результаты взрывов, проведённых в аналогичных условиях.

Расчёт, необходимый для составления паспорта, сводится к выбору и определению основных параметров буровзрывных работ для проведения выработки. К основным параметрам относятся: тип взрывчатого вещества (ВВ) и средства инициирования (СИ), диаметр и глубина шпуров, тип вруба, удельный заряд ВВ, количество шпуров и конструкции зарядов, расход взрывчатых материалов.

5.1. Общие положения

Буровзрывной комплекс работ занимает от 30 до 60 % общего времени проходческого цикла в зависимости от горнотехнических условий.

При проведении горных выработок буровзрывные работы должны обеспечить заданные размеры и форму поперечного сечения выработки, точное оконтуривание её профиля, качественное дробление породы и сосредоточенное размещение её в забое, нормативную величину коэффициента излишка сечения (КИС), высокий коэффициент использования шпуров (КИШ).

Эти требования соблюдаются при условии правильного выбора параметров буровзрывных работ: типа ВВ, типа и параметров вруба, величины и конструкции заряда в шпуре, диаметра и глубины шпуров, числа и расположения

их в забое, способа и очередности взрывания зарядов, типа бурового оборудования, качества буровых работ, организации проходческих работ и т. д.

5.2. Определение параметров буровзрывных работ

5.2.1. Выбор взрывчатых материалов

При выборе взрывчатых материалов (ВМ) руководствуются требованиями безопасного производства взрывных работ, регламентированных «Правилами безопасности при взрывных работах» [6] с учетом физико-механических свойств горных пород и горнотехнических условий.

Рекомендуемые взрывчатые вещества (ВВ) [7] в зависимости от условий работ, обводнённости и крепости пород, способа заряжания представлены в табл. 5.1.

В шахтах, не опасных по газу или пыли, при проведении горизонтальных выработок допускается применение электрического взрывания и систем неэлектрического взрывания с низкоэнергетическими волноводами.

Таблица 5.1

Рекомендуемые ВВ

Условия взрывных работ	Условия размещения зарядов	Коэффициент крепости пород f	Тип ВВ	Способ заряжания
Выработки, не опасные по взрыву газа или пыли	Сухие шпуры	до 12	Гранулит М Граммонит 79/21 Гранулит АС-4В Гранулит-игданит	Механизированный
			Аммонит № 6ЖВ	Ручной
		более 12	Гранулит АС-8В	Механизированный
			Аммонал М-10 Детонит М Аммонал скальный № 1	Ручной
	Обводнённые шпуры	до 12	Аммонит № 6ЖВ	Ручной
		более 12	Аммонал М-10 Детонит М Аммонал скальный № 1	
Выработки, опасные по взрыву газа и пыли	Сухие и обводнённые шпуры	Для взрывания по породе	Аммонит АП–5ЖВ	Ручной
		Для взрывания по углю с учетом степени опасности	IV кл. Аммонит Т-19 Аммонит ПЖВ-20 V кл. Угленит Э-6 VI кл. Угленит 12ЦБ	
	Для водораспыления	Открытый заряд	Ионит	

На угольных шахтах, опасных по газу или пыли, разрешается только взрывание с применением электродетонаторов. При полном отсутствии в забоях проходимых выработок метана или угольной пыли, допускается применение непредохранительных ВВ II класса и электродетонаторов мгновенного, короткозамедленного и замедленного действия со временем замедления до 2 с без ограничения количества приёмов и пропускаемых серий замедлений.

Основные характеристики ВВ, применяемых при проходке подземных горных выработок, приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Характеристики ВВ

Наименование ВВ	Идеальная работа взрыва, кДж/кг	Плотность в патронах или насыпная, кг/м³	Удельная объемная энергия взрыва при средней плотности, кДж/кг	Коэффициент взрывной эффективности при плотности ВВ 1000 кг/м³	Расстояние передачи детонации между патронами, см		Диаметр патронов, мм	Масса патрона, кг	Длина патрона, мм
					Сухие	После выдержки в воде			
Аммонит № 6ЖВ	3561	1000-1100	3917	1,0	5-9	3-6	32 36	0,2 0,25	250 250
Аммонал М-10	4410	950-1100	4520	1,15	4	3	32	0,2	250
Детонит М	4316	1000-1200	4963	1,27	8-18	5-15	32 36	0,2 0,25	250 250
Аммонал скальный № 1	4420	1000-1100	4641	1,18	8-14	5-10	32 36	0,2 0,25	250 250
Аммонит АП-5ЖВ	2991	1000-1150	3215	0,82	5-10	2-7	36	0,3	250
Аммонит Т-19	2564	1000-1200	2820	0,72	7-12	4-8	36	0,3	240
Угленит Э-6	1946	1100-1250	2289	0,58	5-12	3-10	36	0,3	240
Угленит 12 ЦБ	1770	1200-1350	2256	0,58	4	2	36	0,3	240
Ионит	1482	1000-1200	1704	0,44	–	–	36	0,3	240
Гранулит М	3163	780-820 (1000-1150)*	3384	0,86					
Гранулит АС-4В	3645	800-850 (1100-1200)*	4192	1,07					
Гранулит АС-8В	3997	800-850 (1100-1200)*	4597	1,17					
Гранулит-игданит	3150	800-850 (1100-1200)*	3760	0,85					

* Плотность при механизированном заряжании

Технические характеристики электродетонаторов, применяемых при проведении горных выработок, приведены в табл. 5.3. Все электродетонаторы являются водоустойчивыми.

Таблица 5.3

Электродетонаторы для шахт и рудников

Тип электродетонаторов	Кол-во серий	Интервалы замедления, мс (с)	Безопасный ток, А	Гарантийный ток, А	Сопротивление, Ом	Примечание
ЭД-8Ж(Э)	1	0	0,2	1,0	1,8-3,6	Электродетонаторы непредохранительные нормальной чувствительности
ЭД-3-Н	36	20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 мс 5,6,7,8,9,10 с				
ЭД-1-8-Т	1	0	1,0	5,0	0,5-0,75	Электродетонаторы непредохранительные пониженной чувствительности к блуждающим токам
ЭД-3-Т	36	20, 40, 60, 80, 100, 125, 150, 175, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 мс 5,6,7,8,9,10 с				
ЭДКЗ-ОП	1	0	0,2	1,0	1,8-3,6	Электродетонаторы предохранительные нормальной чувствительности
ЭДКЗ-П	5	25, 50, 75, 100, 125 мс	0,2	1,0	1,8-3,6	
ЭДКЗ-ПМ	7	15, 30, 45, 60, 80, 100, 120 мс	0,2	1,0	1,8-3,6	
ЭД-КЗ-ПКМ	9	4, 20, 60, 80, 100, 125, 150, 175, 200 мс	0,2	1,0	1,8-3,6	

Детонирующие шнуры ДША, ДШВ и ДШЭ-12 и др. применяют при необходимости одновременного взрывания врубовых, нижних подошвенных шпуров, а также в рассредоточенных зарядах с целью передачи детонации всем частям шпурового заряда.

В последние годы на подземных взрывных работах получил широкое распространение новый способ инициирования зарядов ВВ – система неэлектрического взрывания различных модификаций: Нонель (Швеция), СИНВ, Эдилин (Россия) и др.

В табл. 3.4 представлены характеристики систем СИНВ и ДБИ для взрывных работ в рудниках и угольных шахтах, где допущено применение непредохранительных взрывчатых веществ II класса.

Устройства СИНВ-Ш и ДБИ3 служат для трансляции инициирующего сигнала и инициирования боевиков шпуровых зарядов с заданной временной задержкой. В боевике каждого шпурового заряда размещается КД устройства СИНВ-Ш или ДБИ3 заданного интервала замедления.

Таблица 5.4

Характеристики систем неэлектрического инициирования

Устройство	Интервал замедления, мс	Назначение
СИНВ-Ш	0, 25, 42, 55, 67, 109, 125, 150, 176, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000	Изготовление патронов-боевиков
ДБИ3	0, 17, 25, 42, 55, 67, 109, 125, 150, 176, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000	

Примечание. Интервалы замедлений приведены при длине ударно-волновой трубки (УВТ) 1 м. Добавление каждого метра длины УВТ увеличивает время замедления на 0,5 мс.

УВТ, выходящие из шпуров, инициируются одновременно от устройств СИНВ-П мгновенного действия (СИНВ-П-0), смонтированных в единую сеть. Длина УВТ стартового устройства (магистральной части сети) выбирается из условия безопасного подрыва и может составлять несколько сот метров.

При проходке подземных выработок обычно применяется следующая схема: УВТ, выходящие из шпуров, собираются в связки (пучки), которые соединяются в единую сеть детонирующим шнуром. Детонирующий шнур обвязывается вокруг связки двойной петлёй. Количество УВТ в одной связке не должно превышать 15 шт. Инициирование сети из детонирующего шнура производится электродетонатором или электрозажигательной трубкой.

5.2.2. Выбор типа вруба и глубины шпуров

Расположение шпуров в забое, величина заходки и показатели взрыва во многом определяются типом вруба. Врубы по характеру действия делятся на две группы:

– врубы с наклонными к оси выработки шпурами – наклонные врубы;

– врубы с параллельными к оси выработки шпурами – прямые врубы.

Тип вруба и глубину шпуров с учетом горнотехнических условий следует принимать по данным табл. 5.5.

Таблица 5.5

Тип вруба и глубина шпуров

Тип буровой техники	Сечение выработки, м^2	
	менее 6	более 6
Переносные перфораторы, ручные электросвёрла и пневмосвёрла	Прямые врубы при глубине шпуров более 1,5 м	Наклонные врубы при глубине шпуров не более (0,35–0,5) ширины выработки; прямые врубы при глубине шпуров до 2–2,5 м
Установки механизированного бурения	–	Прямые врубы с максимально возможной глубиной по технической характеристике машины

Из наклонных врубов наибольшее распространение имеет вертикальный клиновой вруб. Другие врубы с наклонными шпурами (пирамидальный, горизонтальный клиновой и его разновидности, веерный и т. д.) не получили достаточно широкого распространения из-за сложности обуривания и узкой рекомендуемой области применения (забои, проводимые по пласту угля при малой его мощности, при наличии слабых прослоек пород по забою, при ярко выраженном контакте слабых пород с более крепкими вмещающими породами и т. д.).

Высокая эффективность врубов с наклонными шпурами и преимущества их по сравнению с прямыми врубами достигаются только при ограниченной глубине шпуров и определенном сечении выработки. При проходке выработок в крепких породах ($f > 12$) с применением вертикального клинового вруба длина заходки не превышает обычно 0,35 ширины выработки (B) из-за технической невозможности бурения врубовых шпуров под углом наклона, обеспечивающим эффективную работу вруба. При глубине шпуров более 0,5 B, применении буровых кареток, а также в выработках малого сечения (менее 6 м^2) наиболее эффективны прямые врубы, глубина которых ограничивается точностью бурения в зависимости от типа буровой техники.

При глубине шпуров, принятой по рекомендациям табл. 5.5, проектную величину КИШ следует принимать равной 0,85-0,95 с учётом крепости горных пород.

5.2.3. Выбор конструкции и параметров врубов

5.2.3.1. Вертикальный клиновой вруб

При ограниченной глубине шпуров (1,2–2,0 м) наибольшее распространение имеет вертикальный клиновой вруб. Параметры вертикального клинового вруба в зависимости от крепости пород применительно к аммониту № 6ЖВ в патронах диаметром 32 мм в шпурах диаметром 42 мм ориентировочно по данным практики можно принять по данным табл. 5.6.

Таблица 5.6

Параметры вертикального клинового вруба

Группа крепости пород по СНиП	Коэффициент крепости пород f	Расстояние по вертикали между парами шпуров, мм	Количество шпуров во врубе при сечении выработки ($м^2$)		Угол наклона шпуров к плоскости забоя α, град.
			до 12	более 12	
IV-V	1-6	500	4	4-6	75-70
VI	6-8	450	4-6	6-8	68
VII	8-10	400	6-8	8-10	65
VIII	10-13	350	8-10	10-12	63
IX	13-16	300	10-12	12-14	60
X	16-18	300	10-12	12-14	58
XI	20	250	10-12	12-14	55

При применении другого типа ВВ и изменении диаметра шпуров расстояние между парами врубовых шпуров определяется с учётом поправочного коэффициента по формуле:

$$k = 1{,}25\sqrt{e}\cdot d_з/d, \qquad (5.1)$$

где e – коэффициент взрывной эффективности (см. табл. 5.2),

$d_з$ – диаметр заряда,

d – диаметр заряжаемой полости (шпура или скважины).

С увеличением коэффициента крепости пород (см. табл. 5.6) угол наклона врубовых шпуров к плоскости забоя уменьшается. Поэтому предельную глубину вертикального клинового вруба (рис. 5.1) при бурении шпуров ручными перфораторами в зависимости от коэффициента крепости пород и ширины выработки рекомендуется принимать по табл. 5.7 или по формуле:

$$h_{вр} = 0{,}25B\,\mathrm{tg}\frac{\alpha}{2} - 0{,}3, \qquad (5.2)$$

где B – ширина выработки, м

α – угол наклона шпуров к плоскости забоя, град. (см. рис. 3.1).

Таблица 5.7

Предельная глубина вертикального клинового вруба $h_{вр}$, м

Ширина выработки, м	Коэффициент крепости пород f						
	2-5	6-7	8-9	10-12	13-15	16-17	18-20
2,0	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7
2,5	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
3,0	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2
3,5	2,4	2,2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4
4,0	2,8	2,6	2,2	2,1	1,9	1,8	1,7
4,5	3,2	2,9	2,5	2,4	2,3	2,0	1,9
5,0	3,5	3,1	2,9	2,7	2,4	2,2	2,1

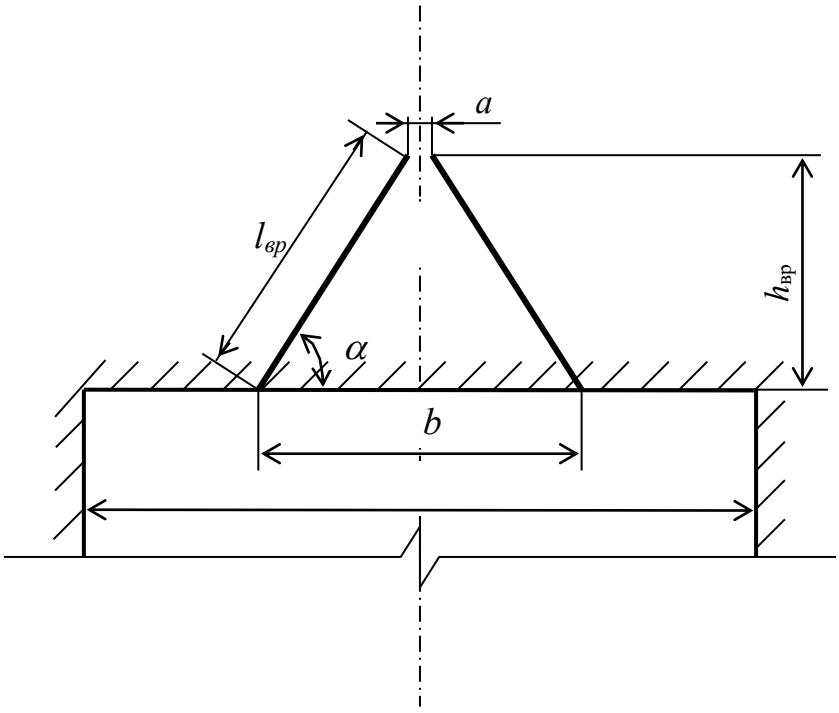


Рис. 5.1. Схема вертикального клинового вруба

Глубину врубовых шпуров следует принимать на 0,1-0,2 м больше длины вспомогательных и оконтуривающих шпуров:

$$h_{вр} = h_{шп} + (0{,}1 \div 0{,}2), \tag{5.3}$$

где $h_{шп}$ – глубина (длина) вспомогательных и оконтуривающих шпуров, м.

Длину шпуров клинового вруба определяют с учетом угла их наклона:

$$l_{вр} = h_{вр} / \sin \alpha, \tag{5.4}$$

где α – угол наклона шпуров к плоскости забоя, град.

Расстояние между устьями в паре шпуров клинового вруба определяют по зависимости:

$$b = 2\, h_{вр} / \mathrm{tg}\, \alpha + a, \tag{5.5}$$

где *а* – расстояние между забоями пары сходящихся шпуров клинового вруба, м (в зависимости от коэффициента крепости пород *а* = 0,15-0,2 м).

После расчета основных параметров вруба следует проверить графическим способом техническую возможность обуривания вертикального клинового вруба с учетом принятого бурового оборудования. С этой целью в масштабе 1:20 – 1:50 вычерчивается план забоя (вид сверху) с наложением пары врубовых шпуров и обязательного соблюдения принятого угла наклона шпуров α.

Если ширина выработки не позволяет с учётом габаритов бурильной машины (см. рис. 3.1) обурить рассчитанный вруб, то следует уменьшить глубину врубовых шпуров или принять другой тип вруба. При применении бурильных установок стрела автоподатчика должна свободно размещаться при заданном угле наклона врубовых шпуров между точкой забуривания врубового шпура и стенкой выработки. При бурении переносными перфораторами или ручными электросвёрлами врубовые шпуры могут буриться в 2-3 приёма комплектом штанг различной длины (например: 0,5 м; 1,2 м; 2,0 м).

5.2.3.2. Прямые врубы

Из прямых врубов (рис. 5.2) наиболее широкое распространение получили следующие конструкции: призматический симметричный *а*; щелевой *б*; спиральный *в* и двойной спиральный *г*.

Прямые врубы представляют собой комбинацию параллельных заряженных шпуров, взрыв которых работает на компенсационную полость, создаваемую холостым шпуром (системой холостых шпуров) или скважиной. Взрыв последующих шпуров расширяет врубовую полость до размеров, достаточных для последующей отбойки вспомогательными (отбойными) шпурами с постоянной, предельной для конкретных горнотехнических условий линией сопротивления.

Параметры прямых врубов принимаются в зависимости от конструкции вруба, крепости пород, диаметра компенсационной полости (шпура или скважины, их количества). Наиболее ответственными являются первый шпур или серия шпуров, взрываемых на компенсационную полость. Поэтому для повышения эффективности взрыва целесообразно в качестве компенсационной полости использовать шпур увеличенного диаметра, систему холостых шпуров или скважину.

Расстояние между компенсационной полостью и первым взрываемым шпуром или серией шпуров (пробивное расстояние W_1) рекомендуется принимать для шпуров диаметром 42 мм при использовании аммонита № 6 ЖВ в патронах диаметром 32 мм по табл. 5.8.

При применении другого типа ВВ или другой конструкции заряда пробивное расстояние W_1, определенное по табл. 1.7, умножается на поправочный коэффициент, рассчитанный по формуле (5.1).

Пробивные расстояния W_1 учитывают возможное отклонение шпуров от заданного направления. С увеличением глубины шпуров растет их отклонение, поэтому при глубине шпуров до 2,5 м достаточно принимать диаметр первона-

чальной компенсационной полости не более 50-60 мм; при шпурах глубиной до 3 м – 70-105 мм и при шпурах до 4 м – 105-125 мм, что позволит сохранить КИШ в пределах 0,85-0,9.

Пробивные расстояния для шпуров, взрываемых вторыми и последующими во врубе (W_1, W_2, W_3 и т. д.), принимаются равными 0,8 от ширины (наибольшего размера) ранее образованной врубовой полости.

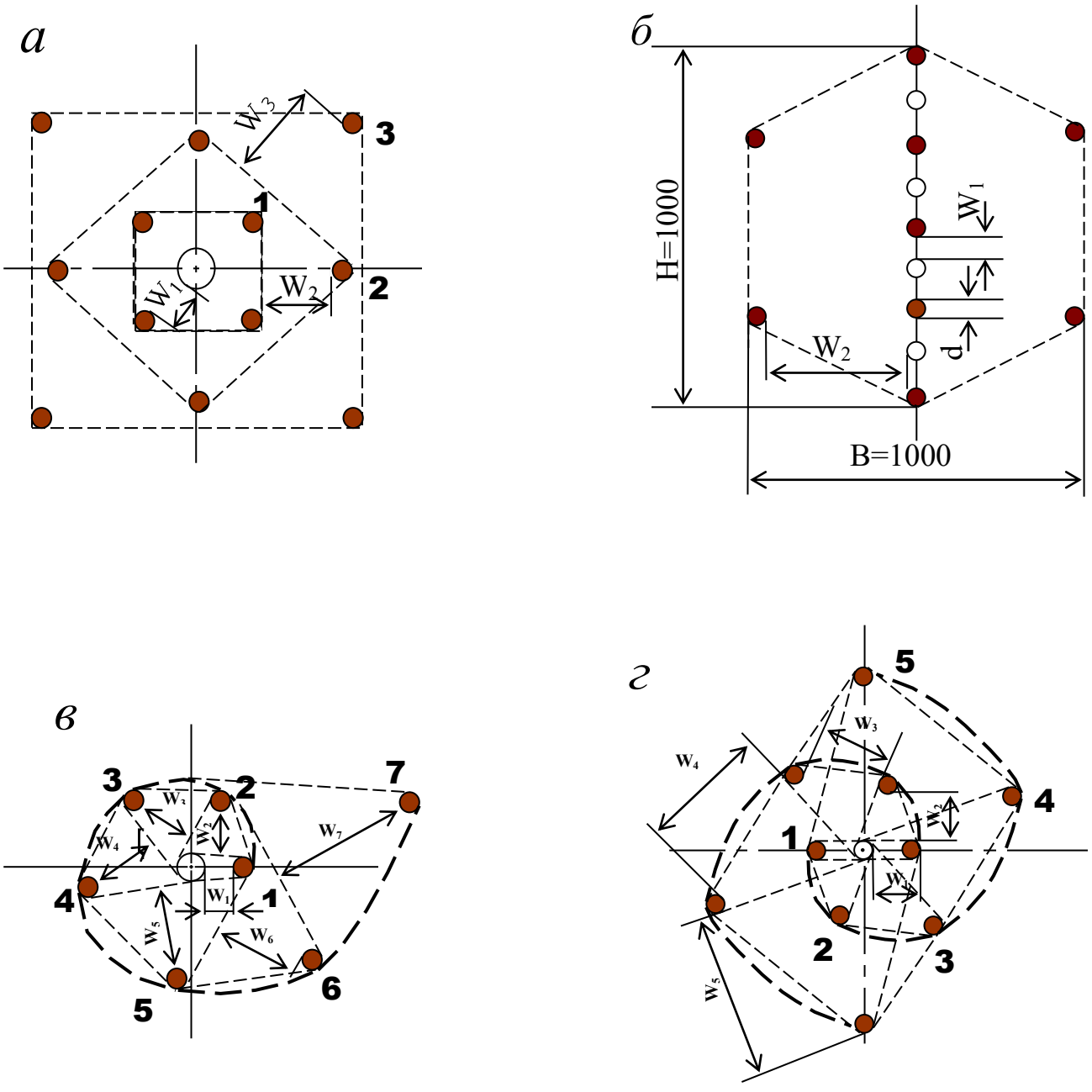


Рис. 5.2. Конструкции прямых врубов:
а – призматический симметричный; *б* – щелевой; *в* – спиральный;
г – двойной спиральный

Таблица 5.8

Пробивные расстояния W_1, мм

Диаметр холостого шпура или скважины D_x, мм	Коэффициент крепости пород f						
	2-5	6-7	8-9	10-12	13-15	16-17	18-20
42	115	100	90	80	60	60	55
51	125	110	100	90	80	70	65
56	150	130	110	95	90	85	75
75	170	150	130	105	100	95	85
105	190	170	150	120	110	105	95
125	230	200	170	140	120	110	100

Например, пробивное расстояние для шпуров спирального вруба, взрываемых вторыми, т. е. на обнаженную поверхность, образованную взрывом первого шпура, определяют по данным табл. 3.9 или по зависимости, мм:

$$W_2 = 0{,}8 \cdot (W_1 + D_x + d), \qquad (5.6)$$

где W_1 – пробивное расстояние для первого шпура (см. табл. 5.7);

D_x – диаметр компенсационной полости (холостого шпура или скважины);

d – диаметр заряженных шпуров.

Пробивные расстояния (W_2, W_3 и т. д.) для любого типа вруба могут быть определены графически путем последовательного построения расширяющейся врубовой полости (см. рис. 5.2) в масштабе 1:5.

Таблица 5.9

Пробивные расстояния W_2, мм

Диаметр холостого шпура или скважины D_x, мм	Коэффициент крепости пород f						
	2-5	6-7	8-9	10-12	13-15	16-17	18-20
42	170	150	140	130	120	115	110
51	180	160	150	140	130	120	115
56	210	180	170	160	150	140	130
75	260	210	200	185	170	150	140
105	300	260	240	215	200	185	175
125	340	300	270	250	230	220	215

Расчёты и построения выполняются до тех пор, пока не образуется врубовая полость размером в пределах от 0,9×0,9 до 1,2×1,2 м. Такой размер врубовой полости является достаточным и позволяет в дальнейшем производить отбойку породы вспомогательными и оконтуривающими шпурами уже с постоянной линией наименьшего сопротивления, которая соответствует предельному пробивному расстоянию шпурового заряда при взрывании его на неограниченную свободную поверхность.

Предельные пробивные расстояния для вспомогательных и оконтуривающих шпуров при их диаметре 42 мм, заряженных аммонитом № 6ЖВ в патронах диаметром 32 мм, приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Предельные пробивные расстояния для вспомогательных и оконтуривающих шпуров, мм

Диаметр шпуров, мм	Коэффициент крепости пород f						
	2-5	6-7	8-9	10-12	13-15	16-17	18-20
42	1000-900	800	700	650	600	550	500

Опыт работы и расчёты показывают, что для образования врубовой полости сечением 0,8-1,4 м^2 необходимо принять 8-12 шпуров в зависимости от диаметра компенсационной полости и коэффициента крепости пород.

При применении щелевого вруба пробивное расстояние между заряжаемыми и холостыми шпурами принимается по данным табл. 5.8. Количество заряжаемых $N_з$ и холостых $N_х$ шпуров в щелевом врубе при их одинаковом диаметре определяют по формулам:

$$N_з = \frac{H}{2(W_1 + d)} + 1, \tag{5.7}$$

$$N_x = \frac{H}{2(W_1 + d)}, \tag{5.8}$$

где H – высота вруба, мм;

W_1 – пробивное расстояние, мм;

d – диаметр шпуров, мм.

Щелевой вруб (рис. 5.2, *б*) высотой 1000 мм с последующим расширением полости четырьмя шпурами дает высокие показатели в породах любой крепости и в выработках любого сечения. Пробивное расстояние W_2 для шпуров, взрываемых во вторую очередь, принимается равным 500 мм, а расстояние между шпурами по вертикали 700–800 мм в породах любой крепости.

Могут быть приняты другие конструкции прямых врубов, но принцип расчета их параметров будет аналогичен.

После расчета параметров принятого прямого вруба (пробивных расстояний и числа шпуров во врубе) определяется площадь вруба по забою выработки, что необходимо для определения количества остальных шпуров.

Глубина (длина) холостых и заряжаемых шпуров прямого вруба должна приниматься больше на 10 % по сравнению с глубиной вспомогательных и оконтуривающих шпуров.

При ведении взрывных работ на угольных шахтах, опасных по газу или пыли, при определении расстояний между смежными шпурами следует придерживаться дополнительных требований ЕПБ.

Расстояние от заряда ВВ до ближайшей поверхности должно быть не менее 0,5 м по углю и не менее 0,3 м по породе, в том числе и при взрывании зарядов в породном негабарите. В случае применения ВВ VI класса при взрывании по углю это расстояние допускается уменьшать до 0,3 м.

Минимально допустимые расстояния между смежными (взрываемыми последовательно) шпуровыми зарядами должны соответствовать данным табл. 5.11.

В породах с f >10 расстояние между смежными шпуровыми зарядами должно определяться нормативами, разработанными по согласованию с организацией-экспертом по безопасности работ.

Поскольку при применении прямых врубов с незаряжаемыми шпурами (см. рис. 3.2) данные требования, как правило, невыполнимы, то в угольных шахтах, опасных по газу или пыли, применяются прямые врубы, работающие по принципу воронкообразования.

Таблица 5.11

Минимально допустимые расстояния между смежными шпуровыми зарядами

Условия взрывания	Класса ВВ			
	II	III-IV	V	VI
По углю	0,6	0,6	0,5	0,4
По породе:				
при f <7	0,5	0,45	0,3	0,25
при f >10	0,4	0,3	–	–

В породах с коэффициентом крепости f < 6 обычно применяется прямой призматический вруб из 4–6 шпуров, которые располагаются по контуру окружности или периметру прямоугольника и взрываются одновременно в один приём. Расстояние между врубовыми шпурами следует принимать в соответствии с рекомендациями табл. 5.11. При проведении выработок в более крепких породах целесообразно использовать двойной призматический вруб из 6–8 шпуров с соблюдением тех же требований, которые взрываются короткозамедленно и последовательно в два приёма.

5.2.4. Определение удельного заряда ВВ

Величина удельного заряда ВВ, т. е. количество ВВ, необходимое для заряжания в шпуры единицы объёма обуренного массива (с учетом эффективного разрушения), зависит от крепости пород, сечения выработки, типа ВВ и условий взрывания (наличия обнажённой поверхности, структуры породы, плотности ВВ при заряжании, типа вруба).

Удельный заряд **при врубах с наклонными шпурами** рекомендуется определять по видоизменённой формуле Н. М. Покровского:

$$q = 0{,}1 \cdot f \cdot f_1 \cdot v / e, \qquad (5.9)$$

где q – удельный заряд ВВ, кг/м^3;

f – коэффициент крепости по М. М. Протодьяконову. В породах с $f > 16$ в формуле (5.9) принимать 0,08 вместо 0,1;

f_1 – коэффициент структуры породы;

v – коэффициент зажима породы, зависящий от площади поперечного сечения выработки и количества обнажённых поверхностей;

e – коэффициент взрывной эффективности заряда ВВ.

Коэффициент относительной эффективности заряда ВВ определяется из выражения

$$e = \frac{Q_{\text{ид}} \cdot \rho}{Q_{\text{ид.э}} \cdot \rho_{\text{э}}}, \qquad (5.10)$$

где $Q_{\text{ид}}$, $Q_{\text{ид.э}}$ – идеальная работа взрыва принятого и эталонного ВВ, кДж/кг;

ρ, $\rho_{\text{э}}$ – плотность заряда принятого и эталонного ВВ, кг/м^3.

Необходимые данные для расчета величины e принимают из табл. 5.2. При средней плотности заряда ВВ значение коэффициента взрывной эффективности можно принять из этой же таблицы. В качестве эталонного ВВ в формуле (5.10) и в табл. 5.2 принят аммонит № 6ЖВ.

Значение коэффициента структуры породы f_1 принимается из табл. 5.12.

Таблица 5.12

Коэффициент структуры породы f_1

Характеристика пород	Категория пород	Коэффициент структуры породы f_1
Монолитные, крепкие, вязкие, упругие	I	1,6
Трещиноватые, крепкие	II	1,2-1,4
Массивно-хрупкие	III	1,1
Сильнотрещиноватые, мелкослоистые, большинство пород угольных бассейнов	IV	0,8-0,9

Коэффициент зажима породы при одной обнаженной поверхности в забоях горизонтальных и наклонных выработок определяется из выражения

$$v = \frac{6{,}5}{\sqrt{S_{\text{вч}}}}, \qquad (5.11)$$

где $S_{\text{вч}}$ – площадь поперечного сечения вчерне, м^2.

При двух обнаженных поверхностях коэффициент зажима принимается в пределах v = 1,1–1,4 (меньшие значения – для больших сечений выработок).

При щелевом врубе на полную высоту выработки для определения удельного заряда для шпуров по забою, кроме врубовых, в формуле (5.9) следует принимать коэффициент зажима породы v = 1,4.

Прямые (дробящие) врубы требуют повышенного удельного заряда ВВ. По формуле (5.9) при применении прямых врубов определяют удельный заряд только для вспомогательных и оконтуривающих шпуров с коэффициентом зажима породы v = 1,1–1,4.

5.2.5. Выбор диаметра шпура

Диаметр шпуров выбирается в зависимости от стандартного диаметра патрона принятого типа ВВ. В табл. 5.2 указаны стандартные диаметры патронов промышленных ВВ. При выпуске ВВ в патронах различных диаметров следует принимать диаметр патрона с учётом сечения выработки и типа буровой техники. При использовании мощных бурильных машин и при больших сечениях выработки принимают патроны с большим диаметром или механизированное заряжание гранулированными ВВ.

При применении метода контурного взрывания в оконтуривающих шпурах следует уменьшить линейную плотность заряжания. С этой целью рекомендуется применять, например, специальные патроны типа ЗКВК из аммонита № 6ЖВ диаметром 26 мм длиной 360 мм в полиэтиленовых оболочках. Эти патроны имеют соединительные муфты с лепестками, позволяющими стыковать их и центрировать по оси шпура с созданием воздушного промежутка между патронами и стенками шпура.

Диаметр шпуров при использовании патронированных ВВ принимается не менее чем на 5 мм больше диаметра патрона. При применении машин ударного-поворотного и вращательного-ударного бурения и патронированных ВВ диаметр шпуров обычно составляет 38–42 мм. При механизированном заряжании шпуров гранулированными ВВ в горнорудной промышленности диаметр шпуров принимается в пределах от 38 до 52 мм в зависимости от сечения выработки, детонационной способности ВВ и взрываемости пород.

При бурении по углю и породам угольной формации используются шпуры диаметром 37–46 мм.

5.2.6. Определение количества шпуров

Количество шпуров в забое зависит от физико-механических свойств пород, поперечного сечения выработки, параметров зарядов и типа принятого вруба.

Количество шпуров на забой **при врубах с наклонными шпурами** определяют по формуле проф. Н. М. Покровского

$$N = q \cdot S_{вч} / \gamma, \qquad (5.12)$$

где q – удельный заряд ВВ, определяемый по формуле (1.9), кг/м^3;

$S_{вч}$ – площадь сечения выработки вчерне, м^2;

γ – весовое количество ВВ (вместимость), приходящееся на 1 м шпура, кг/м.

$$\gamma = 3{,}14\, d^{\,2} \rho \alpha / 4, \qquad (5.13)$$

где d – диаметр заряда (патрона ВВ или шпура), м;

ρ – плотность ВВ в заряде, кг/м^3;

α – коэффициент заполнения шпуров.

При ручном заряжании без уплотнения ВВ в шпуре используется параметр «диаметр патрона», а параметр «диаметр шпура» – при уплотнении патронов вручную с разрезанием оболочки или при механизированном заряжании.

При разрезании оболочки патронов плотность ВВ в шпуре принимается равной 0,9 от плотности ВВ в патроне (см. табл. 5.2). При механизированном заряжании шпуров гранулированными ВВ плотность ВВ в шпуре составляет 1150–1200 кг/м^3.

Коэффициент заполнения шпуров в выработках шахт, не опасных по взрыву газа или пыли, проходимых в крепких породах, принимается максимальным (0,7-0,9).

В выработках шахт, опасных по газу или пыли и в породах с f = 2-8 – коэффициент заполнения принимается 0,35-0,55; в более крепких породах – 0,5-0,6. При этом при ведении взрывных работ на угольных шахтах, опасных по взрыву газа или пыли, величина забойки должна быть не менее 0,5 м.

Во всех случаях с увеличением длины шпуров коэффициент заполнения шпуров увеличивается.

Полученное по формуле (5.12) количество шпуров является ориентировочным (см. табл. 5.13) и может быть изменено при необходимости на 10–15 %. Окончательно число шпуров принимается после вычерчивания схемы расположения шпуров в сечении выработки (рекомендуемый масштаб – 1:50-1:20), и только затем возобновляется расчёт.

Таблица 5.13

Ориентировочное количество шпуров на забой в зависимости от коэффициента крепости пород и сечения выработок

Коэффициент крепости пород f	Сечение выработки вчерне, м^2						
	4	6	8	10	12	14	16
2-4	8-11	12-16	17-21	22-27	28-33	34-38	35-42
5-7	12-16	17-21	22-27	28-33	34-38	39-42	43-46
8-10	16-20	21-26	27-32	33-37	38-42	42-46	47-50
12-14	20-24	26-30	32-36	37-42	42-46	46-50	50-54
более 14	26-28	32-36	36-40	44-48	48-52	52-54	56-60

При вычерчивании схемы расположения шпуров при любом типе вруба среднее расстояние между рядами вспомогательных шпуров, между вспомогательными и оконтуривающими и между шпурами в рядах должно быть примерно одинаковым и приниматься в соответствии с рекомендациями табл. 1.10 или определяться из выражения

$$a = \sqrt{\frac{S_{\text{вч}} - S_{\text{вр}}}{N - N_{\text{вр}}}}, \qquad (5.14)$$

где $S_{вч}$ – площадь сечения выработки вчерне, м^2;

$S_{вр}$ – площадь сечения врубовой полости (для вертикального клинового вруба принимается равной половине площади прямоугольника, образованного устьями врубовых шпуров на плоскости забоя), м^2;

N, $N_{вр}$ – общее число на забой и число врубовых шпуров.

Оконтуривающие шпуры располагают с наклоном 85–87^o к плоскости забоя с таким расчетом, чтобы их концы вышли за проектный контур сечения выработки вчерне только за линией уходки. Забуриваются оконтуривающие шпуры на минимальном расстоянии (150–200 мм) от проектного контура выработки с учётом принятой буровой техники.

При применении прямых врубов количество шпуров определяется по формуле

$$N = N_{вр} + q\cdot(S_{вч}–S_{вр})/\gamma, \qquad (5.15)$$

где $N_{вр}$ – количество врубовых шпуров (см. раздел 1.2.3.2);

$S_{вр}$ – площадь поперечного сечения прямого вруба, м^2.

При контурном взрывании число оконтуривающих шпуров необходимо увеличивать. При этом параметры зарядов в оконтуривающих шпурах (удельный заряд, расстояние между шпурами и др.) рассчитываются по специальным методикам ([3] и др.).

3.2.7. Определение расхода взрывчатых материалов

Количество ВВ (кг) на цикл при **врубах с наклонными шпурами**

$$Q = q\cdot S_{вч}\cdot l_{шп}, \qquad (5.16)$$

где $l_{шп}$ – глубина заходки, равная глубине вспомогательных и оконтуривающих шпуров, м.

Средняя величина заряда (кг) на один шпур

$$q'_{ср} = Q / N. \qquad (3.17)$$

Количество ВВ (кг) на цикл **при врубах с прямыми шпурами** (кг)

$$Q = Q_{вр} + q\cdot(S_{вч} – S_{вр})\cdot l_{шп}, \qquad (5.18)$$

где $Q_{вр}$ – количество ВВ во врубовых шпурах, принимается как сумма зарядов врубовых шпуров. Величина заряда (кг) во врубовый шпур принимается

$$q'_{вр} = 0{,}785\cdot d^2\cdot\rho\cdot\alpha\cdot l_{вр}, \qquad (5.19)$$

где d – диаметр патрона ВВ или шпура, в зависимости от способа заряжания, м;

ρ – плотность ВВ в заряде, кг/м^3;

α – коэффициент заполнения врубового шпура, 0,7-0,95 (в зависимости от длины шпуров и крепости пород);

$l_{вр}$ – длина врубовых шпуров, м (принимается на 10 % больше длины вспомогательных и оконтуривающих шпуров).

Средняя величина заряда (кг) на один вспомогательный и оконтуривающий шпур **при прямых врубах**

$$q''_{ср} = \frac{q \cdot (S_{вч} - S_{вр}) \cdot l_{шп}}{N - N_{вр}} . \quad (5.20)$$

При распределении ВВ по шпурам величину заряда во врубовые шпуры **при наклонных врубах** следует принимать на 10-20 % больше средней величины $q'_{ср}$ (кг)

$$q^*_{вр} = (1{,}1 \div 1{,}2)\, q'_{ср}. \quad (5.21)$$

В оконтуривающих шпурах, кроме почвенных, при любых типах врубов величину заряда следует уменьшать на 10-20 % по сравнению со средней величиной $q'_{ср}$ (кг)

$$q^*_{ок} = (0{,}9 \div 0{,}8)\, q'_{ср}. \quad (5.22)$$

Обычно в практике взрывных работ величина заряда во вспомогательных шпурах принимается равной средней величине заряда в шпурах $q'_{ср}$:

$$q^*_{всп} = q'_{ср}. \quad (5.23)$$

Полученные величины зарядов во врубовых, вспомогательных и оконтуривающих шпурах при ручном заряжании патронированными ВВ принимают **кратными массе патронов ВВ.**

При механизированном заряжании заряд ВВ в шпуре состоит из патрона-боевика (0,2 или 0,25 кг) и собственно заряда гранулированного ВВ, масса которого принимается кратной 0,1 кг.

После определения величин зарядов ВВ в шпурах каждой группы следует проверить возможность размещения их в шпурах, учитывая длину и массу патронов, а также линейную плотность заряжания при применении гранулированных ВВ.

Фактический расход ВВ (кг) на цикл

$$Q_ф = \sum q^*_{вр} + \sum q^*_{всп} + \sum q^*_{ок}. \quad (5.24)$$

Расход ВВ (кг) на погонный метр выработки

$$Q_м = Q_ф / (l_{шп}\, \eta)\ , \quad (5.25)$$

где η – КИШ (принимается равным 0,85-0,95 в зависимости от крепости пород).

Объём горной массы за взрыв

$$Q_{гм} = S_{пр}\, l_{шп}\, \eta, \quad (5.26)$$

где $S_{пр} = S_{вч} \cdot КИС$ – сечение выработки в проходке, м^2, которое следует определять в соответствии с рекомендациями таблицы 5.14.

Удельный расход ВВ (кг) на 1 м^3 взорванной породы

$$q_р = Q_ф / Q_{гм}. \quad (5.27)$$

Таблица 5.14

Допустимое нормативное увеличение (в %) поперечного сечения горизонтальных горных выработок при проходке буровзрывным способом

Поперечное сечение горных выработок вчерне (по проекту), м^2	Коэффициент крепости пород f		
	1–2	2–9	10–20
до 8	5*	10	12
от 8 до 15	4	8	10
более 15	3	5	7

*Коэффициент излишка сечения: КИС = 1 + Δ = 1 + 5/100 = 1,05.

Расход ЭД, КД (систем неэлектрического взрывания) определяется по числу взрываемых зарядов.

Расход ЭД, КД на 1 метр выработки:

$$N_м = N_{кд} /(l_{шп}\, \eta). \quad (5.28)$$

Удельный расход ЭД, КД на 1 м^3 взорванной породы:

$$N_р = N_{кд} /(S_{пр}\, l_{шп}\, \eta). \quad (5.29)$$

Заводы-изготовители производят неэлектрические системы инициирования с длинами волноводов, определяемыми заказами потребителей.

Длина УВТ ориентировочно определяется по формуле:

$$L_{увт} = l_{шт} + B / 4 + 0{,}5, \quad (5.30)$$

где B – ширина выработки, м;

0,5 –длина УВТ для сборки пучков, м.

5.3 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ СЕТИ

При расчете электровзрывной сети определяют её сопротивление и сопротивление её отдельных ветвей. Для проверки обеспечения безотказности взрывания всех электродетонаторов, включённых в сеть, при известном напряжении (принятом источнике тока) выполняется проверочный расчет, при котором определяют общую величину тока в сети и величину тока, поступающего в каждый электродетонатор.

Если необходимо выбрать источник тока, определяют общее сопротивление сети и минимальную силу тока в цепи, обеспечивающую безотказное взры-

вание всех электродетонаторов, после чего находят необходимое напряжение и подбирают источник тока (табл. 5.15).

Сопротивление магистральных и соединительных проводов, а также участковых, если они имеются при конкретной схеме взрывания, принимается по табличным данным или вычисляется по формуле

$$R = \rho\,(l/S), \qquad (5.31)$$

где R – сопротивление проводов, Ом;

ρ – удельное сопротивление материала проводов, которое принимается для медных проводов $0{,}0172\cdot10^{-6}$, для алюминиевых $0{,}0286\cdot10^{-6}$ и для стальных $0{,}12\cdot10^{-6}$ Ом·м;

l – длина проводов, м. Длину проводов принимают на 10 % больше расчётной, учитывая изгибы и сростки;

S – сечение проводов, м^2.

Сопротивление электродетонаторов при расчёте сети принимается по табличным данным с учётом длины выводных проводов (см. табл. 5.3). Сопротивление электродетонаторов нормальной чувствительности в зависимости от длины выводных медных проводов с диаметром жилы 0,5 мм составляет от 1,8 до 3,6 Ом. При расчёте величину сопротивления электродетонаторов нормальной чувствительности обычно принимают равной 3 Ом.

Таблица 5.15

Взрывные приборы и машинки

Наименование прибора (исполнение)	Напряжение, В	Масса, кг	Максимальное сопротивление электровзрывной сети, Ом	Назначение и область применения
Конденсаторный взрывной прибор КВП-1/100М (РВ) КВП-2/200М (РН)	 600 1700	 2 2,5	 320 1700	Взрывание ЭД нормальной чувствительности на поверхности и в шахтах, опасных и не опасных по взрыву газа или пыли
Конденсаторный взрывной прибор ПИВ-100М (РВ)	610	2,7	320	
Конденсаторная взрывная машинка КПМ-3 (РН)	1600	3,0	200	Взрывание ЭД нормальной чувствительности на поверхности и в шахтах, не опасных по взрыву газа или пыли

При электрическом способе взрывания в каждый электродетонатор нормальной чувствительности должен поступать постоянный гарантийный ток силой не менее $I_{гар}$ = 1 А при числе ЭД до 100 штук и не менее $I_{гар}$ = 1,3 А при числе ЭД более 100 штук, или переменный ток силой не менее $I_{гар}$ = 2,5 А.

Для электродетонаторов пониженной чувствительности к блуждающим токам (ЭД-1-8-Т, ЭД-1-3-Т) гарантийный ток следует принимать не менее 5 А.

Проверочный расчёт электровзрывной сети производится по следующим формулам в зависимости от схемы соединения:

а) при последовательном соединении

$$I = \frac{E}{R + rn}, \quad i = I \geq I_{\text{гар}}, \tag{5.32}$$

б) при параллельном соединении

$$I = \frac{E}{R + r/n}, \quad i = I/n \geq I_{\text{гар}}, \tag{5.33}$$

в) при смешанном последовательно-параллельном соединении

$$I = \frac{E}{R + rn/m}, \quad i = I/m \geq I_{\text{гар}}, \tag{5.34}$$

г) при смешанном параллельно-последовательном соединении

$$I = \frac{E}{R + rm/n}, \quad i = I/m \geq I_{\text{гар}}, \tag{5.35}$$

где I – сила тока в электровзрывной сети, А;

E – электродвижущая сила источника тока или напряжение на клеммах, В;

R – сопротивление всех проводов (магистральных, соединительных, участковых) и внутреннее сопротивление источника, Ом;

n – число последовательно соединённых электродетонаторов в сети или группе;

m – число параллельно включённых групп электродетонаторов при смешанном соединении;

i – сила тока, поступающего в каждый электродетонатор, А;

$I_{\text{гар}}$ – гарантийная сила тока, необходимая для безотказного взрывания электродетонаторов, А;

r – сопротивление электродетонатора, Ом.

При проведении горизонтальных выработок обычно применяется последовательная схема соединения электродетонаторов во взрывной сети. В этом случае общее сопротивление взрывной сети можно определить по формуле:

$$R_{\text{общ}} = r_{\text{п}} + r_{\text{с}}L_{\text{с}} + r_{\text{м}}L_{\text{м}}, \tag{5.36}$$

где $r_{\text{с}}$, $r_{\text{м}}$ – сопротивление соответственно 1 м соединительных и магистральных проводов, Ом (принимается по данным табл. 3.16 или рассчитывается по формуле (5.31));

$L_{\text{с}}$, $L_{\text{м}}$ – длина соответственно соединительных и магистральных проводов, м.

Таблица 5.16

Характеристики проводов для электровзрывания

Обозначение	Назначение	Диаметр жилы, мм	Площадь сечения, мм^2	Сопротивление 1 м провода, Ом/м
ВП-05	соединительные	0,5	0,196	0,090
ВП-08	магистральные	0,8	0,502	0,034
ВП-07х2	магистральные	0,7х2	0,769	0,024

Магистральные провода (постоянная взрывная магистраль) подключаются обычно на расстоянии не ближе 30 м от забоя и могут отставать от места взрыва не более чем на 100 м. Место укрытия взрывника при проходке горизонтальных выработок должно находиться не ближе 150 м от забоя. Электровзрывная сеть должна быть двухпроводной.

В шахтах (рудниках), опасных по газу или пыли, должны применяться электродетонаторы только с медными проводами. Это требование также распространяется на соединительные и магистральные провода (кабели) электровзрывной сети.

Если проверочный расчет показывает неприменимость последовательной схемы соединения электродетонаторов (ввиду того, что $i < I_{\text{гар}}$), следует принимать последовательно-параллельную схему соединения. Тогда число последовательно включённых электродетонаторов в сети или группе и число групп, включённых параллельно, определяют по формулам

$$n = \frac{E}{2I_{\text{гар}} + R}, \tag{5.37}$$

$$m = \frac{E}{2I_{\text{гар}} + r}. \tag{5.38}$$

Если общее число электродетонаторов, подлежащих взрыванию, равно $M = n \cdot m$, то, определив один из множителей, вычисляют другой.

5.4 ВЫБОР БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Тип бурильной машины выбирается в зависимости от коэффициента крепости горных пород, глубины шпуров и необходимой производительности машины при выполняемом объёме буровых работ.

Бурение шпуров производится ручными, колонковыми электро- и пневмосвёрлами, переносными перфораторами и бурильными установками.

Выбор типа бурильной машины и установочного приспособления в зависимости от крепости пород ориентировочно можно производить по табл. 3.1.

Ручные электросвёрла ЭР14Д-2М, ЭР18Д-2М, СЭР-19М применяются для бурения шпуров диаметром 36-44 мм и глубиной до 3 м по углю и породам с коэффициентом крепости до 4.

При бурении по крепким углям и породам средней крепости применяются электросвёрла ЭРП18Д-2М и СРП-1 с принудительной подачей.

Ручные пневматические свёрла СР-3, СР-3М, СПР-8 применяются на шахтах, опасных по газу или пыли, для бурения шпуров диаметром 36 мм и глубиной до 3 м при проведении выработок по углю и породам с коэффициентом крепости до 4. Сверло СГ-3Б с применением пневмоподдержки применяются для бурения шпуров в породах с коэффициентом крепости до 6.

При проведении горизонтальных и наклонных выработок при бурении шпуров диаметром 40-46 мм и глубиной до 5 м в крепких и средней крепости с коэффициентом более 5 применяют переносные перфораторы ПП36В, ПП54В, ПП54ВБ, ПП63В, ПП63ВБ, ПП63П, ПП63С, ПП63СВП массой 24-33 кг с энергией удара от 36 до 63 Дж. Обычно глубина шпуров при бурении переносными перфораторами составляет 1,5-2,5 м.

Таблица 5.17

Область применения бурильных машин и установочных приспособлений

Коэффициент крепости пород	Тип бурильных машин и установочных приспособлений
1,5–3	Ручные электросвёрла и пневмосвёрла, лёгкие перфораторы на пневмоподдержках
4–6	Бурильные установки вращательного действия, перфораторы лёгкого и среднего веса на пневмоподдержках, колонковые или длинноходовые электросвёрла на манипуляторах
7–9	Бурильные установки вращательно-ударного действия, перфораторы среднего веса и тяжёлые на пневмоподдержках, колонковые или длинноходовые электросвёрла на манипуляторах
10–20	Бурильные установки вращательно-ударного действия, тяжёлые перфораторы на пневмоподдержках, колонковые перфораторы на распорных колонках или манипуляторах

Телескопные перфораторы ПТ-29М, ПТ36М, ПТ38, ПТ48 применяются при проведении восстающих выработок и для бурения шпуров в крепких породах под анкерную (штанговую) крепь.

Для облегчения труда бурильщиков и повышения скорости бурения применяются колонковые электросвёрла, электросвёрла на манипуляторах и колонковые перфораторы.

Колонковые электросвёрла применяются при бурении шпуров диаметром 36-50 мм в породах с коэффициентом крепости 5-10. Промышленностью выпускаются колонковые электросвёрла ЭБГП-1, ЭБГП-2У5, которые устанавливаются на распорных колонках или на манипуляторах бурильных установок.

Съёмные бурильные машины типа БУЭ вращательного действия применяют на бурильных установках при бурении шпуров диаметром 42 мм, длиной до 3 м в породах с f<8.

Колонковые перфораторы, более мощные чем ручные, применяются для бурения шпуров с колонок, манипуляторов и буровых кареток при проведении выработок в крепких и очень крепких породах.

В горнодобывающей промышленности применяют колонковые перфораторы ПК-50, ПК-65, ПК-75, ПК-120, ПК-150. Применение колонковых перфораторов и электросвёрл на распорных колонках при проходке выработок ограничено из-за значительных затрат времени на монтаж, демонтаж и переустановку колонок. Поэтому чистое время бурения составляет 20-35 % от общих затрат времени на бурения шпуров.

Механизированное бурение шпуров производят бурильными установками (каретками) и навесным оборудованием, смонтированным на погрузочных машинах.

Отечественной промышленностью выпускаются бурильные установки (каретки) вращательного бурения с колонковыми электросверлами БУЭ-1м, БУЭ-2, вращательно-ударного и ударно-поворотного бурения БУ-1, БУР-2, СБУ-2м, СБУ-2К, УБШ.

В угольной промышленности наибольшее распространение получили установки БУ-1, БУР-2, БУЭ-1 и БУЭ-2. С использованием этих установок проводят около 50 % выработок.

Установки вращательного бурения применяют при проведении выработок в породах с f < 8; ударно вращательного действия с машинами БГА-1 в породах с f = 6-10, с машинами БГА-1М, БГА-2М в породах с f = 10-14; ударно-поворотного действия в породах с f = 10-20.

Технические характеристики бурильных установок приведены в табл. 5.2 – 5.3.

При определении бурильного оборудования следует принимать один перфоратор (сверло) не менее чем на 2 м^2 площади забоя горизонтальной или наклонной выработки; на каждые три рабочие машины одну резервную.

Одну бурильную установку принимают не менее чем на 9 м^2 площади забоя горизонтальной выработки. На каждую работающую в забое установку – рабочий и резервный комплекты инструмента.

Таблица 5.18

Характеристики отечественных бурильных установок для бурения шпуров при проходке горизонтальных выработок

Характеристики	Тип бурильной установки					
	УБШ-204 (БУЭ-1М)	УБШ-214А	УБШ-308У (1СБУ-2)	УБШ-303 (1БУР-2)	УБШ-254	УБШ-332Д
Коэффициент крепости пород f	4-8	4-16	8-14	4-16	8-14	8-14
Диаметр шпуров, мм	42	42-52	42-52	42-52	42-52	42-52
Длина шпуров, м	2,75	2,75	2,8	2,8	2,4	3,0

Зона бурения, м^2		6-12	4,2-12	до 20	до 20	до 12	8-22
Бурильная машина	тип	БУЭ	М2 (БГА-2М)	М2 (БГА-2М)	М2 (БГА-2М)	«Норит-1» (гидравл.)	М2 (БГА-2М)
	кол-во	1	1	2	2	1	2
Тип платформы		рельс.	рельс.	гусен.	рельс.	гусен.	пневм.
Размеры (м) в транспортном положении: длина		8,2	6,0	7,8	7,1	7,2	11,0
ширина		1,3	1,0	1,6	1,15	1,4	1,75
высота		0,9	1,5	1,7	1,65	1,8	2,3
Масса, т		5,4	4	8,6	5	7,2	12

Таблица 5.19

Характеристики зарубежных бурильных установок для бурения шпуров при проходке горизонтальных выработок

Характеристики		Тип бурильной установки				
		Minimatic 205-40	Mini 206-60	Paramatic 305-60	Rocket Bomer 104S	Rocket Bomer 282S
Коэффициент крепости пород f		8-20	8-20	8-20	8-20	8-20
Диаметр шпуров, мм		32-50	32-50	32-50	32-50	32-50
Длина шпуров, м		3,4	3,4	3,4	4,0	4,0
Высота обуривания, м		6,0	6,4	7,1	4,7	6,3
Ширина обуривания, м		8,8	9,8	10,4	4,7	8,7
Зона бурения, м^2		8-49	8-60	12-68	до 20	до 45
Бурильная машина	тип	HL 510S-45 гидравл.	HL 510S-45 гидравл.	HL 510S-45 гидравл.	COP 1838 ME пневмат.	COP 1838 ME пневмат.
	кол-во	2	2	3	1	2
Тип платформы		пневм.	пневм.	пневм.	пневм.	пневм.
Размеры (м) в транспортном положении: длина		12,3	12,7	5,3	9,8	12,1
ширина		1,98	2,24	2,5	2,0	2,0
высота		2,35	2,35	2,8	2,6	3,1
Масса, т		19	20	36	14	18

При применении бурильных установок глубина шпуров изменяется от 2 до 3,75 м. В этом случае необходимо использование прямых врубов, так как обуривание вертикального клинового вруба в большинстве случаев технически неосуществимо из-за невозможности соблюдения требуемого угла наклона врубовых шпуров.

При ручном бурении шпуров площадь забоя, приходящаяся на одну бурильную машину, изменяется в широких пределах – от 2 до 5 м^2.

5.5. СОСТАВЛЕНИЕ ПАСПОРТА БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

На основании выполненных расчетов составляется паспорт буровзрывных работ, который включает в себя: характеристику выработки; характеристику пород; схему расположения шпуров в трёх проекциях; наименования ВМ; способ взрывания; данные о способе заряжания, числе шпуров, их глубине и диаметре, массе и конструкции зарядов, последовательности и количестве приёмов взрывания зарядов, материале забойке и её длине, длинах ударно-волновых трубок систем неэлектрического взрывания; схему монтажа взрывной (электровзрывной) сети с указанием длины (сопротивления), замедлений, схемы и времени проветривания забоя.

Дополнительно указывается величина радиуса опасной зоны, места укрытий взрывника и рабочих, установки постов охраны и предупредительных знаков.

В шахтах, опасных по взрыву газа или пыли, в паспорте должны быть указаны количество и схема расположения специальных средств по предотвращению взрывов газа (пыли), а также режим взрывных работ.

Пример оформления графической части:

Паспорт
буровзрывных работ на проведение

_____
(*наименование выработки*)

1. Характеристика выработки

1.1. Форма сечения выработки _____
1.2. Площадь поперечного сечения выработки вчерне, м^2 _____
1.3. Размеры сечения выработки - высота, м _____
- ширина, м _____
1.4. Категория шахты по газу или пыли _____

2. Характеристика пород

2.1. Наименование пород _____
2.2. Коэффициент крепости пород по шкале М. М. Протодьяконова _____
2.3. Трещиноватость пород _____
2.4. Обводнённость пород _____

3. Исходные данные

3.1. Наименование ВВ и средств инициирования _____
3.2. Способ взрывания _____
3.3. Диаметры - шпуров, мм _____
- патронов, мм _____
3.4. Тип вруба _____
3.5. Материал забойки _____
3.6. Схема соединения электродетонаторов _____
3.7. Источник электрического тока _____

4. Расчётные данные по шпурам

№№ шпуров	Наименование шпуров по назначению	Глубина шпуров, м	Угол наклона шпуров, град.	Расстояние между шпурами, м	Величина заряда в шпуре, кг	Длина заряда, м	Длина забойки в шпуре, м	Очередность взрывания, интервал замедления, мс	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

5. Схема расположения шпуров

Схема расположения вычерчивается в масштабе 1:50 или 1:20 в трёх проекциях (см. Приложение 3). При применении прямых врубов дополнительно в масштабе 1:20 или 1:10 приводится схема вруба.

6. Конструкции зарядов

В схемах конструкций врубовых, вспомогательных (отбойных) и оконтуривающих зарядов указывается место установки патронов-боевиков, количество патронов, длина заряда и забойки.

7. Основные показатели буровзрывных работ

№ п/п	Показатели	Единица измерения	Количество
1	Коэффициент использования шпуров	-	
2	Подвигание забоя за взрыв	-	
3	Объём горной массы за взрыв	$м^3$	
4	Количество шпуров на цикл	шт.	
5	Количество шпурометров на цикл	м	
6	Количество шпурометров на 1 погонный метр выработки	м шп./м	
7	Количество шпурометров на 1 $м^3$ взорванной породы	м шп./$м^3$	
8	Расход ВВ на цикл	кг	
9	Расход ВВ на 1 метр выработки	кг/м	
10	Расход ВВ на 1 $м^3$ взорванной породы	кг/$м^3$	
11	Расход средств инициирования на цикл: ЭД КД (СИНВ-Ш) детонирующего шнура	 шт. шт. м	
12	Расход средств инициирования на 1 метр выработки: ЭД КД (СИНВ-Ш) детонирующего шнура	 шт. шт. м	

8. Меры безопасности

8.1. Место укрытия взрывника и рабочих на момент взрыва_____

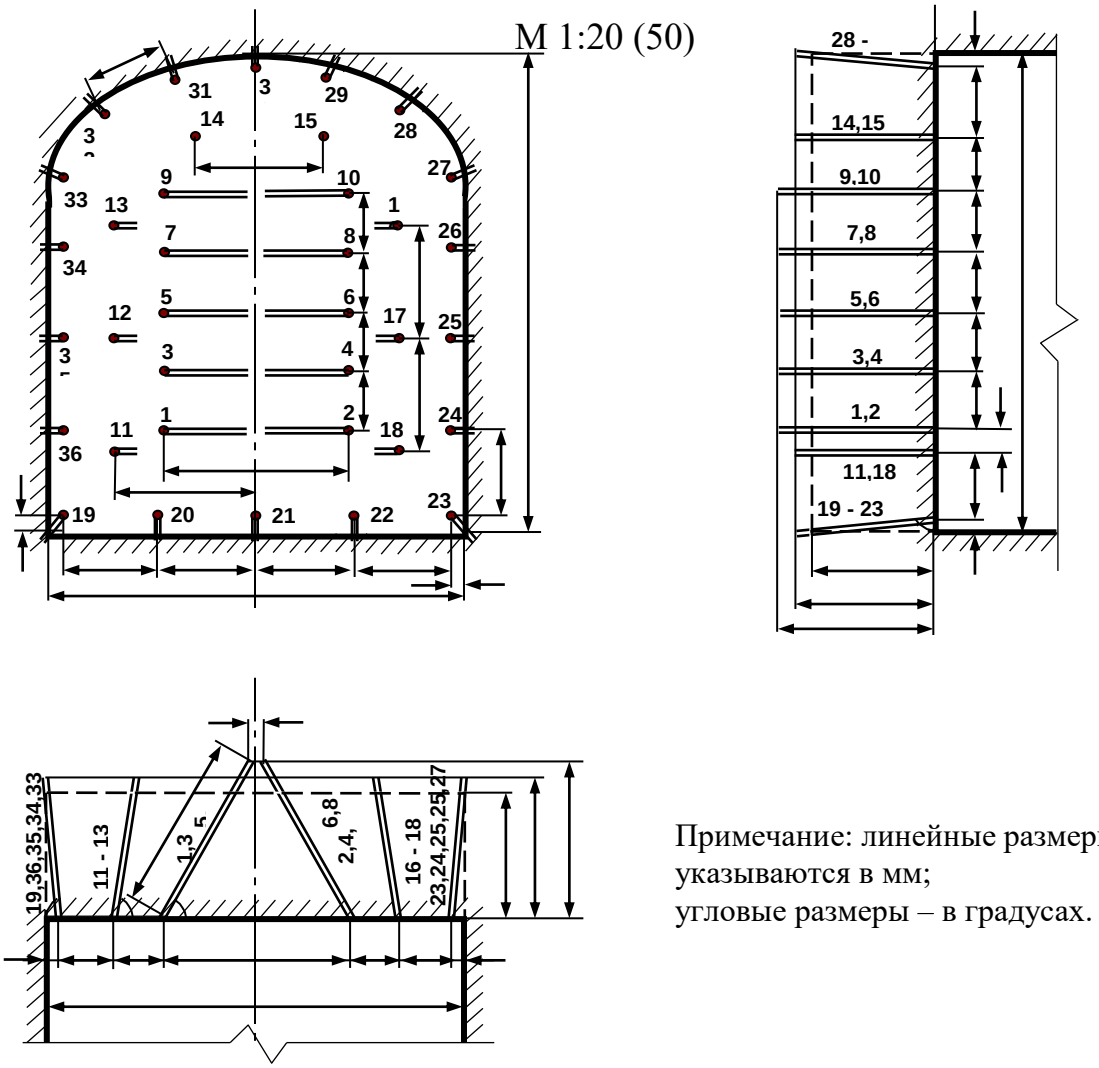
8.2. Место выставления постов_____

8.3. Время проветривания после взрыва_____

8.4. Мероприятия по подавлению пыли_____

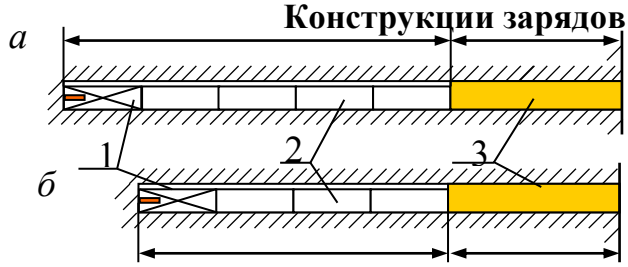
8.5. Другие дополнительные меры безопасности_____

Схема расположения шпуров



Примечание: линейные размеры
указываются в мм;
угловые размеры – в градусах.

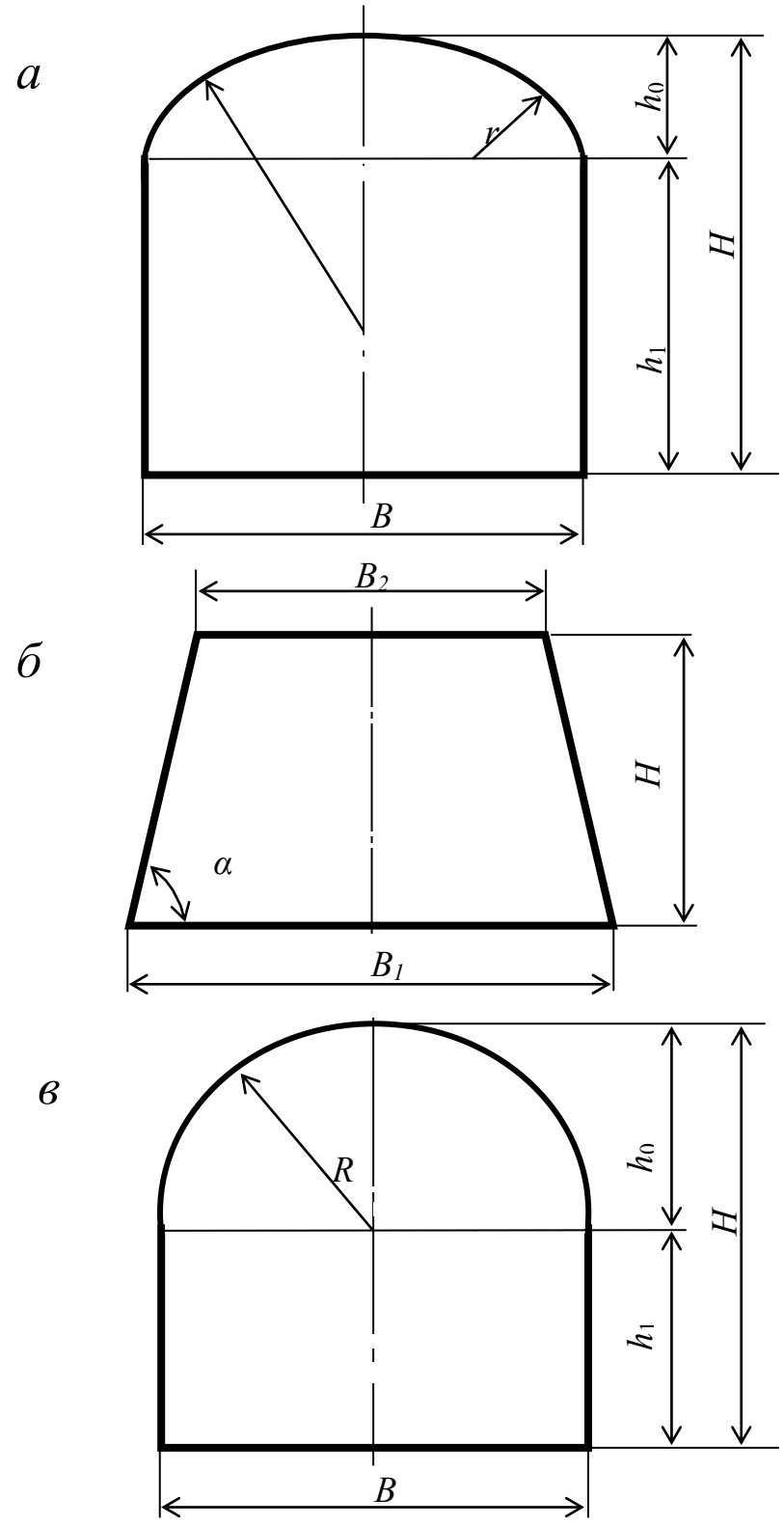
Конструкции зарядов



а – врубовые шпуры;
б – вспомогательные (отбойные) и оконтуривающие шпуры;
1 – патрон-боевик (аммонит № 6ЖВ);
2 – патроны ВВ (аммонит № 6ЖВ);
3 – забойка (песчано-глиняная, водяная)

Примечание. В шахтах, не опасных по взрыву газа или пыли, допускается взрывание зарядов без забойки (устанавливается руководителем предприятия и указывается в паспорте БВР).

Формы поперечного сечения горизонтальных выработок



$h_0 = B / 3$;
$h_1 = B - h_0$;
$R = 0{,}694\ B$;
$R = 0{,}262\ B$.

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{2H}{B_1 - B_2}$$

Рис. П4.1. Формы поперечного сечения горизонтальных выработок:
а – сводчатая с трёхциркульным (коробовым) сводом;
б – трапецевидная;
в – арочная с полуциркульным сводом

Формулы для вычисления площади поперечного сечения и периметра выработок:

Форма поперечного сечения выработки	Площадь поперечного сечения	Периметр
Сводчатая с коробовым сводом	$B \cdot (h_1 + 0{,}26 \cdot B)$	$2 \cdot h_1 + 2{,}33 \cdot B$
Трапециевидная	$\frac{B_1 + B_2}{2} \cdot H$	$B_1 + B_2 + \frac{2H}{\cos \alpha}$
Арочная с полуциркульным сводом	$B \cdot (h_1 + 0{,}39 \cdot B)$	$2 \cdot h_1 + 2{,}57 \cdot B$

Рекомендуемая литература

1. Корнилков М.В. Разрушение горных пород взрывом: конспект лекций. - Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. - 202 с.

2. Латышев О.Г., Петрушин А.Г., Азанов М.А. Промышленные взрывчатые материалы: учебное пособие. - Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2009. - 221 с.

3. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Часть 1. Разрушение горных пород взрывом: Учебник. – М.: Изд. МГГУ, 2007. – 345 с.

4. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности. – М.: Горная книга, 2009. – 670 с.

5. Латышев О.Г. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд. УГГУ, 2004. – 201 с.

6. Правила безопасности при взрывных работах (утверждены приказом Ростехнадзора от 16.12.2013 г. № 605; в редакции приказа Ростехнадзора от 30.11.2017 г. № 518). – М., 2018.

7. Взрывчатые вещества и средства инициирования. Каталог. М.: ГосНИП «РАСЧЕТ», 2003. 269 с.

8. Справочник взрывника / Под общей редакцией Б. Н. Кутузова. М.: Недра, 1988. 511 с.

Учебное издание

Сынбулатов Владимир Владимирович
Прищепа Дмитрий Вячеславович

БУРОВЗРЫВНЫЕ РАБОТЫ

Учебно-методическое пособие к самостоятельной работе, выполнению контрольных и практических работ по дисциплине «Буровзрывные работы» для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки»

Редактор *Д. В. Прищепа*

Подписано в печать «__»_____2019 г. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 3,68. Уч.-изд. л. 5,4. Тираж 100. Заказ №

Издательство УГГУ
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.О. 26.01. РАЗВИТИЕ НАВЫКОВ КРИТИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ

Специальность
21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: **очная, заочная**

год набора: 2021

Автор: Гладкова И. В., доцент, к. ф. н.

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Методические рекомендации по работе с текстом лекций	5
2	Методические рекомендации по подготовке к опросу	7
3	Методические рекомендации по подготовке доклада (презентации)	9
4	Методические рекомендации по написанию эссе	11
5	Методические рекомендации по подготовке к семинарским занятиям	14
6	Методические рекомендации по подготовке к дискуссии	15
7	Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов	17
	Заключение	20
	Список использованных источников	21

ВВЕДЕНИЕ

Инициативная самостоятельная работа студента есть неотъемлемая составная часть учебы в вузе. В современном формате высшего образования значительно возрастает роль самостоятельной работы студента. Правильно спланированная и организованная самостоятельная работа обеспечивает достижение высоких результатов в учебе.

Самостоятельная работа студента (СРС) - это планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия, при сохранении ведущей роли студентов.

Целью СРС является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками по профилю будущей специальности, опытом творческой, исследовательской деятельности, развитие самостоятельности. Ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровней. Самостоятельная работа студента – важнейшая составная часть учебного процесса, обязательная для каждого студента, объем которой определяется учебным планом. Методологическую основу СРС составляет деятельностный подход, при котором цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, т. е. на реальные ситуации, в которых студентам надо проявить знание конкретной дисциплины. Предметно и содержательно СРС определяется государственным образовательным стандартом, действующими учебными планами и образовательными программами различных форм обучения, рабочими программами учебных дисциплин, средствами обеспечения СРС: учебниками, учебными пособиями и методическими руководствами, учебно-программными комплексами и т.д.

Самостоятельная работа студентов может рассматриваться как организационная форма обучения - система педагогических условий, обеспечивающих управление учебной деятельностью студентов по освоению знаний и умений в области учебной и научной деятельности без посторонней помощи.

Самостоятельная работа студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развития исследовательских умений;
- получения навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

Самостоятельная работа студента - это особым образом организованная деятельность, включающая в свою структуру такие компоненты, как:

- уяснение цели и поставленной учебной задачи;
- четкое и системное планирование самостоятельной работы;
- поиск необходимой учебной и научной информации;
- освоение информации и ее логическая переработка;
- использование методов исследовательской, научно-исследовательской работы для решения поставленных задач;
- выработка собственной позиции по поводу полученной задачи;
- представление, обоснование и защита полученного решения;

- проведение самоанализа и самоконтроля.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы: аудиторная и внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию: текущие консультации, коллоквиум, прием и разбор домашних заданий и другие.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия: подготовка презентаций, составление глоссария, подготовка к практическим занятиям, подготовка рецензий, аннотаций на статью, подготовка к дискуссиям, круглым столам.

СРС может включать следующие формы работ:

- изучение лекционного материала;
- работа с источниками литературы: поиск, подбор и обзор литературы и электронных источников информации по заданной проблеме курса;
- выполнение домашних заданий, выдаваемых на практических занятиях: тестов, докладов, контрольных работ и других форм текущего контроля;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельное изучение; подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к контрольной работе или коллоквиуму;
- подготовка к зачету, экзамену, другим аттестациям;
- написание реферата, эссе по заданной проблем;
- выполнение расчетно-графической работы;
- выполнение выполнение курсовой работы или проекта;
- анализ научной публикации по определенной преподавателем теме, ее реферирование;
- исследовательская работа и участие в научных студенческих конференциях, семинарах и олимпиадах.

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения. Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов online и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

Подготовка к самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

1. Методические рекомендации по работе с текстом лекций

На лекционных занятиях необходимо конспектировать учебный материал. Обращать внимание на формулировки, определения, раскрывающие содержание тех или иных понятий, научные выводы и практические рекомендации, положительный опыт в ораторском мастерстве. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента, и помогает усвоить учебный материал.

Желательно оставлять в рабочих конспектах поля, на которых делать пометки, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений, фиксировать вопросы, вызывающие личный интерес, варианты ответов на них, сомнения, проблемы, спорные положения. Рекомендуется вести записи на одной стороне листа, оставляя вторую сторону для размышлений, разборов, вопросов, ответов на них, для фиксирования деталей темы или связанных с ней фактов, которые припоминаются самим студентом в ходе слушания.

Слушание лекций - сложный вид интеллектуальной деятельности, успех которой обусловлен *умением слушать*, и стремлением воспринимать материал, нужное записывая в тетрадь. Запись лекции помогает сосредоточить внимание на главном, в ходе самой лекции продумать и осмыслить услышанное, осознать план и логику изложения материала преподавателем.

Такая работа нередко вызывает трудности у студентов: некоторые стремятся записывать все дословно, другие пишут отрывочно, хаотично. Чтобы избежать этих ошибок, целесообразно придерживаться ряда правил.

1. После записи ориентирующих и направляющих внимание данных (тема, цель, план лекции, рекомендованная литература) важно попытаться проследить, как они раскрываются в содержании, подкрепляются формулировками, доказательствами, а затем и выводами.

2. Записывать следует основные положения и доказывающие их аргументы, наиболее яркие примеры и факты, поставленные преподавателем вопросы для самостоятельной проработки.

3. Стремиться к четкости записи, ее последовательности, выделяя темы, подтемы, вопросы и подвопросы, используя цифровую и буквенную нумерацию (римские и арабские цифры, большие и малые буквы), красные строки, выделение абзацев, подчеркивание главного и т.д.

Форма записи материала может быть различной - в зависимости от специфики изучаемого предмета. Это может быть стиль учебной программы (назывные предложения), уместны и свои краткие пояснения к записям.

Студентам не следует подробно записывать на лекции «все подряд», но обязательно фиксировать то, что преподаватели диктуют – это базовый конспект, содержащий основные положения лекции: определения, выводы, параметры, критерии, аксиомы, постулаты, парадигмы, концепции, ситуации, а также мысли-маяки (ими часто являются афоризмы, цитаты, остроумные изречения). Запись лекции лучше вести в сжатой форме, короткими и четкими фразами. Каждому студенту полезно выработать свою систему сокращений, в которой он мог бы разобраться легко и безошибочно.

Даже отлично записанная лекция предполагает дальнейшую самостоятельную работу над ней (осмысление ее содержания, логической структуры, выводов). С целью доработки конспекта лекции необходимо в первую очередь прочитать записи, восстановить текст в памяти, а также исправить описки, расшифровать не принятые ранее сокращения, заполнить пропущенные места, понять текст, вникнуть в его смысл. Далее прочитать материал по рекомендуемой литературе, разрешая в ходе чтения возникшие ранее затруднения, вопросы, а также дополняя и исправляя свои записи. В ходе доработки конспекта углубляются, расширяются и закрепляются знания, а также дополняется, исправляется и совершенствуется конспект. Доработанный конспект и рекомендуемая

литература используется при подготовке к практическому занятию. Знание лекционного материала при подготовке к практическому занятию обязательно.

Особенно важно в процессе самостоятельной работы над лекцией выделить новый понятийный аппарат, уяснить суть новых понятий, при необходимости обратиться к словарям и другим источникам, заодно устранив неточности в записях. Главное - вести конспект аккуратно и регулярно, только в этом случае он сможет стать подспорьем в изучении дисциплины.

Работа над лекцией стимулирует самостоятельный поиск ответов на самые различные вопросы: над какими понятиями следует поработать, какие обобщения сделать, какой дополнительный материал привлечь.

Важным средством, направляющим самообразование, является выполнение различных заданий по тексту лекции, например, составление ее развернутого плана или тезисов; ответы на вопросы проблемного характера, (скажем, об основных тенденциях развития той или иной проблемы); составление проверочных тесты по проблеме, написание по ней реферата, составление графических схем.

По своим задачам лекции могут быть разных жанров: *установочная лекция* вводит в изучение курса, предмета, проблем (что и как изучать), а *обобщающая лекция* позволяет подвести итог (зачем изучать), выделить главное, усвоить законы развития знания, преемственности, новаторства, чтобы применить обобщенный позитивный опыт к решению современных практических задач. Обобщающая лекция ориентирует в истории и современном состоянии научной проблемы.

В процессе освоения материалов обобщающих лекций студенты могут выполнять задания разного уровня. Например: задания *репродуктивного* уровня (составить развернутый план обобщающей лекции, составить тезисы по материалам лекции); задания *продуктивного* уровня (ответить на вопросы проблемного характера, составить опорный конспект по схеме, выявить основные тенденции развития проблемы); задания *творческого* уровня (составить проверочные тесты по теме, защитить реферат и графические темы по данной проблеме). Обращение к ранее изученному материалу не только помогает восстановить в памяти известные положения, выводы, но и приводит разрозненные знания в систему, углубляет и расширяет их. Каждый возврат к старому материалу позволяет найти в нем что-то новое, переосмыслить его с иных позиций, определить для него наиболее подходящее место в уже имеющейся системе знаний.

2. Методические указания по подготовке к опросу

Самостоятельная работа обучающихся включает подготовку к устному или письменному опросу на семинарских занятиях. Для этого обучающийся изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

Письменный опрос

Письменный опрос является одной из форм текущего контроля успеваемости студента. При изучении материала студент должен убедиться, что хорошо понимает основную терминологию темы, умеет ее использовать в нужном контексте. Желательно составить краткий конспект ответа на предполагаемые вопросы письменной работы, чтобы убедиться в том, что студент владеет материалом и может аргументировано, логично и грамотно письменно изложить ответ на вопрос. Следует обратить особое внимание на написание профессиональных терминов, чтобы избегать грамматических ошибок в работе. При изучении новой для студента терминологии рекомендуется изготовить карточки, которые содержат новый термин и его расшифровку, что значительно облегчит работу над материалом.

Устный опрос

Целью устного собеседования являются обобщение и закрепление изученного курса. Студентам предлагаются для освещения сквозные концептуальные проблемы. При подготовке следует использовать лекционный материал и учебную литературу. Для более глубокого постижения курса и более основательной подготовки рекомендуется познакомиться с указанной дополнительной литературой. Готовясь к семинару, студент должен, прежде всего, ознакомиться с общим планом семинарского занятия. Следует внимательно прочесть свой конспект лекции по изучаемой теме и рекомендуемую к теме семинара литературу. С незнакомыми терминами и понятиями следует ознакомиться в предлагаемом глоссарии, словаре или энциклопедии [1].

Критерии качества устного ответа.

1. Правильность ответа по содержанию.
2. Полнота и глубина ответа.
3. Сознательность ответа (учитывается понимание излагаемого материала).
4. Логика изложения материала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться профессиональной терминологией).
5. Рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели).
6. Своевременность и эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе).
7. Использование дополнительного материала (приветствуется, но не обязательно для всех студентов).
8. Рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов)[2].

---

[1] Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

[2]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: http://priab.ru/images/metod_agro/Metod_Inostran_yazyk_35.03.04_Agro_15.01.2016.pdf

Ответ на каждый вопрос из плана семинарского занятия должен быть содержательным и аргументированным. Для этого следует использовать документы, монографическую, учебную и справочную литературу.

Для успешной подготовки к устному опросу, студент должен законспектировать рекомендуемую литературу, внимательно осмыслить лекционный материал и сделать выводы. Объем временина на подготовку к устному опросу зависимости от сложности темы и особенностей организации обучающимся своей самостоятельной работы.

3.Методические рекомендации по подготовке доклада (презентации)

Доклад – публичное сообщение по заданной теме, представляющее собой развернутое изложение на определенную тему, вид самостоятельной работы, который используется в учебных и внеаудиторных занятиях и способствует формированию навыков исследовательской работы, освоению методов научного познания, приобретению навыков публичного выступления, расширяет познавательные интересы, приучает критически мыслить.

При подготовке доклада используется дополнительная литература, систематизируется материал. Работа над докладом не только позволяет учащемуся приобрести новые знания, но и способствует формированию важных научно-исследовательских навыков самостоятельной работы с научной литературой, что повышает познавательный интерес к научному познанию.

Приветствуется использование мультимедийных технологий, подготовка докладов-презентаций.

Доклад должен соответствовать следующим требованиям:

- тема доклада должна быть согласованна с преподавателем и соответствовать теме занятия;

- иллюстрации (слайды в презентации) должны быть достаточными, но не чрезмерными;

- материалы, которыми пользуется студент при подготовке доклада-презентации, должны тсоответствовать научно-методическим требованиям ВУЗа и быть указаны в докладе;

- необходимо соблюдать регламент: 7-10 минут выступления.

Преподаватель может дать тему сразу нескольким студентам одной группы, по принципу: докладчик и оппонент. Студенты могут подготовить два выступления с противоположными точками зрения и устроить дискуссию по проблемной теме. Докладчики и содокладчики во многом определяют содержание, стиль, активность данного занятия, для этого необходимо:

- использовать технические средства;
- знать и хорошо ориентироваться в теме всей презентации (семинара);
- уметь дискутировать и быстро отвечать на вопросы;
- четко выполнять установленный регламент: докладчик - 7-10 мин.; содокладчик - 5 мин.; дискуссия - 10 мин;
- иметь представление о композиционной структуре доклада.

После выступления докладчик и содокладчик, должны ответить на вопросы слушателей.

В подготовке доклада выделяют следующие этапы:

1. Определение цели доклада: информировать, объяснить, обсудить что-то (проблему, решение, ситуацию и т. п.)

2. Подбор литературы, иллюстративных примеров.

3. Составление плана доклада, систематизация материала, композиционное оформление доклада в виде печатного /рукописного текста и электронной презентации.

Общая структура доклада

Построение доклада включает три части: вступление, основную часть и заключение.

Вступление.

Вступление должно содержать:

- название презентации (доклада);
- сообщение основной идеи;
- обоснование актуальности обсуждаемого вопроса;
- современную оценку предмета изложения;
- краткое перечисление рассматриваемых вопросов;

- живую интересную форму изложения;
- акцентирование оригинальности подхода.

Основная часть.

Основная часть состоит из нескольких разделов, постепенно раскрывающих тему. Возможно использование иллюстрации (графики, диаграммы, фотографии, карты, рисунки) Если необходимо, для обоснования темы используется ссылка на источники с доказательствами, взятыми из литературы (цитирование авторов, указание цифр, фактов, определений). Изложение материала должно быть связным, последовательным, доказательным.

Задача основной части - представить достаточно данных для того, чтобы слушатели и заинтересовались темой и захотели ознакомиться с материалами. При этом логическая структура теоретического блока не должны даваться без наглядных пособий, аудио-визуальных и визуальных материалов.

Заключение.

Заключение - это ясное четкое обобщение, в котором подводятся итоги, формулируются главные выводы, подчеркивается значение рассмотренной проблемы, предлагаются самые важные практические рекомендации. Требования к оформлению доклада. Объем машинописного текста доклада должен быть рассчитан на произнесение доклада в течение 7 -10 минут (3-5 машинописных листа текста с докладом).

Доклад оценивается по следующим критериям:

Критерии оценки доклада, сообщения	*Количество баллов*
Содержательность, информационная насыщенность доклада	1
Наличие аргументов	1
Наличие выводов	1
Наличие презентации доклада	1
Владение профессиональной лексикой	1
Итого:	5

Электронные презентации выполняются в программе MS PowerPoint в виде слайдов в следующем порядке: • титульный лист с заголовком темы и автором исполнения презентации; • план презентации (5-6 пунктов - это максимум); • основная часть (не более 10 слайдов); • заключение (вывод). Общие требования к стилевому оформлению презентации: • дизайн должен быть простым и лаконичным; • основная цель - читаемость, а не субъективная красота; цветовая гамма должна состоять не более чем из двух-трех цветов; • всегда должно быть два типа слайдов: для титульных и для основного текста; • размер шрифта должен быть: 24–54 пункта (заголовок), 18–36 пунктов (обычный текст); • текст должен быть свернут до ключевых слов и фраз. Полные развернутые предложения на слайдах таких презентаций используются только при цитировании; каждый слайд должен

4. Методические рекомендации по написанию эссе

Эссе - это самостоятельная письменная работа на тему, предложенную преподавателем. Цель эссе состоит в развитии навыков самостоятельного творческого мышления и письменного изложения собственных мыслей. Писать эссе чрезвычайно полезно, поскольку это позволяет автору научиться четко и грамотно формулировать мысли, структурировать информацию, использовать основные категории анализа, выделять причинно-следственные связи, иллюстрировать понятия соответствующими примерами, аргументировать свои выводы; овладеть научным стилем речи.

Эссе должно содержать: четкое изложение сути поставленной проблемы, включать самостоятельно проведенный анализ этой проблемы с использованием концепций и аналитического инструментария, рассматриваемого в рамках дисциплины, выводы, обобщающие авторскую позицию по поставленной проблеме. В зависимости от специфики дисциплины формы эссе могут значительно дифференцироваться. В некоторых случаях это может быть анализ имеющихся статистических данных по изучаемой проблеме, анализ материалов из средств массовой информации и использованием изучаемых моделей, подробный разбор предложенной задачи с развернутыми мнениями, подбор и детальный анализ примеров, иллюстрирующих проблему и т.д.

Построение эссе - это ответ на вопрос или раскрытие темы, которое основано на классической системе доказательств.

Структура эссе

1. *Титульный лист* (заполняется по единой форме);
2. *Введение* - суть и обоснование выбора данной темы, состоит из ряда компонентов, связанных логически и стилистически.

На этом этапе очень важно правильно *сформулировать вопрос, на который вы собираетесь найти ответ в ходе своего исследования.*

3. *Основная часть* - теоретические основы выбранной проблемы и изложение основного вопроса.

Данная часть предполагает развитие аргументации и анализа, а также обоснование их, исходя из имеющихся данных, других аргументов и позиций по этому вопросу. В этом заключается основное содержание эссе и это представляет собой главную трудность. Поэтому важное значение имеют подзаголовки, на основе которых осуществляется структурирование аргументации; именно здесь необходимо обосновать (логически, используя данные или строгие рассуждения) предлагаемую аргументацию/анализ. Там, где это необходимо, в качестве аналитического инструмента можно использовать графики, диаграммы и таблицы.

В зависимости от поставленного вопроса анализ проводится на основе следующих категорий:

Причина - следствие, общее - особенное, форма - содержание, часть - целое, постоянство - изменчивость.

В процессе построения эссе необходимо помнить, что один параграф должен содержать только одно утверждение и соответствующее доказательство, подкрепленное графическим и иллюстративным материалом. Следовательно, наполняя содержанием разделы аргументацией (соответствующей подзаголовкам), необходимо в пределах параграфа ограничить себя рассмотрением одной главной мысли.

Хорошо проверенный (и для большинства — совершено необходимый) способ построения любого эссе - использование подзаголовков для обозначения ключевых моментов аргументированного изложения: это помогает посмотреть на то, что предполагается сделать (и ответить на вопрос, хорош ли замысел). Такой подход поможет следовать точно определенной цели в данном исследовании. Эффективное использование подзаголовков - не только обозначение основных пунктов, которые необходимо осветить.

Их последовательность может также свидетельствовать о наличии или отсутствии логичности в освещении темы.

4. *Заключение* - обобщения и аргументированные выводы по теме с указанием области ее применения и т.д. Подытоживает эссе или еще раз вносит пояснения, подкрепляет смысл и значение изложенного в основной части. Методы, рекомендуемые для составления заключения: повторение, иллюстрация, цитата, впечатляющее утверждение. Заключение может содержать такой очень важный, дополняющий эссе элемент, как указание на применение (импликацию) исследования, не исключая взаимосвязи с другими проблемами.

Структура аппарата доказательств, необходимых для написания эссе

Доказательство - это совокупность логических приемов обоснования истинности какого-либо суждения с помощью других истинных и связанных с ним суждений. Оно связано с убеждением, но не тождественно ему: аргументация или доказательство должны основываться на данных науки и общественно-исторической практики, убеждения же могут быть основаны на предрассудках, неосведомленности людей в вопросах экономики и политики, видимости доказательности. Другими словами, доказательство или аргументация - это рассуждение, использующее факты, истинные суждения, научные данные и убеждающее нас в истинности того, о чем идет речь.

Структура любого доказательства включает в себя три составляющие: тезис, аргументы и выводы или оценочные суждения.

Тезис - это положение (суждение), которое требуется доказать. *Аргументы* - это категории, которыми пользуются при доказательстве истинности тезиса. *Вывод* - это мнение, основанное на анализе фактов. *Оценочные суждения* - это мнения, основанные на наших убеждениях, верованиях или взглядах. *Аргументы* обычно делятся на следующие группы:

1. *Удостоверенные факты* — фактический материал (или статистические данные).
2. *Определения* в процессе аргументации используются как описание понятий, связанных с тезисом.
3. *Законы* науки и ранее доказанные теоремы тоже могут использоваться как аргументы доказательства.

Требования к фактическим данным и другим источникам

При написании эссе чрезвычайно важно то, как используются эмпирические данные и другие источники (особенно качество чтения). Все (фактические) данные соотносятся с конкретным временем и местом, поэтому прежде, чем их использовать, необходимо убедится в том, что они соответствуют необходимому для исследований времени и месту. Соответствующая спецификация данных по времени и месту — один из способов, который может предотвратить чрезмерное обобщение, результатом которого может, например, стать предположение о том, что все страны по некоторым важным аспектам одинаковы (если вы так полагаете, тогда это должно быть доказано, а не быть голословным утверждением).

Всегда можно избежать чрезмерного обобщения, если помнить, что в рамках эссе используемые данные являются иллюстративным материалом, а не заключительным актом, т.е. они подтверждают аргументы и рассуждения и свидетельствуют о том, что автор умеет использовать данные должным образом. Нельзя забывать также, что данные, касающиеся спорных вопросов, всегда подвергаются сомнению. От автора не ждут определенного или окончательного ответа. Необходимо понять сущность фактического материала, связанного с этим вопросом (соответствующие индикаторы? насколько надежны данные для построения таких индикаторов? к какому заключению можно прийти на основании имеющихся данных и индикаторов относительно причин и следствий? и т.д.), и продемонстрировать это в эссе. Нельзя ссылаться на работы, которые автор эссе не читал сам.

Как подготовить и написать эссе?

Качество любого эссе зависит от трех взаимосвязанных составляющих, таких как:

1. Исходный материал, который будет использован (конспекты прочитанной литературы, лекций, записи результатов дискуссий, собственные соображения и накопленный опыт по данной проблеме).

2. Качество обработки имеющегося исходного материала (его организация, аргументация и доводы).

3. Аргументация (насколько точно она соотносится с поднятыми в эссе проблемами).

Процесс написания эссе можно разбить на несколько стадий: обдумывание - планирование - написание - проверка - правка.

Планирование - определение цели, основных идей, источников информации, сроков окончания и представления работы.

Цель должна определять действия.

Идеи, как и цели, могут быть конкретными и общими, более абстрактными. Мысли, чувства, взгляды и представления могут быть выражены в форме аналогий, ассоциации, предположений, рассуждений, суждений, аргументов, доводов и т.д.

Аналогии - выявление идеи и создание представлений, связь элементов значений.

Ассоциации - отражение взаимосвязей предметов и явлений действительности в форме закономерной связи между нервно - психическими явлениями (в ответ на тот или иной словесный стимул выдать «первую пришедшую в голову» реакцию).

Предположения - утверждение, не подтвержденное никакими доказательствами.

Рассуждения - формулировка и доказательство мнений.

Аргументация - ряд связанных между собой суждений, которые высказываются для того, чтобы убедить читателя (слушателя) в верности (истинности) тезиса, точки зрения, позиции.

Суждение - фраза или предложение, для которого имеет смысл вопрос: истинно или ложно?

Доводы - обоснование того, что заключение верно абсолютно или с какой-либо долей вероятности. В качестве доводов используются факты, ссылки на авторитеты, заведомо истинные суждения (законы, аксиомы и т.п.), доказательства (прямые, косвенные, «от противного», «методом исключения») и т.д.

Перечень, который получится в результате перечисления идей, поможет определить, какие из них нуждаются в особенной аргументации.

*Источники***.** Тема эссе подскажет, где искать нужный материал. Обычно пользуются библиотекой, Интернет-ресурсами, словарями, справочниками. Пересмотр означает редактирование текста с ориентацией на качество и эффективность.

Качество текста складывается из четырех основных компонентов: ясности мысли, внятности, грамотности и корректности.

Мысль - это содержание написанного. Необходимо четко и ясно формулировать идеи, которые хотите выразить, в противном случае вам не удастся донести эти идеи и сведения до окружающих.

Внятность - это доступность текста для понимания. Легче всего ее можно достичь, пользуясь логично и последовательно тщательно выбранными словами, фразами и взаимосвязанными абзацами, раскрывающими тему.

Грамотность отражает соблюдение норм грамматики и правописания. Если в чем-то сомневаетесь, загляните в учебник, справьтесь в словаре или руководстве по стилистике или дайте прочитать написанное человеку, чья манера писать вам нравится.

Корректность — это стиль написанного. Стиль определятся жанром, структурой работы, целями, которые ставит перед собой пишущий, читателями, к которым он обращается.

5. Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям

Семинар представляет собой комплексную форму и завершающее звено в изучении определенных тем, предусмотренных программой учебной дисциплины. Комплексность данной формы занятий определяется тем, что в ходе её проведения сочетаются выступления обучающихся и преподавателя: рассмотрение обсуждаемой проблемы и анализ различных, часто дискуссионных позиций; обсуждение мнений обучающихся и разъяснение (консультация) преподавателя; углубленное изучение теории и приобретение навыков умения ее использовать в практической работе.

По своему назначению семинар, в процессе которого обсуждается та или иная научная проблема, способствует:

- углубленному изучению определенного раздела учебной дисциплины, закреплению знаний;
- отработке методологии и методических приемов познания;
- выработке аналитических способностей, умения обобщения и формулирования выводов;
- приобретению навыков использования научных знаний в практической деятельности;
- выработке умения кратко, аргументированно и ясно излагать обсуждаемые вопросы;
- осуществлению контроля преподавателя за ходом обучения.

Семинары представляет собой *дискуссию* в пределах обсуждаемой темы (проблемы). Дискуссия помогает участникам семинара приобрести более совершенные знания, проникнуть в суть изучаемых проблем. Выработать методологию, овладеть методами анализа социально-экономических процессов. Обсуждение должно носить творческий характер с четкой и убедительной аргументацией.

По своей структуре семинар начинается со вступительного слова преподавателя, в котором кратко излагаются место и значение обсуждаемой темы (проблемы) в данной дисциплине, напоминаются порядок и направления ее обсуждения. Конкретизируется ранее известный обучающимся план проведения занятия. После этого начинается процесс обсуждения вопросов обучающимися. Завершается занятие подведением итогоа обсуждения, заключительным словом преподавателя.

Проведение семинарских занятий в рамках учебной группы (20 - 25 человек) позволяет обеспечить активное участие в обсуждении проблемы всех присутствующих.

По ходу обсуждения темы помните, что изучение теории должно быть связано с определением (выработкой) средств, путей применения теоретических положений в практической деятельности, например, при выполнении функций государственного служащего. В то же время важно не свести обсуждение научной проблемы только к пересказу случаев из практики работы, к критике имеющих место недостатков. Дискуссии имеют важное значение: учат дисциплине ума, умению выступать по существу, мыслить логически, выделяя главное, критически оценивать выступления участников семинара.

В процессе проведения семинара обучающиеся могут использовать разнообразные по своей форме и характеру пособия, демонстрируя фактический, в том числе статистический материал, убедительно подтверждающий теоретические выводы и положения. В завершение обсудите результаты работы семинара и сделайте выводы, что хорошо усвоено, а над чем следует дополнительно поработать.

В целях эффективности семинарских занятий необходима обстоятельная подготовка к их проведению. В начале семестра (учебного года) возьмите в библиотеке необходимые методические материалы для своевременной подготовки к семинарам. Готовясь к конкретной теме занятия следует ознакомиться с новыми официальными документами, статьями в периодических журналах, вновь вышедшими монографиями.

6. Методические рекомендации по подготовке к дискуссии

Современная практика предлагает широкий круг типов семинарских занятий. Среди них особое место занимает *семинар-дискуссия,* где в диалоге хорошо усваивается новая информация, видны убеждения студента, обсуждаются противоречия (явные и скрытые) и недостатки. Для обсуждения берутся конкретные актуальные вопросы, с которыми студенты предварительно ознакомлены. Дискуссия является одной из наиболее эффективных технологий группового взаимодействия, обладающей особыми возможностями в обучении, развитии и воспитании будущего специалиста.

Дискуссия (от лат. discussio - рассмотрение, исследование) - способ организации совместной деятельности с целью интенсификации процесса принятия решений в группе посредством обсуждения какого-либо вопроса или проблемы.

Дискуссия обеспечивает активное включение студентов в поиск истины; создает условия для открытого выражения ими своих мыслей, позиций, отношений к обсуждаемой теме и обладает особой возможностью воздействия на установки ее участников в процессе группового взаимодействия. Дискуссию можно рассматривать как *метод интерактивного обучения* и как особую технологию, включающую в себя другие методы и приемы обучения: «мозговой штурм», «анализ ситуаций» и т.д.

Обучающий эффект дискуссии определяется предоставляемой участнику возможностью получить разнообразную информацию от собеседников, продемонстрировать и повысить свою компетентность, проверить и уточнить свои представления и взгляды на обсуждаемую проблему, применить имеющиеся знания в процессе совместного решения учебных и профессиональных задач.

Развивающая функция дискуссии связана со стимулированием творчества обучающихся, развитием их способности к анализу информации и аргументированному, логически выстроенному доказательству своих идей и взглядов, с повышением коммуникативной активности студентов, их эмоциональной включенности в учебный процесс.

Влияние дискуссии на личностное становление студента обусловливается ее целостно - ориентирующей направленностью, созданием благоприятных условий для проявления индивидуальности, самоопределения в существующих точках зрения на определенную проблему, выбора своей позиции; для формирования умения взаимодействовать с другими, слушать и слышать окружающих, уважать чужие убеждения, принимать оппонента, находить точки соприкосновения, соотносить и согласовывать свою позицию с позициями других участников обсуждения.

Безусловно, наличие оппонентов, противоположных точек зрения всегда обостряет дискуссию, повышает ее продуктивность, позволяет создавать с их помощью конструктивный конфликт для более эффективного решения обсуждаемых проблем.

Существует несколько видов дискуссий, использование того или иного типа дискуссии зависит от характера обсуждаемой проблемы и целей дискуссии.

Дискуссия- диалог чаще всего применяется для совместного обсуждения учебных и производственных проблем, решение которых может быть достигнуто путем взаимодополнения, группового взаимодействия по принципу «индивидуальных вкладов» или на основе согласования различных точек зрения, достижения консенсуса.

Дискуссия - спор используется для всестороннего рассмотрения сложных проблем, не имеющих однозначного решения даже в науке, социальной, политической жизни, производственной практике и т.д. Она построена на принципе «позиционного противостояния» и ее цель - не столько решить проблему, сколько побудить участников дискуссии задуматься над проблемой, уточнить и определить свою позицию; научить аргументировано отстаивать свою точку зрения и в то же время осознать право других иметь свой взгляд на эту проблему, быть индивидуальностью.

Условия эффективного проведения дискуссии:

- информированность и подготовленность студентов к дискуссии,

- свободное владение материалом, привлечение различных источников для аргументации отстаиваемых положений;

- правильное употребление понятий, используемых в дискуссии, их единообразное понимание;

- корректность поведения, недопустимость высказываний, задевающих личность оппонента; установление регламента выступления участников;

- полная включенность группы в дискуссию, участие каждого студента в ней.

Подготовка студентов к дискуссии: если тема объявлена заранее, то следует ознакомиться с указанной литературой, необходимыми справочными материалами, продумать свою позицию, четко сформулировать аргументацию, выписать цитаты, мнения специалистов.

В проведении дискуссии выделяется несколько этапов.

Этап 1-й, введение в дискуссию: формулирование проблемы и целей дискуссии;

определение значимости проблемы, совместная выработка правил дискуссии; выяснение однозначности понимания темы дискуссии, используемых в ней терминов, понятий.

Этап 2-й, обсуждение проблемы: обмен участниками мнениями по каждому вопросу. Цель этапа - собрать максимум мнений, идей, предложений, соотнося их друг с другом.

Этап 3-й, подведение итогов обсуждения: выработка студентами согласованного мнения и принятие группового решения.

Далее подводятся итоги дискуссии, заслушиваются и защищаются проектные задания. После этого проводится "мозговой штурм" по нерешенным проблемам дискуссии, а также выявляются прикладные аспекты, которые можно рекомендовать для включения в курсовые и дипломные работы или в апробацию на практике.

Семинары-дискуссии проводятся с целью выявления мнения студентов по актуальным и проблемным вопросам.

7. Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов

Экзамен - одна из важнейших частей учебного процесса, имеющая огромное значение.

Во-первых, готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, семинарах, практических и лабораторных занятиях, разбирается в том, что осталось непонятным, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью. А это чрезвычайно важно для будущего специалиста.

Во-вторых, каждый хочет быть волевым и сообразительным., выдержанным и целеустремленным, иметь хорошую память, научиться быстро находить наиболее рациональное решение в трудных ситуациях. Очевидно, что все эти качества не только украшают человека, но и делают его наиболее действенным членом коллектива. Подготовка и сдача экзамена помогают студенту глубже усвоить изучаемые дисциплины, приобрести навыки и качества, необходимые хорошему специалисту.

Конечно, успех на экзамене во многом обусловлен тем, насколько систематически и глубоко работал студент в течение семестра. Совершенно очевидно, что серьезно продумать и усвоить содержание изучаемых дисциплин за несколько дней подготовки к экзамену просто невозможно даже для очень способного студента. И, кроме того, хорошо известно, что быстро выученные на память разделы учебной дисциплины так же быстро забываются после сдачи экзамена.

При подготовке к экзамену студенты не только повторяют и дорабатывают материал дисциплины, которую они изучали в течение семестра, они обобщают полученные знания, осмысливают методологию предмета, его систему, выделяют в нем основное и главное, воспроизводят общую картину с тем, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины. Вся эта обобщающая работа проходит в условиях напряжения воли и сознания, при значительном отвлечении от повседневной жизни, т. е. в условиях, благоприятствующих пониманию и запоминанию.

Подготовка к экзаменам состоит в приведении в порядок своих знаний. Даже самые способные студенты не в состоянии в короткий период зачетно-экзаменационной сессии усвоить материал целого семестра, если они над ним не работали в свое время. Для тех, кто мало занимался в семестре, экзамены принесут мало пользы: что быстро пройдено, то быстро и забудется. И хотя в некоторых случаях студент может «проскочить» через экзаменационный барьер, в его подготовке останется серьезный пробел, трудно восполняемый впоследствии.

Определив назначение и роль экзаменов в процессе обучения, попытаемся на этой основе пояснить, как лучше готовиться к ним.

Экзаменам, как правило, предшествует защита курсовых работ (проектов) и сдача зачетов. К экзаменам допускаются только студенты, защитившие все курсовые работы проекты) и сдавшие все зачеты. В вузе сдача зачетов организована так, что при систематической работе в течение семестра, своевременной и успешной сдаче всех текущих работ, предусмотренных графиком учебного процесса, большая часть зачетов не вызывает повышенной трудности у студента. Студенты, работавшие в семестре по плану, подходят к экзаменационной сессии без напряжения, без излишней затраты сил в последнюю, «зачетную» неделю.

Подготовку к экзамену следует начинать с первого дня изучения дисциплины. Как правило, на лекциях подчеркиваются наиболее важные и трудные вопросы или разделы дисциплины, требующие внимательного изучения и обдумывания. Нужно эти вопросы выделить и обязательно постараться разобраться в них, не дожидаясь экзамена, проработать их, готовясь к семинарам, практическим или лабораторным занятиям, попробовать самостоятельно решить несколько типовых задач. И если, несмотря на это, часть материала осталась неусвоенной, ни в коем случае нельзя успокаиваться, надеясь

на то, что это не попадется на экзамене. Факты говорят об обратном; если те или другие вопросы учебной дисциплины не вошли в экзаменационный билет, преподаватель может их задать (и часто задает) в виде дополнительных вопросов.

Точно такое же отношение должно быть выработано к вопросам и задачам, перечисленным в программе учебной дисциплины, выдаваемой студентам в начале семестра. Обычно эти же вопросы и аналогичные задачи содержатся в экзаменационных билетах. Не следует оставлять без внимания ни одного раздела дисциплины: если не удалось в чем-то разобраться самому, нужно обратиться к товарищам; если и это не помогло выяснить какой-либо вопрос до конца, нужно обязательно задать этот вопрос преподавателю на предэкзаменационной консультации. Чрезвычайно важно приучить себя к умению самостоятельно мыслить, учиться думать, понимать суть дела. Очень полезно после проработки каждого раздела восстановить в памяти содержание изученного материала. кратко записав это на листе бумаги. создать карту памяти (умственную карту), изобразить необходимые схемы и чертежи (логико-графические схемы), например, отобразить последовательность вывода теоремы или формулы. Если этого не сделать, то большая часть материала останется не понятой, а лишь формально заученной, и при первом же вопросе экзаменатора студент убедится в том, насколько поверхностно он усвоил материал.

В период экзаменационной сессии происходит резкое изменение режима работы, отсутствует посещение занятий по расписанию. При всяком изменении режима работы очень важно скорее приспособиться к новым условиям. Поэтому нужно сразу выбрать такой режим работы, который сохранился бы в течение всей сессии, т. е. почти на месяц. Необходимо составить для себя новый распорядок дня, чередуя занятия с отдыхом. Для того чтобы сократить потерю времени на включение в работу, рабочие периоды целесообразно делать длительными, разделив день примерно на три части: с утра до обеда, с обеда до ужина и от ужина до сна.

Каждый рабочий период дня надо заканчивать отдыхом. Наилучший отдых в период экзаменационной сессии - прогулка, кратковременная пробежка или какой-либо неутомительный физический труд.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программа учебной дисциплины и студенческий конспект, которые указывают, что наиболее важно знать и уметь делать. Основной материал должен прорабатываться по учебнику (если такой имеется) и учебным пособиям, так как конспекта далеко недостаточно для изучения дисциплины. Учебник должен быть изучен в течение семестра, а перед экзаменом сосредоточьте внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением по памяти его краткого содержания в логической последовательности.

За один - два дня до экзамена назначается консультация. Если ее правильно использовать, она принесет большую пользу. Во время консультации студент имеет полную возможность получить ответ на нее ни ясные ему вопросы. А для этого он должен проработать до консультации все темы дисциплины. Кроме того, преподаватель будет отвечать на вопросы других студентов, что будет для вас повторением и закреплением знаний. И еще очень важное обстоятельство: преподаватель на консультации, как правило, обращает внимание на те вопросы, по которым на предыдущих экзаменах ответы были неудовлетворительными, а также фиксирует внимание на наиболее трудных темах дисциплины. Некоторые студенты не приходят на консультации либо потому, что считают, что у них нет вопросов к преподавателю, либо полагают, что у них и так мало времени и лучше самому прочитать материал в конспекте или и учебнике. Это глубокое заблуждение. Никакая другая работа не сможет принести столь значительного эффекта накануне экзамена, как консультация преподавателя.

Но консультация не может возместить отсутствия длительной работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На

консультации студент получает ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы и, следовательно, дорабатывается материал. Консультации рекомендуется посещать, подготовив к ним все вопросы, вызывающие сомнения. Если студент придет на консультацию, не проработав всего материала, польза от такой консультации будет невелика.

Итак, *основные советы* для подготовки к сдаче зачетов и экзаменов состоят в следующем:

- лучшая подготовка к зачетам и экзаменам - равномерная работа в течение всего семестра;
- используйте программы учебных дисциплин - это организует вашу подготовку к зачетам и экзаменам;
- учитывайте, что для полноценного изучения учебной дисциплины необходимо время;
- составляйте планы работы во времени;
- работайте равномерно и ритмично;
- курсовые работы (проекты) желательно защищать за одну - две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии;
- все зачеты необходимо сдавать до начала экзаменационной сессии;
- помните, что конспект не заменяет учебник и учебные пособия, а помогает выбрать из него основные вопросы и ответы;
- при подготовке наибольшее внимание и время уделяйте трудным и непонятным вопросам учебной дисциплины;
- грамотно используйте консультации;
- соблюдайте правильный режим труда и отдыха во время сессии, это сохранит работоспособность и даст хорошие результаты;
- учитесь владеть собой на зачете и экзамене;
- учитесь точно и кратко передавать свои мысли, поясняя их, если нужно, логико-графическими схемами.

Очень важным условием для правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальный сон, иначе в день экзамена не будет чувства бодрости и уверенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания по выполнению самостоятельной работы обучающихся являются неотъемлемой частью процесса обучения в вузе. Правильная организация самостоятельной работы позволяет обучающимся развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, способствует формированию навыков совершенствования профессионального мастерства. Также внеаудиторное время включает в себя подготовку к аудиторным занятиям и изучение отдельных тем, расширяющих и углубляющих представления обучающихся по разделам изучаемой дисциплины.

Таким образом, обучающийся используя методические указания может в достаточном объеме усвоить и успешно реализовать конкретные знания, умения, навыки и получить опыт при выполнении следующих условий:

1) систематическая самостоятельная работа по закреплению полученных знаний и навыков;

2) добросовестное выполнение заданий;

3) выяснение и уточнение отдельных предпосылок, умозаключений и выводов, содержащихся в учебном курсе;

4) сопоставление точек зрения различных авторов по затрагиваемым в учебном курсе проблемам; выявление неточностей и некорректного изложения материала в периодической и специальной литературе;

5) периодическое ознакомление с последними теоретическими и практическими достижениями в области управления персоналом;

6) проведение собственных научных и практических исследований по одной или нескольким актуальным проблемам для *HR*;

7) подготовка научных статей для опубликования в периодической печати, выступление на научно-практических конференциях, участие в работе студенческих научных обществ, круглых столах и диспутах по проблемам управления персоналом.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально - ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

2. Методические рекомендации по написанию реферата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hse.spb.ru/edu/recommendations/method-referat-2005.phtml

3. Фролова Н. А. Реферирование и аннотирование текстов по специальности (на материале немецкого языка): Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. - С.5.

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горно-механического факультета

«___» _____ 2018 г.
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

Брагин В. Г., Волков Е. Б., Казаков Ю. М.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебное пособие

Издание УГГУ Екатеринбург, 2018

УДК 531
Б 87

Рецензент: *Н. М. Суслов*, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета.

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики от «07» июня 2018 г. (протокол № 7) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Печатается по решению Учебно-методического совета Уральского государственного горного университета.

Брагин В. Г., Волков Е. Б., Казаков Ю. М.

Б 87 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА: Учебное пособие / Ю. М. Казаков, В. Г. Брагин, Е. Б. Волков. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. – 250 с.
ISBN 978-5-8019-0460-3

Учебное пособие содержит краткие методические указания, примеры решений задач и упражнения для самостоятельной работы по основным темам курса теоретической механики: статика, кинематика точки и простейшие движения твёрдых тел, сложное движение точки, динамика точки и механической системы. Учебное пособие для студентов всех специальностей очной и заочной форм обучения.

ISBN 978-5-8019-0460-3

©Брагин В. Г., Волков Е. Б.,
Казаков Ю. М., 2018
©Уральский государственный горный университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СТАТИКА 4
1.1. Основные понятия статики 4
1.2. Система сходящихся сил. Условия равновесия 9
1.3. Произвольная плоская система сил 16
1.4. Равновесие систем тел 26
1.5. Произвольная пространственная система сил 34
1.6. Равновесие тел при наличии сил трения 44
2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЁРДОГО ТЕЛА 55
2.1. Криволинейное движение точки 55
2.2. Поступательное движение и вращение твердого тела 62
вокруг неподвижной оси 62
2.3. Скорости точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела 73
2.4. Ускорения точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела 84
3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ 100
3.1. Основные понятия и определения сложного движения точки 100
4. ДИНАМИКА ТОЧКИ 114
4.1. Дифференциальные уравнения движения точки 114
4.2. Колебания материальной точки 124
4.3. Теорема об изменении кинетической энергии точки 134
5. ОБЩИЕ ТЕОРЕМЫ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ 146
5.1. Теорема о движении центра масс системы 146
5.2. Теорема об изменении кинетического момента системы
относительно оси 148
5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы 153
5.4. Применение общих теорем динамики системы к описанию
движений твёрдого тела 162
6. ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ 177
6.1. Принцип Даламбера для системы 177
6.2. Принцип возможных перемещений 182
6.3. Общее уравнение динамики 189
6.4. Уравнения Лагранжа II рода 201
7. ОТВЕТЫ И КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ 220
7.1. Ответы к упражнениям главы 1 220
7.2. Ответы к упражнениям главы 2 226
7.3. Ответы к упражнениям главы 3 231
7.4. Ответы к упражнениям главы 4 233
7.5. Ответы к упражнениям главы 5 236
7.6. Ответы к упражнениям главы 6 241
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 249

1. СТАТИКА

1.1. Основные понятия статики

Статика представляет раздел теоретической механики, в котором освещаются условия равновесия тел под действием систем сил.

Материальной точкой называют простейшую модель материального тела, размерами которого можно пренебречь и которое можно принять за геометрическую точку, имеющую массу, равную массе тела. Совокупность материальных точек называется **системой материальных точек**. Если система материальных точек такова, что движение каждой точки зависит от положения и движения остальных точек системы, то система называется **механической системой материальных точек**. Любое материальное тело представляет собой механическую систему материальных точек. Если точки системы связаны между собой так, что расстояния между любыми двумя точками не изменяются, то система называется **неизменяемой системой**, а тело – **абсолютно твердым телом**.

Силой в механике называют меру механического действия одного материального объекта (например, твердого тела) на другой. Единицей измерения силы в системе СИ является ньютон (Н). Совокупность сил, действующих на механическую систему (в частности, на твёрдое тело), называют **системой сил.**

Если система сил, приложенная к твердому телу, оставляет его в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, то такая система сил называется **уравновешенной,** или **системой сил, эквивалентной нулю**.

Если одну систему сил, действующих на твердое тело или материальную точку, можно заменить другой системой, не изменяя при этом состояния покоя или движения, в котором находится тело или материальная точка, то такие две системы сил называются **эквивалентными**. Если система сил эквивалентна одной силе, то эта сила называется **равнодействующей** данной системы сил.

Основные виды связей и их реакции

Всякое твердое тело, которое может занимать произвольное положение в пространстве, называется свободным. Если на тело наложены внешние связи, стесняющие (ограничивающие) свободу его перемещений, то тело является несвободным. Сила, с которой данная связь действует на тело, препятствуя его перемещениям, называется **реакцией связи**. Всякое несвободное твердое тело можно рассматривать как свободное, если освободить тело от связей и заменить действие связей их реакциями. **Реакция связи направлена в сторону, противоположную тому направлению, вдоль которого связь препятствует перемещению тела.**

Опора тела на гладкую плоскость (поверхность) без трения. Реакция $\vec{R}$ абсолютно гладкой поверхности приложена в точке касания и направлена перпендикулярно к общей касательной соприкасающихся поверхностей (рис. 1.1, *a*). Такая реакция называется **нормальной реакцией**.

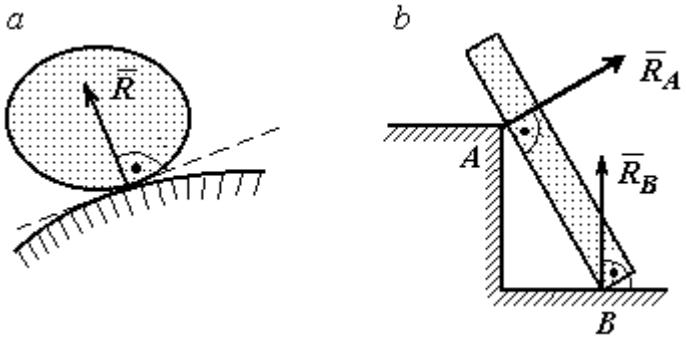


Рис. 1.1. Реакция опоры:

Брус с гладкой поверхностью (рис. 1.1, *b*), опирающийся в точке *B* на гладкий пол и в точке *A* на ребро (точечную опору), имеет реакциями опор $\vec{R}_B$ – реакцию пола и $\vec{R}_A$ – реакцию ребра (точечной опоры). Реакции приложены к брусу и направлены по нормалям к поверхности пола и поверхности бруса.

Цилиндрический шарнир и подвижная опора (каток). Цилиндрический шарнир (на рис. 1.2, *a* обозначен буквой *A*) представляет собой устройство, которое допускает поворот тела в плоскости, перпендикулярной оси шарнира (например, цилиндрическая втулка, надетая на неподвижный цилиндр).

Реакция цилиндрического шарнира $\vec{R}_A$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач неизвестную по величине и направлению реакцию цилиндрического шарнира представляют в виде составляющих, $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, направленных вдоль координатных осей (см. рис. 1.2, *a*). Величина реакции $\vec{R}_A$ определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$, где $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$ – составляющие реакции.

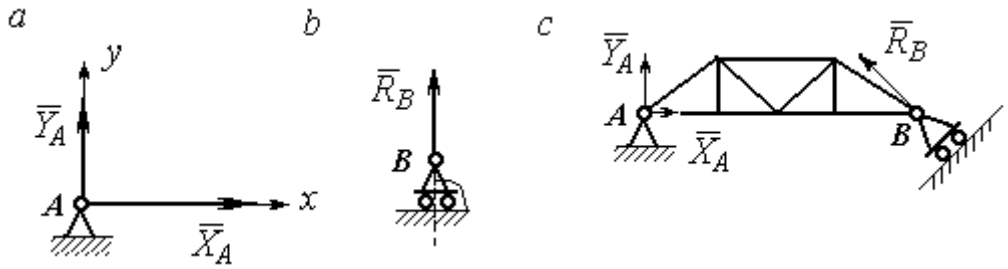


Рис. 1.2. Реакции шарнирных опор:
a – цилиндрический шарнир; *b* – каток; *c* – мостовая конструкция с цилиндрической шарнирной опорой и опорой на каток

Реакция $\vec{R}_B$ опоры на каток (подвижной опоры) (рис. 1.2, *b*) перпендикулярна опорной поверхности.

На рис. 1.2, *c* показаны реакции связей мостовой конструкции с цилиндрической шарнирной опорой и подвижной опорой (катком). Реакция цилиндрического шарнира в точке *A* изображена в виде разложения на взаимно перпендикулярные составляющие $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, реакция $\vec{R}_B$ катка в точке *B* перпендикулярна наклонной плоскости, на которой стоит каток.

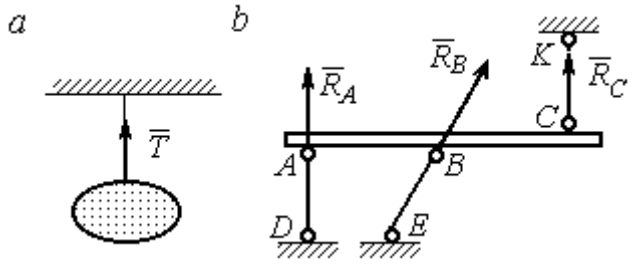


Рис. 1.3. Реакция гибкой нити и невесомого стержня

Гибкая связь и жесткий невесомый стержень. Связь в виде гибкой нерастяжимой нити (каната, троса) препятствует удалению тела от точки подвеса. (рис. 1.3, *a*). Реакция связи $\vec{T}$,

равная натяжению нити, приложена к телу и направлена вдоль нити в сторону противоположную направлению, вдоль которого нить препятствует перемещению тела

Если опорой тела служит невесомый стержень с шарнирами на концах, то реакция прямолинейного стержня приложена к телу и направлена вдоль стержня. Направление реакции стержня противоположно направлению, по которому стержень препятствует перемещению тела.

Реакции невесомых стержней, удерживающих балку, изображённую на рис. 1.3, *b*, направлены исходя из предположения, что балка может перемещаться вниз. При этом стержни *AD* и *BE* сжаты, а стержень *CK* растянут.

Сферический шарнир. Связь в виде сферического шарнира не позволяет перемещать тело в пространстве, но допускает поворот в пространстве вокруг неподвижной точки. Реакция сферического шарнира может иметь любое направление в пространстве. При решении задач реакцию изображают ее составляющими. На рис. 1.4 реакция $\vec{R}_A$ сферического шарнира A разложена на составляющие $\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A$ по направлениям координатных осей. Величина реакции сферического шарнира определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}$.

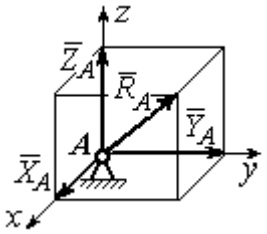


Рис. 1.4. Реакция сферического шарнира

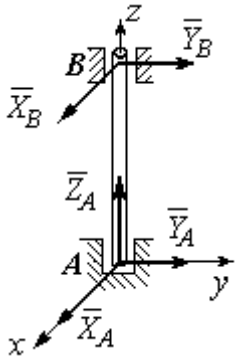


Рис. 1.5. Реакции подшипника и подпятника

Подшипник и подпятник. Подшипник представляет собой цилиндрический шарнир (рис. 1.5, подшипник *B*). Его реакция может иметь любое направление в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач реакция подшипника раскладывается на две составляющие. Например, на рис. 1.5 реакция $\vec{R}_B$ подшип-

ника *B* разложена на составляющие $\vec{X}_B, \vec{Y}_B$, параллельные координатным осям. Величина реакции подшипника определяется по формуле: $R_B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}$.

Подпятник является цилиндрическим шарниром с упором. В задачах реакция подпятника обычно изображается векторами $\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A$, представляющими разложение силы реакции подпятника по заданным направлениям координатных осей (см. рис. 1.5, подпятник *A*). Величина реакции подпятника определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}$.

Проекция силы на ось и на плоскость

Проекция силы на ось есть алгебраическая величина, равная произведению модуля силы на косинус угла между силой и положительным направлением оси. Если этот угол острый, проекция положительна, если тупой – отрицательна. Если сила перпендикулярна оси, её проекция на ось равна нулю.

Проекции сил $\vec{F}$, $\vec{Q}$, $\vec{P}$, изображённых на рис. 1.6, *a*, на ось *x*: $F_x = F\cos\alpha$, $Q_x = Q\cos\alpha_1 = -Q\cos\varphi$, $P_x = P\cos 90^\circ = 0$.

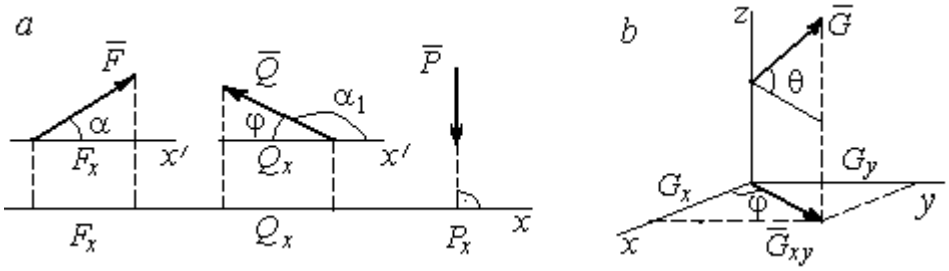


Рис. 1.6. Проекция силы на ось и на плоскость:
a – проекция силы на ось; *b* – проекция силы на плоскость

Проекцией силы на плоскость называется вектор, заключённый между проекциями начала и конца силы $\vec{G}$ на эту плоскость.

На рис. 1.6, *b* вектор $\vec{G}_{xy}$ является проекцией силы $\vec{G}$ на плоскость *xy*. По величине $G_{xy} = G\cos\theta$, где θ – угол между направлением силы $\vec{G}$ и её проек-

ции $\vec{G}_{xy}$. Проекции силы $\vec{G}$ на оси xyz: $G_x = G_{xy}\cos\varphi = G\cos\theta\cos\varphi$, $G_y = G_{xy}\sin\varphi = G\cos\theta\sin\varphi$, $G_z = G\sin\theta$.

1.2. Система сходящихся сил. Условия равновесия

Для равновесия **пространственной системы сходящихся сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из трёх осей прямоугольной системы координат были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky}, F_{kz} – проекции всех сил на координатные оси.

Для равновесия **плоской системы сходящихся сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю: $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$, где F_{kx}, F_{ky} – проекции всех сил на координатные оси.

Примеры решения задач на равновесие сходящейся системы сил

Задача 1. Каток весом 20 кН удерживается на гладкой наклонной плоскости тросом, который одним концом закреплён на поверхности шара, а другим – на вертикальной стене (рис. 1.7). Угол наклона троса к вертикальной стене $\beta = 120°$. Угол наклона плоскости к горизонту $\alpha = 45°$. Определить силу давления катка на плоскость и натяжение троса.

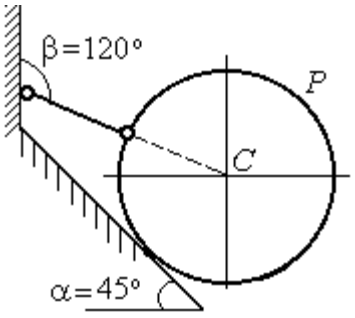


Рис. 1.7. Равновесие шара

Решение

При равновесии на каток действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция троса $\vec{N}$ и реакция опоры $\vec{R}$. Линии действия всех сил находятся в одной плоскости и пересекаются в центре шара. Направления реакций показаны на рис. 1.8.

Условия равновесия плоской сходящейся системы сил:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0.$$

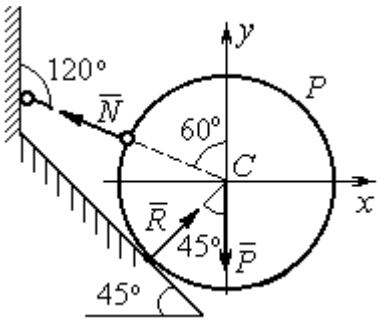


Рис. 1.8. Силы, действующие на каток, при его равновесии

Проведя оси координат, как показано на рис. 1.8, выразим условия равновесия в виде системы уравнений:

$$\sum F_{kx} = -N\cos 30^\circ + R\cos 45^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = N\cos 60^\circ + R\cos 45^\circ - P = 0.$$

Подставляя в уравнения исходные данные задачи, найдем: $N = 14{,}64$ кН, $R = 17{,}93$ кН.

Натяжение троса равно модулю его реакции. Сила давления катка на плоскость равна реакции опоры гладкой плоскости, но направлена в противоположную сторону.

Задача 2. Кронштейн состоит из невесомых стержней *AC* и *BC*, скрепленных друг с другом и с вертикальной стеной шарнирами, как показано на рис. 1.9. Стержень *BC* горизонтален, стержень *AC* составляет с горизонталью угол $\beta = 60^\circ$. К шарниру *C* прикреплены два троса, удерживающие грузы 1 и 2 весом $G_1 = 10$ кН и $G_2 = 12$ кН. Трос, удерживающий груз 1, вертикален, а другой перекинут через блок *D* так, что угол наклона участка троса *CD* к вертикали $\alpha = 60^\circ$. Определить реакции стержней *BC* и *AC*.

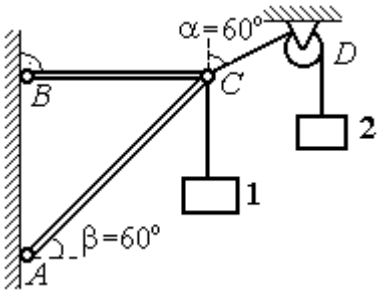


Рис. 1.9. Равновесие кронштейна

Решение

Рассмотрим равновесие узла *C*, в котором закреплены стержни и тросы. На узел *C* действуют реакции $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$ тросов, натянутых грузами 1 и 2, и реакции $\vec{N}_1$ и $\vec{N}_2$ стержней *BC* и *AC* (рис. 1.10). Модули реакций тросов $\vec{T}_1$ и $\vec{T}_2$ равны весу грузов: $T_1 = G_1$, $T_2 = G_2$.

Плоская система сил ($\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$) является сходящейся. Условия равновесия: $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$. Проведя оси координат xCy, как показано на рис. 1.10, и определяя проекции сил на оси, получим систему уравнений:

$$N_1 + N_2\cos 60^\circ - T_2\cos 30^\circ = 0;$$

$$N_2\cos 30^\circ + T_1 - T_2\cos 60^\circ = 0.$$

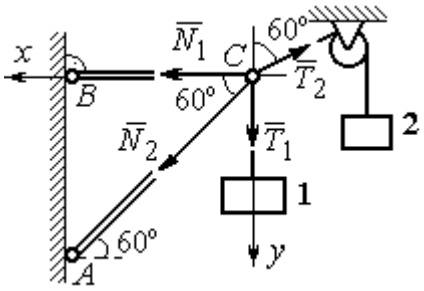


Рис. 1.10. Силы, действующие на узел *C* при его равновесии

Подставим в уравнения исходные данные задачи. С учётом того, что $T_1 = G_1 = 10$ кН, $T_2 = G_2 = 12$ кН, найдём значения реакций: $N_1 = 12{,}7$ кН, $N_2 = -4{,}62$ кН. Отрицательная величина N_2 означает, что вектор $\vec{N}_2$ реакции стержня *AC* направлен в противоположную сторону.

Задача 3. Груз весом $P = 20$ кН поднимается стержневым краном *ABC* посредством каната, перекинутого через блоки *B* и *D* (рис. 1.11). Блок *B* установлен в месте шарнирного соединения невесомых стержней *AB* и *BC*, блок *D* укреплён так, что участок троса *DB* составляет с вертикалью угол $\beta = 60^\circ$. Стержни *AB* и *BC* соединены со стенками шарнирами. Конец троса, несущий груз *P*, переброшен через блок *E* и на отрезке *BE* составляет с вертикалью угол $\alpha = 30^\circ$. Пренебрегая трением в блоке и размерами блока *B*, определить усилия в стержнях *AB* и *BC* при равновесии груза.

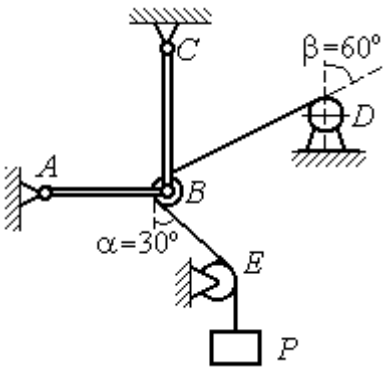


Рис. 1.11. Равновесие стержневой конструкции

Решение

Рассмотрим равновесие блока *B* вместе с отрезками нити *BE* и *BD*. Освободим блок *B* от связей и заменим их реакциями.

Рассматривая блок и отрезок нити как одно целое, можно не учитывать силы взаимного давления нити и блока. На блок действует реакция $\vec{T}$ нити *BD*, приложенная в точке *D*, численно равная весу груза *P*, реакция $\vec{T}'$ нити *BE*, приложенная в точке *E* и также численно равная весу груза *P* и реакции стержней $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$ (см. рис. 1.12).

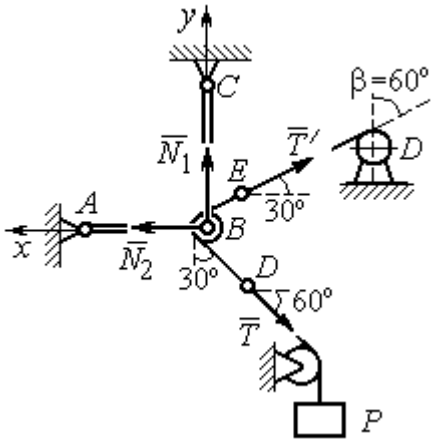


Рис. 1.12. Силы, действующие на блок *B*, при его равновесии

Пренебрегая размерами блока, можно считать систему сил сходящейся. Проведём координатные оси, как показано на рис. 1.12, и выразим условия равновесия плоской сходящейся системы сил в виде системы уравнений:

$$\sum F_{kx} = N_2 - T'\cos 30^\circ - T\cos 60^\circ = 0;\ \sum F_{ky} = N_1 + T'\cos 60^\circ - T\cos 30^\circ = 0.$$

Решая полученную систему уравнений с учётом, что $T' = T = P$ = 20 кН, получим: N_1 = 7,32 кН, N_2 = 27,32 кН.

Задача 4. Шахта ориентируется в вертикальной плоскости с помощью несвободного проволочного отвеса *CBDP*, натянутого грузом весом *P* = 50 Н (рис. 1.13).

Определить натяжения частей отвеса *CB*, *BD*, *DP* и натяжения оттяжек *BA* и *DE*, если угол отклонения оттяжки *BC* от горизонтали $\alpha = 60^\circ$, а отклонение средней части отвеса *BD* от вертикали $\beta = 4^\circ$. Весом проволоки отвеса пренебречь.

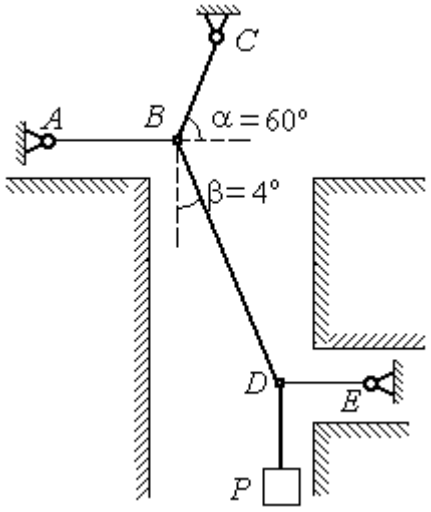


Рис. 1.13. Схема отвеса

Решение

Рассмотрим равновесие узла *D*, в котором сходятся три силы – реакция $\vec{S}$ средней части отвеса, реакция $\vec{T}_E$ оттяжки *DE* и реакция $\vec{T}_P$ отвеса на участке

DP, равная весу груза $T_P = P$ (рис. 1.14). Выберем оси координат *xDy*, как показано на рис. 1.14, и составим уравнения равновесия узла *D:*

$$\sum F_{kx} = S\cos 86^\circ - T_E = 0\,; \;\; \sum F_{ky} = S\cos 4^\circ - T_P = 0\,.$$

Из второго уравнения с учётом, что натяжение отвеса на участке *DP* $T_P = P =$ 50 Н, находим натяжение S на среднем участке отвеса: $S = \dfrac{T_P}{\cos 4^\circ} = 50{,}12$ Н. Из первого уравнения находим натяжение $T_E = S\cos 86^\circ = 3{,}49$ Н.

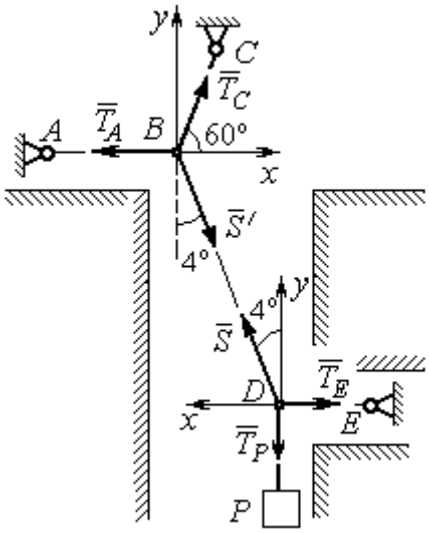


Рис.1.14. Силы, действующие в узлах *B* и *D* при равновесии отвеса

Теперь рассмотрим равновесие узла *B*, на который действуют реакция $\vec{T}_A$ оттяжки *BA*, реакция $\vec{T}_C$ верхней части отвеса *BC* и реакция $\vec{S}'$ средней части отвеса. Вектор силы $\vec{S}'$ противоположен направлению вектора $\vec{S}$: $\vec{S}' = -\vec{S}$, а численно (по принципу равенства действия и противодействия) они равны $S' = S$ (см. рис. 1.14). Выберем оси координат *xBy*, как показано на рис. 1.14, и составим уравнения равновесия узла *B:*

$$\sum F_{kx} = T_C\cos 60^\circ + S'\cos 86^\circ - T_A = 0\,; \quad \sum F_{ky} = T_C\cos 30^\circ - S'\cos 4^\circ = 0\,.$$

Находим натяжение отвеса на верхнем участке *BC* и натяжение T_A оттяжки *BA*: $T_C = \dfrac{S'\cos 4^\circ}{\cos 30^\circ} = 57{,}73$ Н; $T_A = T_C\cos 60^\circ + S'\cos 86^\circ = 32{,}36$ Н.

Задача 5. Груз *P* = 20 кН удерживается двумя стержнями *AC*, *AD* одинаковой длины и цепью *AB*, скреплённых в точке *A*, так, что плоскость треугольника *ADC* горизонтальна (рис. 1.15). Цепь *BA* отклонена от вертикальной стены на угол $\beta = 60^\circ$ и расстояние *CE* = *ED.* Трос закреплён одним концом в точке *A*, а другой его конец, несущий груз, переброшен через блок *K* так, что отрезок

троса *АК* находится в плоскости, параллельной плоскости стены, и составляет с горизонтом угол $\alpha = 30^\circ$. Крепления стержней шарнирные. Углы у оснований стержней $\angle DCA = \angle CDA = 60^\circ$. Определить реакции стержней и натяжение цепи. Весами стержней пренебречь.

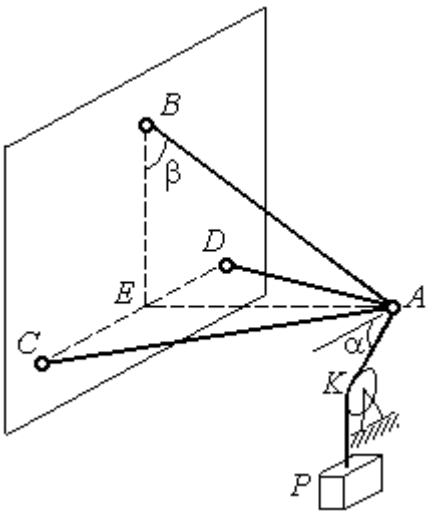


Рис. 1.15. Конструкция пространственного кронштейна

Решение

Рассмотрим равновесие узла *А*. Освобождаем узел от связей, заменяя действие связей реакциями. Реакции стержней $\vec{S}_D$ и $\vec{S}_C$ направлены по стержням, реакция цепи $\vec{S}_B$ направлена вдоль линии натянутой цепи (рис. 1.16). Реакция троса $\vec{T}$ направлена вдоль троса по линии *АК* и численно равна весу груза: $T = P$. Направления реакций выбраны в предположении, что стержни и цепь растянуты.

Выберем систему координат, как показано на рис. 1.16. На узел *А* действует пространственная сходящаяся система сил.

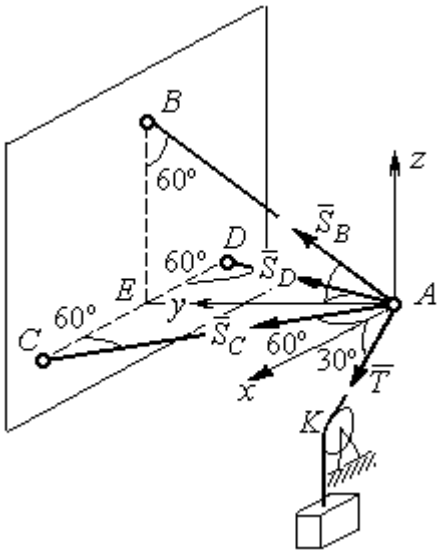


Рис. 1.16. Силы, действующие на узел *А*, при его равновесии

Условия равновесия пространственной сходящейся системы сил $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$, $\sum F_{kz} = 0$, где F_{kx}, F_{ky}, F_{kz} – проекции всех сил на координатные оси. Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = S_C \cos 60^\circ - S_D \cos 60^\circ + T \cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = S_C \cos 30^\circ + S_D \cos 30^\circ + S_B \cos 30^\circ = 0; \quad \sum F_{kz} = S_B \cos 60^\circ - T \cos 60^\circ = 0.$$

Решая эту систему, находим $S_B = T = P = 20$ кН; $S_C = -27{,}32$ кН; $S_D = 7{,}32$ кН. Знак минус величины S_C показывает, что реакция стержня AC имеет обратное направление. Натяжение цепи равно модулю реакции $\vec{S}_B$.

Задача 6. Подъёмное устройство (рис. 1.17) состоит из двух стержневых опор DB и DA и растяжки DC, соединённых в точке D. В точке D к устройству прикреплена вертикальная нить, удерживающая груз весом $P = 50$ кН.

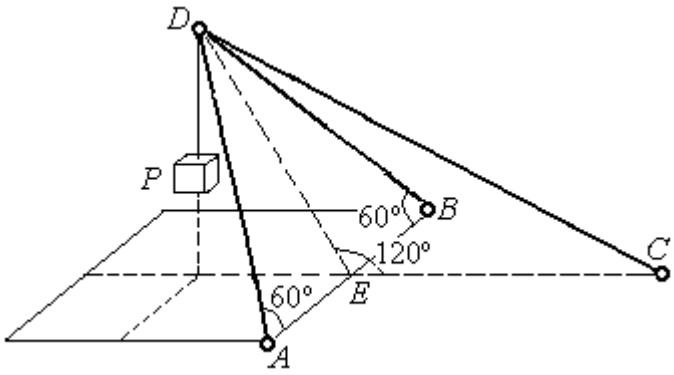


Рис. 1.17. Конструкция подъёмного устройства

Определить реакцию стержневых опор и усилие в растяжке подъёмного устройства, если крепления стержней шарнирные, угол $\angle DEC = 120^\circ$, $AE = EB$, $DE = EC$, а углы в основании опор $\angle DAB = \angle DBA = 60^\circ$.

Решение

Рассматриваем равновесие узла D. Освобождаем узел от связей, заменяя действие связей реакциями. Реакции стержней $\vec{S}_A$, $\vec{S}_B$, $\vec{S}_C$ направлены по стержням, реакция нити $\vec{T}$, численно равная весу тела, направлена вдоль нити (рис. 1.18). Направление реакций выбрано в предположении, что все стержни растянуты.

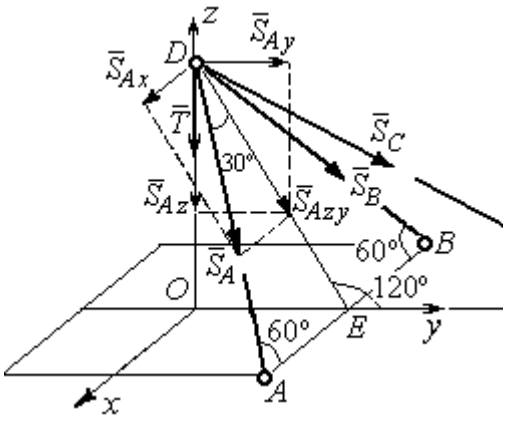


Рис. 1.18. Силы, действующие на узел D, при его равновесии

На узел D действует пространственная сходящаяся система сил. Выберем систему координат $Oxyz$, как показано на рис. 1.18, и составим уравнения равновесия. Заметим, что при определении проекции си-

лы $\vec{S}_A$ на оси координат следует вначале получить её проекции $\vec{S}_{Ax}$ на ось Ox и $\vec{S}_{Azy}$ – на плоскость Oyz, а затем найти проекции силы $\vec{S}_{Azy}$ на оси Oy и Oz. На рис. 1.18 показана последовательность вычисления проекций силы $\vec{S}_A$ на оси координат: $S_{Ax} = S_A\cos60^\circ$, $S_{Ay} = S_{Azy}\cos60^\circ = S_A\cos30^\circ\cos60^\circ$, $S_{Az} = -S_{Azy}\cos30^\circ = -S_A\cos^2 30^\circ$. Определение проекций силы $\vec{S}_B$ производится аналогично. Сила $\vec{S}_C$ расположена в плоскости Oyz и имеет своими проекциями $S_{Cy} = S_C\cos30^\circ$, $S_{Cz} = -S_C\cos60^\circ$. В результате уравнения равновесия узла D принимают вид

$$\sum F_{ky} = S_A\cos30^\circ\cos60^\circ + S_B\cos30^\circ\cos60^\circ + S_C\cos30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kx} = S_A\cos60^\circ - S_B\cos60^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kz} = -S_A\cos^2 30^\circ - S_B\cos^2 30^\circ - S_C\cos60^\circ - T = 0.$$

Решая систему, получим: $S_A = S_B = -50$ кН, $S_C = 50$ кН.

Отрицательные значения S_A и S_B означают, что реакций стержней AD и DB направлены в противоположную сторону. В результате стержни AD и DB сжаты, а стержень DC растянут.

1.3. Произвольная плоская система сил

Система сил, расположенных в одной плоскости, называется **плоской системой сил.**

Алгебраическим моментом $M_O(\vec{F})$ силы $\vec{F}$ относительно центра O, или просто **моментом силы** $\vec{F}$ относительно центра, называют взятое с соответствующим знаком произведение модуля силы $\vec{F}$ и кратчайшего расстояния h от центра до линии действия силы (рис. 1.19, *а*): $M_O(\vec{F}) = \pm Fh$. Величину h называют **плечом силы.** Единица измерения момента – Н·м. Момент считается положительным, если сила $\vec{F}$ стремится повернуть тело вокруг центра в

направлении против хода часовой стрелки, и отрицательным – в обратном случае.

На рис. 1.19, *b* показаны знаки моментов сил $\vec{F}$ и $\vec{Q}$ относительно центра *O*: $M_O(\vec{F}) = +Fh_2$, $M_O(\vec{Q}) = -Qh_1$. Момент силы $\vec{R}$ относительно центра *O* равен нулю: $M_O(\vec{R}) = 0$, так как плечо силы равно нулю.

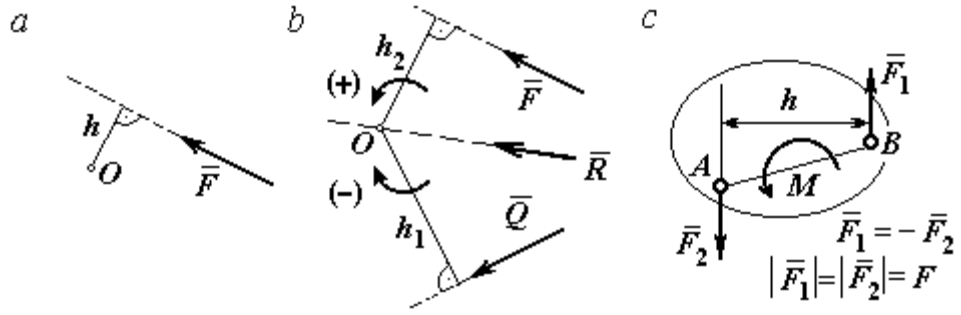


Рис. 1.19. Схемы к вычислению момента силы:
a, *b* – момент силы относительно центра; *c* – момент пары сил

Парой сил, или просто парой (рис.1.19, *c*), называют систему двух равных по модулю сил, параллельных, направленных в противоположные стороны и не лежащих на одной прямой. **Плечом пары** называют кратчайшее расстояние между линиями действия ее сил. Алгебраическим моментом пары сил, или **моментом пары,** называют взятое со знаком плюс или минус произведение модуля одной из сил пары и плеча пары. Правило знаков такое же, как и для момента силы. Пара сил, показанная на рис. 1.19, *c*, имеет плечо h и момент *M*: $M = F_1 h = F_2 h$. Поскольку пара сил характеризуется только ее моментом, на схемах пару часто изображают дуговой стрелкой, показывающей направление поворота твердого тела под действием пары (см. *M* на рис. 1.19, *c*).

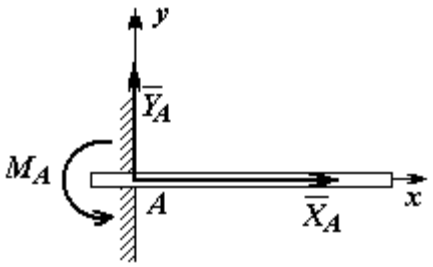


Рис. 1.20. Реакция жесткой заделки

Жесткая заделка. Такая связь (рис. 1.20) препятствует не только линейным перемещениям тела, но и повороту. Реакция жесткой заделки состоит из силы

реакции $\vec{R}_A$ и пары сил с моментом M_A. Силу реакции жесткой заделки $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными вдоль координатных осей (см. рис. 1.20). Величина силы реакции $\vec{R}_A$ определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$.

При вычислении моментов сил часто применяют **теорему Вариньона** о том, что момент равнодействующей системы сил относительно любого центра равен сумме моментов всех сил этой системы относительно того же центра. На рис. 1.21 показана схема применения теоремы Вариньона. Силу $\vec{F}$ раскладываем на составляющие $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, направленные вдоль координатных осей так, что имеет место равенство $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$. Численно составляющие $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ равны проекциям силы $\vec{F}$ на координатные оси: $F_1 = F\cos\alpha$, $F_2 = F\sin\alpha$. Для каждой из составляющих находим плечи h_1 и h_2 относительно центра *O*. Тогда (с учётом знаков) момент силы $\vec{F}$ относительно центра *O*: $M_O(\vec{F}) = M_O(\vec{F}_1) + M_O(\vec{F}_2) = F_1 h_1 + F_2 h_2$.

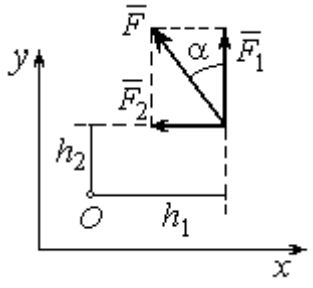


Рис.1.21. Применение теоремы Вариньона

Распределённая нагрузка. Силы, приложенные непрерывно вдоль некоторой поверхности, называются **распределенными**. Распределённая нагрузка характеризуется интенсивностью *q*. Интенсивность нагрузки, равномерно распределённой вдоль прямой, измеряется в Н/м. На рис. 1.22 приведена плоская система сил, равномерно распределённых вдоль прямой. Равнодействующая $\vec{Q}$ сил, равномерно распределённых вдоль прямой, приложена в середине отрезка действия распределённой нагрузки и по модулю равна про-

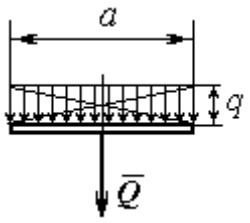


Рис. 1.22. Нагрузка, равномерно распределённая по прямой

изведению интенсивности нагрузки на длину её действия: $Q = qa$, где a – длина отрезка действия распределённой нагрузки.

Основная форма условий равновесия плоской системы сил. Для равновесия плоской системы сил необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю и сумма моментов сил относительно любого центра, находящегося в плоскости действия сил, была равна нулю:

$$\sum F_{kx} = 0, \ \sum F_{ky} = 0, \ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky} – проекции всех сил на координатные оси; $M_A(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно произвольно выбранного центра A.

Примеры решения задач на равновесие произвольной плоской системы сил

Задача 7. Однородная балка AB весом P = 100 кН прикреплена к стене шарниром A (рис.1.23). Балка удерживается под углом 60° к вертикали при помощи троса, прикреплённого к балке в точке B, перекинутого через блок D и несущего груз Q. Участок троса DB образует с вертикалью угол 30°. В точке C к балке подвешен груз G весом G = 200 кН. Определить вес груза Q, удерживающий балку в равновесии, и реакцию шарнира A, пренебрегая трением в блоке, если расстояние $BC = 0{,}25BA$.

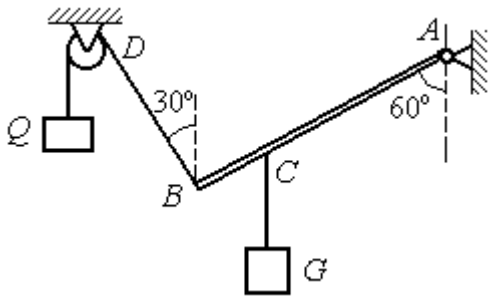


Рис. 1.23. Равновесие балки

Решение

Объектом равновесия является балка AB. На балку действуют сила тяжести $\vec{P}$, приложенная в середине отрезка AB, реакция шарнира A, представлен-

ная в виде двух составляющих $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленных вдоль координатных осей, реакция $\vec{T}_1$ нити, удерживающей груз *Q*, и реакция $\vec{T}_2$ нити, удерживающей груз *G*. Направления сил и реакций связей показаны на рис. 1.24.

Силы – $\vec{T}_1$, $\vec{T}_2$, $\vec{P}$, $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, действующие на балку, составляют произвольную плоскую систему. Условия равновесия произвольной плоской системы сил:

$$\sum F_{kx} = 0\,;\ \sum F_{ky} = 0\,;\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0\,.$$

Выберем систему координат *xAy,* как показано на рис. 1.24.

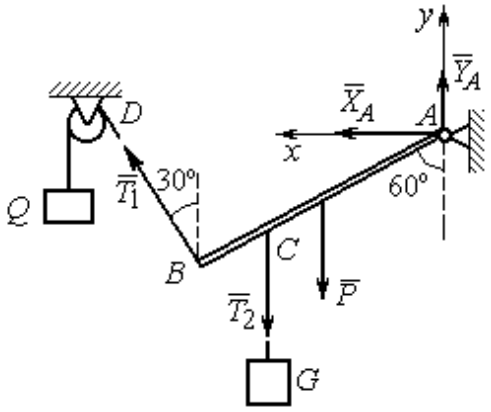


Рис. 1.24. Внешние силы и реакции связей при равновесии балки

Первые два уравнения равновесия имеют вид

$$\sum F_{kx} = X_A + T_1\cos 60^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_A + T_1\cos 30^\circ - T_2 - P = 0.$$

Выберем центром точку *A* и будем вычислять моменты сил относительно этого центра. Обозначим (для удобства записи) длину $AB = \ell$. Условие равновесия балки в форме равенства нулю суммы моментов сил относительно центра *A* имеет вид

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -T_1\ell + T_2\frac{3}{4}\ell\cos 30^\circ + P\frac{1}{2}\ell\cos 30^\circ = 0.$$

Подставим данные из условия задачи, с учётом, что реакция нити, удерживающей груз *Q*, по модулю равна весу этого груза: $T_1 = Q$, а реакция нити, удерживающей груз *G*, численно равна весу груза *G*: $T_2 = G$.

Получим систему уравнений:

$$X_A + Q\cdot 0{,}5 = 0,\ \ Y_A + Q\cdot 0{,}866 - 300 = 0,\ \ -Q + 173{,}2 = 0.$$

Решая систему, найдём $Q = 173{,}2$ кН, $X_A = -86{,}6$ кН, $Y_A = 150{,}01$ кН.

Задача 8. Рама *ACE* (рис. 1.25, *a*) в точке *A* закреплена на цилиндрической шарнирной опоре, а в точке *B* поддерживается вертикальным невесомым стержнем *BK*. На раму действуют: пара сил с моментом $M = 8$ кН·м, сила $\vec{F}$, равная по модулю $F = 10$ кН, приложенная в точке *D* под углом 60° к раме, и равномерно распределенная на отрезке *AB* нагрузка интенсивностью $q = 2$ кН/м. В точке *E* под прямым углом к отрезку *CE* рамы прикреплен трос, перекинутый через блок и несущий груз $P = 20$ кН.

Пренебрегая весом балки, определить реакцию шарнира *A* и реакцию стержневой опоры *BK*, если $a = 2$ м.

Решение

Рассмотрим равновесие рамы *ACE*. Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.25, *b*.

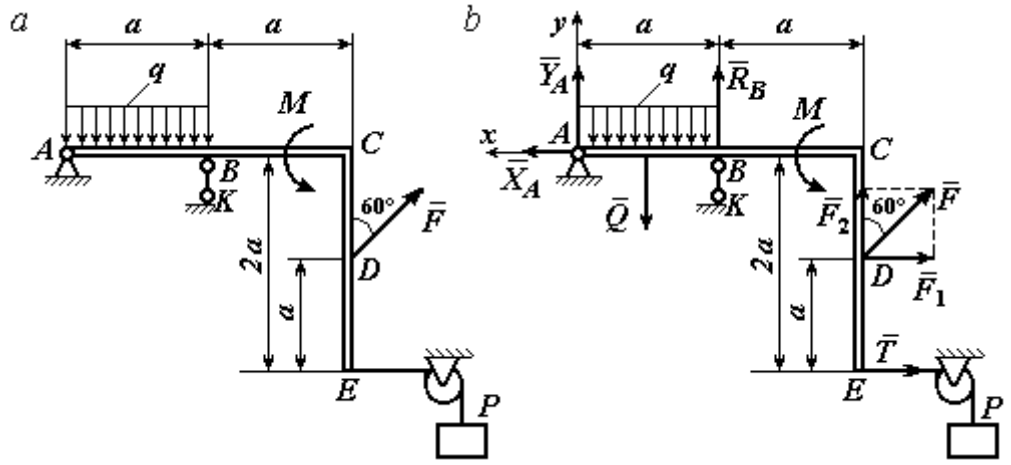


Рис. 1.25. Равновесие рамы:
a – конструкция и нагрузка рамы; *b* – внешние силы и реакции связей при равновесии рамы

Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию $\vec{R}_A$ шарнира *A* двумя ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными, соответственно, вдоль горизонтальной оси *Ax* и вертикальной *Ay*. Реакция $\vec{R}_B$ невесомой стержневой опоры *BK* приложена в точке *B* и направлена вдоль стержня *BK*. Действие груза *P* на раму изображается реакцией троса $\vec{T}$, модуль которой ра-

вен весу груза $T = P$. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ приложена в середине отрезка AB и численно равна: $Q = qa = 2 \cdot 2 = 4$ кН. На рис. 1.25, *b* показано направление внешних сил и реакций при равновесии рамы. Направление реакции стержневой опоры *BK* выбрано в предположении, что стержень сжимается.

При равновесии рамы *ACE* действующие на неё силы составляют уравновешенную произвольную плоскую систему сил ($\vec{Q}, \vec{F}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{R}_B, \vec{T}, M$) ~ 0. Условия равновесия имеют вид $\sum F_{kx} = 0$; $\sum F_{ky} = 0$; $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$. Вычисляя проекции сил на оси *Ax*, *Ay*, первые два уравнения из условий равновесия получим в виде:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ - T = 0; \quad \sum F_{ky} = Y_A - Q + R_B + F\cos 60^\circ = 0. \qquad (1.1)$$

При составлении третьего уравнения моменты сил будем вычислять относительно центра *A*. В этом случае линии действия сил $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, составляющих реакцию шарнира *A*, проходят через центр *A*, плечи сил равны нулю, и, следовательно, моменты этих сил относительно данного центра равны нулю: $M_A(\vec{X}_A) = 0$, $M_A(\vec{Y}_A) = 0$.

При определении момента силы $\vec{F}$ удобнее воспользоваться теоремой Вариньона. С этой целью представим вектор силы $\vec{F}$ как равнодействующую двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, параллельных осям *Ax* и *Ay*: $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ (см. рис. 1.25, *b*). Величины сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ определяются как проекции силы *F* на оси координат: $F_1 = F\cos 30^\circ$, $F_2 = F\cos 60^\circ$. По теореме Вариньона момент силы $\vec{F}$ относительно центра *A* равен сумме моментов сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ относительно того же центра *A*: $M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_1) + M_A(\vec{F}_2) = F_1 \cdot a + F_2 \cdot 2a$.

В результате уравнение равновесия в форме моментов имеет вид

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -Q \cdot 0{,}5a + R_B a + M + F\cos 60^\circ \cdot 2a + F\cos 30^\circ \cdot a + T2a = 0. \quad (1.2)$$

Подставляя в уравнения равновесия (1.1), (1.2) численные значения из условий задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных X_A, Y_A, R_B. Решая эту систему, найдем: X_A= 28,66 кН; Y_A= 59,66 кН; R_B = – 60,66 кН.

Отрицательное значение величины R_B означает, что фактическое направление реакции $\vec{R}_B$ стержневой опоры BK противоположно направлению, показанному на рис. 1.25, *b*, т. е. стержень BK растягивается. Реакция шарнирной опоры *A* – сила $\vec{R}_A$ – находится как геометрическая (векторная) сумма сил $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$. Величина реакции $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = \sqrt{28{,}66^2 + 59{,}66^2} = 66{,}18$ кН.

Задача 9. Прямоугольная рама *ABCED* (рис. 1.26) в точке *A* закреплена жёсткой заделкой. В точке *E* к раме прикреплена нить, составляющая угол 60º к горизонту. Другой конец нити, переброшенный через невесомый блок, несёт груз весом *P* = 15 кН. На раму действуют: пара сил с моментом M = 12 кН·м, сила $\vec{F}$, равная по модулю *F* = 10 кН, приложенная в точке *C* под углом 30° к горизонтальному участку рамы *BE*, и равномерно распределенная на отрезке *BC* нагрузка интенсивностью *q* = 2 кН/м. В точке *D* под углом 60° к горизонту на раму действует сила $\vec{G}$, численно равная 20 кН.

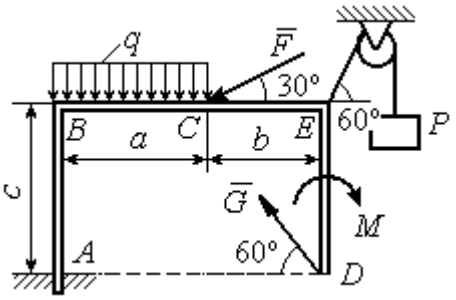


Рис. 1.26. Конструкция рамы

Пренебрегая весом рамы, определить реакцию жесткой заделки в точке *A*, если размеры рамы: *a* = 2 м, *b* = 1 м, *c* = 5 м.

Решение

Объектом равновесия является рама *ABCED.* Связями в данной конструкции являются жесткая заделка рамы в точке *A* и нить, натянутая грузом *P.* Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию жесткой заделки в точке *A* в виде силы, которую представим двумя ее составляющими $-\vec{X}_A$ и

$\vec{Y}_A$, и парой сил с моментом M_A (рис. 1.27). Реакция нити $\vec{T}$, приложенная к раме в точке *E*, направлена вдоль нити и численно равна весу груза $T = P$. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ приложена в середине отрезка *AB* и численно равна: $Q = qa = 4$ кН.

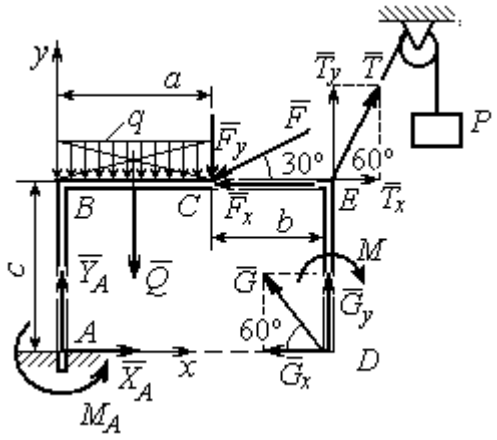


Рис. 1.27. Внешние силы и реакции связей при равновесии рамы

Действующие на раму силы составляют уравновешенную произвольную плоскую систему сил: $(\vec{Q}, \vec{F}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{G}, \vec{T}, M) \sim 0$. Условия равновесия для такой системы сил: $\sum F_{kx} = 0$; $\sum F_{ky} = 0$; $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$.

Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.27, и составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ + T\cos 60^\circ - G\cos 60^\circ = 0; \quad (3)$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - Q - F\cos 60^\circ + T\cos 30^\circ + G\cos 30^\circ = 0. \quad (4)$$

Моменты сил будем вычислять относительно центра *A*. В этом случае моменты сил $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$ равны нулю: $M_A(\vec{X}_A) = 0$; $M_A(\vec{Y}_A) = 0$.

При определении момента силы $\vec{F}$ удобно воспользоваться теоремой Вариньона. С этой целью представим вектор силы $\vec{F}$ как равнодействующую двух сил $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$, параллельных осям *Ax* и *Ay*: $\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y$ (см. рис. 1.27). Величины сил $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$ определяются как проекции силы $\vec{F}$ на оси координат: $F_x = F\cos 30^\circ$, $F_y = F\cos 60^\circ$. Плечо вектора силы $\vec{F}_x$ относительно центра *A* равно *c* (как длина перпендикуляра, проведённого из центра *A* на линию действия силы $\vec{F}_x$), плечом силы $\vec{F}_y$ является расстояние *a*. По теореме Вариньона

момент силы $\vec{F}$ относительно центра A равен алгебраической сумме моментов сил $\vec{F}_x$ и $\vec{F}_y$ относительно того же центра:

$$M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_x) + M_A(\vec{F}_y) = F_x \cdot c - F_y \cdot a = F\cos 30^\circ \cdot c - F\cos 60^\circ \cdot a .$$

Аналогично вычисляем моменты сил $\vec{G}$ и $\vec{T}$: $M_A(\vec{G}) = G\cos 30^\circ \cdot (a+b)$; $M_A(\vec{T}) = -T\cos 60^\circ \cdot c + T\cos 30^\circ \cdot (a+b)$. В результате уравнение моментов имеет вид:

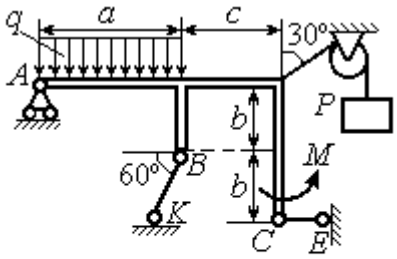
$$\sum M_A(\vec{F}_k) = F\cos 30^\circ \cdot c - F\cos 60^\circ \cdot a - T\cos 60^\circ \cdot c + T\cos 30^\circ \cdot (a+b) +$$

$$+ G\cos 30^\circ \cdot (a+b) - Q\frac{a}{2} - M + M_A = 0. \qquad (1.5)$$

Подставляя в уравнения равновесия (1.3) – (1.5) численные значения из условий задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных X_A, Y_A, M_A, откуда найдём значения реакций: X_A= 11,16 кН; Y_A= –21,31 кН; M_A = –70,73 Н·м. Знаки показывают, что составляющая $\vec{Y}_A$ силы реакции жёсткой заделки и момент реакции M_A направлены в противоположную сторону. Величина силы реакции жесткой заделки $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$ = 24,05 кН.

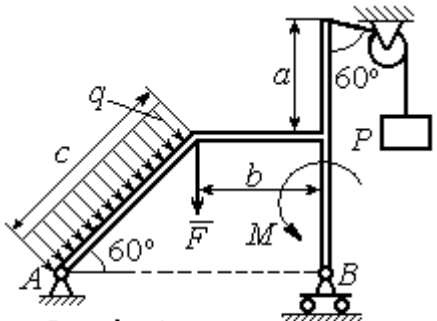
Упражнения

Упражнение 1.1



a = 3 м, b = 1 м, c = 2 м,
P = 15 кН, M = 3 кНм, q = 5 кН/м.
Найти реакцию стержней BK, CE
и реакцию шарнира A

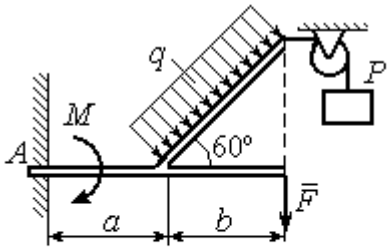
Упражнение 1.2



a = 2 м, b = 1 м, c = 3 м,
M = 3 кНм, q = 3 кН/м,
P = 2 кН, F = 4 кН.
Найти реакцию шарниров A и B

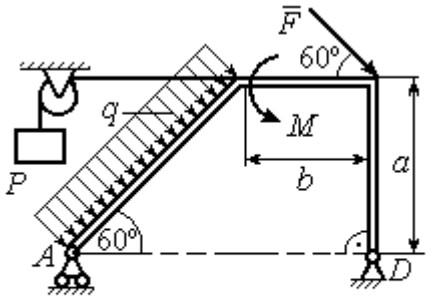
Рис. 1.28. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.1, 1.2

Упражнение 1.3



$a = 1$ м, $b = 2$ м, $F = 2$ кН,
$P = 3$кН, $M = 3$ кН·м,
$q = 2$ кН/м
Найти реакцию жесткой заделки

Упражнение 1.4



$a = 3$ м, $b = 1$ м, $P = 2$ кН, $F = 3$ кН,
$M = 3$ кН·м, $q = 2$ кН/м.
Найти реакцию шарниров A и D

Рис. 1.29. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.3, 1.4

1.4. Равновесие систем тел

Связи, соединяющие части конструкции, называются **внутренними** в отличие от **внешних** связей, скрепляющих конструкцию с внешними телами, не входящими в данную конструкцию.

Одним из способов решения задач на равновесие сил, действующих на сочленённую конструкцию, является **разбиение конструкции на отдельные тела** и составление уравнений равновесия для каждого из тел, входящих в конструкцию. В уравнения равновесия будут входить только силы, непосредственно приложенные к телу, равновесие которого рассматривается. **При этом реакции внутренних связей, приложенные к разным телам, будут попарно равны по модулю и противоположны по направлению.**

Примеры решения задач на равновесие систем тел

Задача 10. Диск весом Q = 100 кН опирается на вертикальную стенку и на наклонную балку AB. На диск действует сила $\vec{F}$, равная по величине 50 кН (рис. 1.30). Линия действия силы $\vec{F}$ проходит через центр диска под углом 30º к его вертикальному диаметру.

Однородная балка AB весом $G = 80$ кН закреплена в точке A шарнирно и удерживается под углом 60º к стене при помощи вертикального троса, один конец которого закреплён на балке в точке B, а другой – переброшен через блок и несёт груз весом P. Определить давление диска на стенку и на балку, реакцию шарнира A и вес груза P, удерживающий конструкцию в равновесии, если длина балки AB $\ell = 6$ м, радиус диска $r = 1$ м.

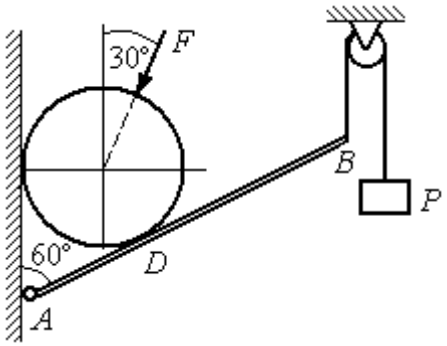


Рис. 1.30. Равновесие составной конструкции

Решение

Объект равновесия включает балку и диск и представляет собой составную конструкцию. Опора диска на балку в точке D является внутренней связью конструкции. Рассмотрим равновесие диска и балки отдельно.

Освобождаем диск от связей. На диск действует сила веса $\vec{Q}$, сила $\vec{F}$ и реакции $\vec{N}$ и $\vec{R}$ опор диска на стену в точке K и на балку в точке D (рис. 1.31). Силы, приложенные к диску, составляют плоскую систему сходящихся сил. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.31, и составим уравнения равновесия:

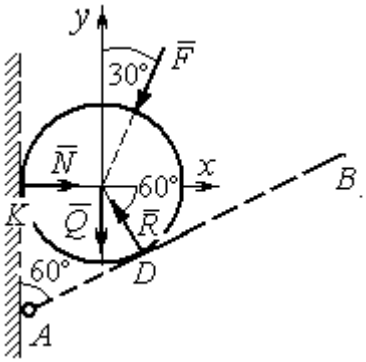


Рис. 1.31. Внешние силы и реакции связей при равновесии диска

$$\sum F_{kx} = -F\cos 60^\circ - R\cos 60^\circ + N = 0; \quad (1.6)$$

$$\sum F_{ky} = -F\cos 30^\circ + R\cos 30^\circ - Q = 0. \quad (1.7)$$

Рассмотрим равновесие балки AB (рис. 1.32).

На балку действуют сила тяжести $\vec{G}$, реакция шарнира A, (на рис. 1.32 показано её разложение на составляющие $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$), реакция нити $\vec{T}$, численно равная весу груза P, и сила $\vec{R}'$ давления диска на балку. Сила давления $\vec{R}'$ про-

тивоположна реакции $\vec{R}$ опоры диска на балку и численно равна ей. Система сил ($\vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{G}, \vec{T}, \vec{R}'$), действующих на балку, является произвольной плоской. Условия равновесия такой системы сил: $\sum F_{kx} = 0$; $\sum F_{ky} = 0$; $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$.

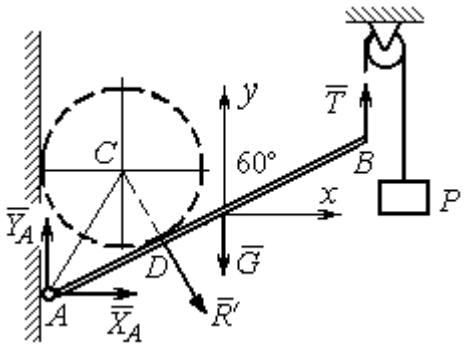


Рис. 1.32. Силы, действующие на балку, при равновесии

Выберем оси, как показано на рис. 1.32, и составим уравнения равновесия, полагая точку A центром, относительно которого производятся вычисления моментов сил:

$$\sum F_{kx} = X_A + R'\cos 60^\circ = 0, \tag{1.8}$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - R'\cos 30^\circ - G + T = 0, \tag{1.9}$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -R' \cdot AD - G \cdot \frac{\ell}{2}\cos 30^\circ + T\ell\cos 30^\circ = 0. \tag{1.10}$$

Добавив к уравнениям (1.8) – (1.10) равновесия балки AB уравнения (1.6), (1.7) равновесия диска с учётом, что $R' = R$, получим систему пяти уравнений с пятью неизвестными. Подставляя данные из условия задачи и решая совместную систему, найдём: $R = 165{,}47$ кН; $N = 107{,}74$ кН; $P = 95{,}26$ кН; $X_A = -82{,}73$ кН; $Y_A = 128{,}03$ кН.

Сила давления диска на стену равна модулю реакции опоры $\vec{N}$ и направлена в противоположную сторону, сила давления диска на балку равна $\vec{R}'$.

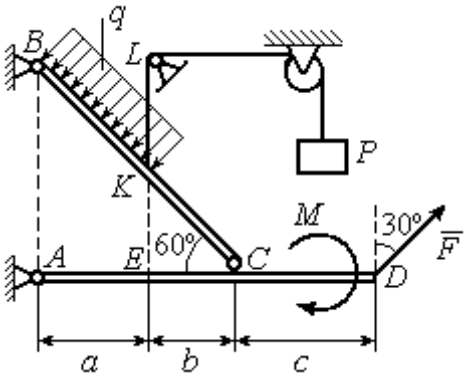


Рис.1.33. Равновесие кронштейна как сочленённой конструкции

Задача 11. Кронштейн состоит из горизонтальной балки AD, прикрепленной к вертикальной стене в точке A, и откоса BC, соединённого с балкой AD в точке C под углом 60º и прикреплённого к вертикальной стене в точке B (рис. 1.33). Все соедине-

ния шарнирные. На конструкцию действуют сила $\vec{F}$, приложенная в точке D под углом 30º к вертикали и равная по модулю F =10 кН, пара сил с моментом M = 8 кН·м и равномерно распределенная на отрезке BK нагрузка интенсивностью q = 3 кН/м. В точке K к балке BC прикреплена нить, другой конец которой, переброшенный через невесомые блоки, несёт груз весом P = 5 кН (см. рис. 1.33).

Определить реакции шарниров A, B и C, если a = 2 м, b = 1 м, c = 3 м, а на отрезке KL нить натянута вертикально.

Решение

Рассмотрим равновесие каждой из составных частей конструкции – балки BC и балки AD. Освобождаем балки от связей и заменяем их реакциями (рис. 1.34).

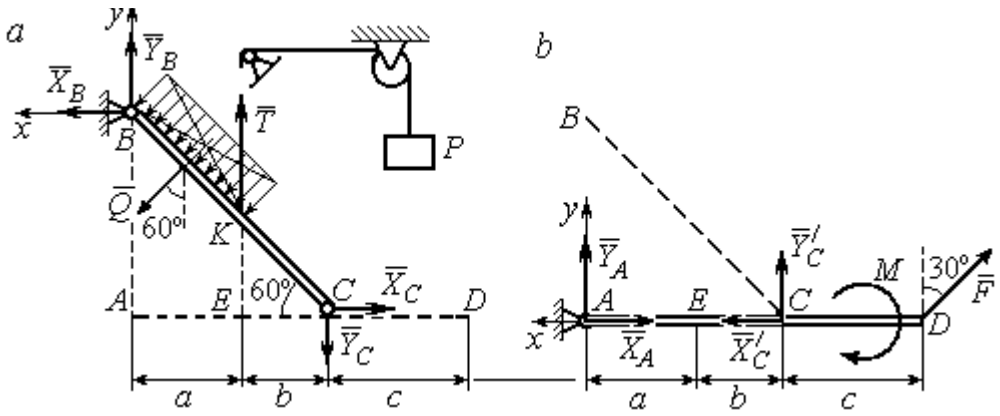


Рис. 1.34. Равновесие элементов конструкции кронштейна:
a - силы, действующие на балку *BC*; *b* - силы, действующие на балку *AD*

На рис. 1.34, *a* показаны реакции внешних и внутренних связей балки BC: реакция $\vec{R}_B$ шарнира B, реакция нити $\vec{T}$, равная по величине весу груза, $T = P$ и реакция $\vec{R}_C$ внутреннего шарнира C. Реакции шарниров B и C представлены в виде разложения на составляющие $\vec{X}_B$, $\vec{Y}_B$ и $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$. Заменяем равномерную нагрузку равнодействующей силой $\vec{Q}$, приложенной в середине отрезка BK (см. рис. 1.34, *a*) и численно равной $Q = q \cdot BK = q \cdot \dfrac{a}{\cos 60^\circ} = q \cdot 2a$.

Система сил ($\vec{Q}$, $\vec{X}_B$, $\vec{Y}_B$, $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$, $\vec{T}$), действующая на балку *BC*, является произвольной плоской уравновешенной системой сил. Выберем оси координат *xBy*, как показано на рис. 1.34, *a*, и составим уравнения равновесия. При этом моменты сил будем вычислять относительно центра *C*:

$$\sum F_{kx} = X_B + Q\cos 30^\circ - X_C = 0; \tag{1.11}$$

$$\sum F_{ky} = Y_B - Q\cos 60^\circ + T - Y_C = 0; \tag{1.12}$$

$$\sum M_C(\vec{F}_k) = X_B \cdot AB - Y_B(a+b) - Tb + Q\left(CK + \frac{1}{2}BK\right) = 0, \tag{1.13}$$

где $AB = (a+b)\mathrm{tg}60^\circ$; $CK = 2b$; $\frac{1}{2}BK = a$.

Рассмотрим равновесие балки *AD* (рис. 1.34, *b*).

На балку действует сила $\vec{F}$, реакция $\vec{R}_A$ шарнира *A* и реакция $\vec{R}'_C$ внутреннего шарнира *C*. Реакция $\vec{R}'_C$ равна по величине и противоположна по направлению реакции $\vec{R}_C$. На рис. 1.34, *b* реакция $\vec{R}_A$ представлена составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, реакция $\vec{R}'_C$ – составляющими $\vec{X}'_C$ и $\vec{Y}'_C$. При этом следует отметить: $\vec{X}'_C = -\vec{X}_C$; $\vec{Y}'_C = -\vec{Y}_C$.

Выберем оси координат *xAy* как показано на рис. 1.34, *b*, и составим уравнения равновесия балки *AD*, вычисляя моменты сил относительно центра *C*:

$$\sum F_{kx} = -X_A + X'_C - F\cos 60^\circ = 0; \tag{1.14}$$

$$\sum F_{ky} = Y_A + Y'_C + F\cos 30^\circ = 0; \tag{1.15}$$

$$\sum M_C(\vec{F}_k) = -Y_A(a+b) + F\cos 30^\circ \cdot c - M = 0. \tag{1.16}$$

Решая совместно систему уравнений (1.11) – (1.16) с учётом исходных данных задачи и равенства модулей сил $X_C = X'_C$ и $Y_C = Y'_C$, находим:

X_A = 5,99 кН, Y_A = 5,99 кН, X_C = 10,99 кН, Y_C = – 14,65 кН;

X_B = 0,6 кН, Y_B = – 13,65 кН,

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 8{,}47 \text{ кН}, \; R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 18{,}31 \text{ кН},$$

$$R_B = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2} = 13{,}65 \text{ кН}.$$

Задача 12. Вертикальная балка AB с горизонтальной перекладиной LC закреплена в точке A с помощью жесткой заделки (рис. 1.35). Наклонная балка EC с углом наклона к горизонту 60° точке C шарнирно прикреплена к горизонтальной перекладине LC балки AB, а в точке E опирается на каток установленный на горизонтальной поверхности. На конструкцию действуют равномерно распределенная на отрезках BL и DE нагрузка с одинаковой интенсивностью $q = 2$ кН/м, сила $\vec{F}$, приложенная в точке D перпендикулярно балке EC и равная по величине $F = 10$ кН, и пара сил с моментом $M = 5$ кН·м. Определить реакцию жесткой заделки A и реакции шарниров C и E, если параметр a, определяющий размеры конструкции, равен $a = 2$ м.

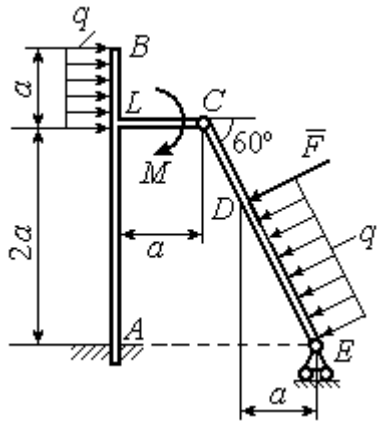


Рис. 1.35. Равновесие сочленённой конструкции

Решение

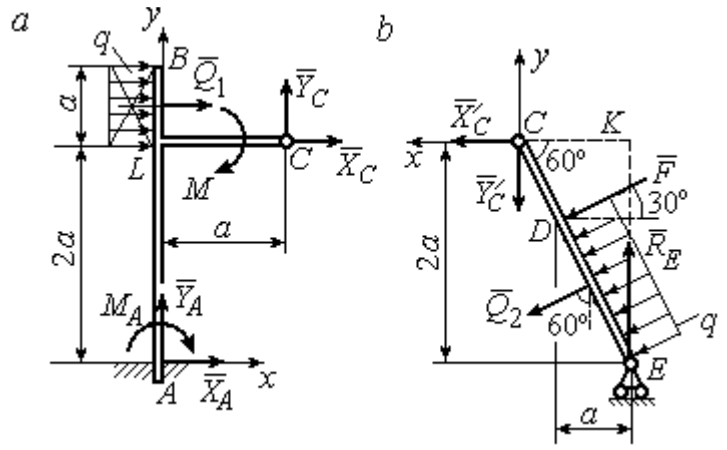


Рис. 1.36. Равновесие элементов конструкции:
a - силы и реакции связей, действующие на балку AB;
b - силы и реакции связей, действующие на балку CE

Разделим систему на две части по шарниру C и рассмотрим равновесие балок ABC и EC отдельно.

Рассмотрим балку ABC (рис. 1.36, *a*). Заменим распределенную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_1$, численно равной $Q_1 = qa = 4$ кН. На балку действует сила $\vec{Q}_1$, пара сил с моментом M и реакции связей – жёсткой заделки в точке A и шарнира C.

На рис. 1.36, *a* изображена реакция жесткой заделки в точке *A* в виде силы, разложенной на составляющие $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, и пары с моментом M_{A}. Реакция $\vec{R}_C$ шарнира *C* показана разложением на составляющие $\vec{X}_C, \vec{Y}_C$. Силы образуют произвольную плоскую систему.

Введём систему координат, как показано на рис. 1.36, *a,* и составим уравнения равновесия балки, выбрав центром вычисления моментов сил точку *A*.

Имеем систему

$$\sum F_{kx} = X_A + Q_1 + X_C = 0; \quad \sum F_{ky} = Y_A + Y_C = 0; \tag{1.17}$$

$$\sum M_A\left(\vec{F}_k\right) = -M_A - Q_1 \cdot \left(2a + \frac{a}{2}\right) - M + Y_C a - X_C 2a = 0. \tag{1.18}$$

Рассмотрим теперь равновесие балки *EC* (рис. 1.36, *b*). Заменим распределённую нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_2$, приложенной в середине отрезка *ED* и равной $Q_2 = \dfrac{qa}{\cos 60^\circ} = q \cdot 2a = 8\,\text{кН}$. На балку действуют силы $\vec{Q}_2$, $\vec{F}$, реакция $\vec{R}_E$ подвижной опоры – катка *E* и реакция $\vec{R}'_C$ шарнира *C*. На рис. 1.36, *b* реакция $\vec{R}'_C$ показана в виде разложения на составляющие $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$. При этом силы $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ направлены противоположно силам $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и равны им по модулю: $X_C = X'_C$; $Y_C = Y'_C$ (см. рис. 1.36, *a*, *b*).

Действующие на балку *EC* силы образуют уравновешенную произвольную плоскую систему сил. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.36, *b,* и составим уравнения равновесия, вычисляя моменты сил относительно центра *C*. Получим:

$$\sum F_{kx} = Q_2 \sin 60^\circ + F\cos 30^\circ + \vec{X}'_C = 0, \tag{1.19}$$

$$\sum F_{ky} = R_E - Q_2 \cos 60^\circ - F\sin 30^\circ - Y'_C = 0, \tag{1.20}$$

$$\sum M_C\left(\vec{F}_k\right) = -F \cdot \left(\frac{2a}{\cos 30^\circ} - 2a\right) - Q_2 \cdot \left(\frac{2a}{\cos 30^\circ} - a\right) + R_E \cdot 2a\,\text{tg}30^\circ = 0. \tag{1.21}$$

Подставим в совместную систему (1.17) – (1.21) исходные данные задачи и, воспользовавшись тем, что модули сил $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ равны, найдём:

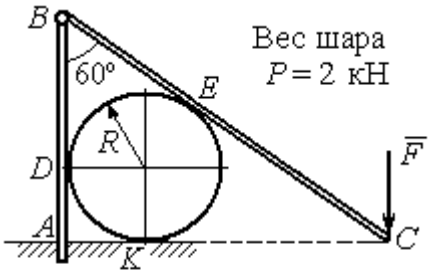
$$X_A = 11{,}59 \text{ кН}; \quad Y_A = -2{,}76 \text{ кН}; \quad M_A = 42{,}87 \text{ кН·м};$$

$$X_C = -15{,}59 \text{ кН}; \quad Y_C = 2{,}76 \text{ кН}; \quad R_E = 11{,}76 \text{ кН}.$$

Полные величины сил реакции жесткой заделки и взаимного давления в шарнире C: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 11{,}91$ кН; $R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 15{,}83$ кН.

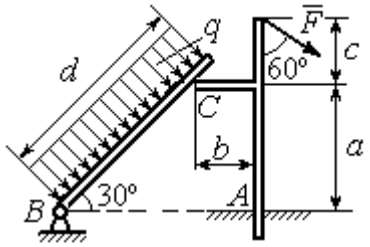
Упражнения

Упражнение 1.5



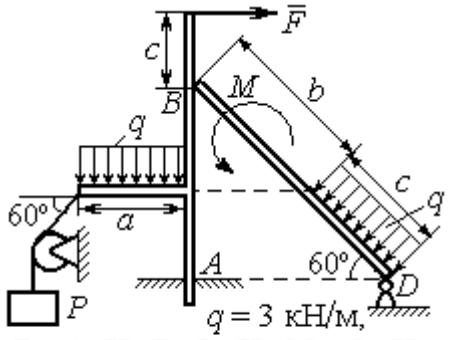
$R = 1$ м, $F = 8$ кН.
Найти реакцию жесткой заделки в точке A, реакцию шарнира B, реакцию опоры шара в точках D, K, E

Упражнение 1.6



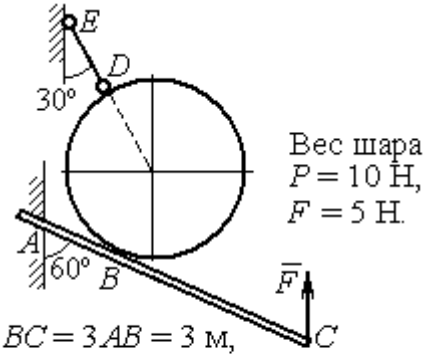
$a = 2$ м, $b = 1$ м, $c = 1$ м, $d = 5$ м,
$q = 3$ кН/м, $F = 4$ кН.
Найти реакцию жесткой заделки в точке A, реакцию шарнира B и реакцию опоры в точке C

Упражнение 1.7



$q = 3$ кН/м,
$F = 4$ кН, $P = 3$ кН, $M = 2$ кН·м,
$a = 2$м, $b = 3$м, $c = 1$м
Найти реакцию заделки A, шарнира D и реакцию опоры B

Упражнение 1.8



$BC = 3AB = 3$ м,
Найти реакцию жесткой заделки A, реакцию стержня DE и реакцию опоры в точке B

Рис. 1.37. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.5 – 1.8

1.5. Произвольная пространственная система сил

Моментом силы относительно оси называют момент вектора проекции этой силы на плоскость, перпендикулярную оси, относительно точки пересечения оси с плоскостью. На рис. 1.38 показано вычисление момента силы $\vec{F}$ относительно оси z:

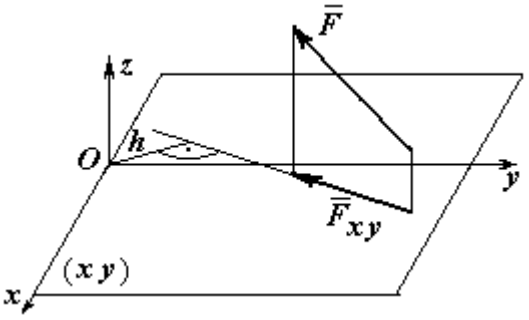


Рис. 1.38. Момент силы относительно оси

$$M_z(\vec{F}) = M_O(\vec{F}_{xy}) = F_{xy}h,$$

где O – точка пересечения оси z с плоскостью xy, перпендикулярной оси z; $\vec{F}_{xy}$ – вектор проекции силы $\vec{F}$ на плоскость xy; h – плечо силы $\vec{F}_{xy}$ относительно центра O. Момент силы относительно оси считается положительным, если при взгляде с положительного направления оси он создаёт вращение против хода часовой стрелки.

Равновесие пространственной системы сил. Для равновесия пространственной системы сил необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на оси прямоугольной системы координат x, y, z были равны нулю и суммы моментов всех сил относительно тех же осей также были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0;\ \sum F_{ky} = 0;\ \sum F_{kz} = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0;\quad \sum M_y(\vec{F}_k) = 0;\quad \sum M_z(\vec{F}_k) = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky}, F_{kz} – проекции всех сил на координатные оси; $M_x(\vec{F}_k)$, $M_y(\vec{F}_k)$, $M_z(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно выбранных осей, $k = 1, 2, ...$

Примеры решения задач на равновесие пространственных систем сил

Задача 13. Горизонтальный вал (рис. 1.39) закреплен в подпятнике C и подшипнике K. Вал имеет шкив B радиуса R и шкив D радиуса r.

Оба шкива перпендикулярны оси вала. Рукоять *AE* параллельна оси *Cx*.

Нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива *D* по касательной в точке *L* параллельно плоскости *zCx*, так что радиус шкива *D*, проведённый в точку схода нити, составляет с вертикальным диаметром угол 30º.

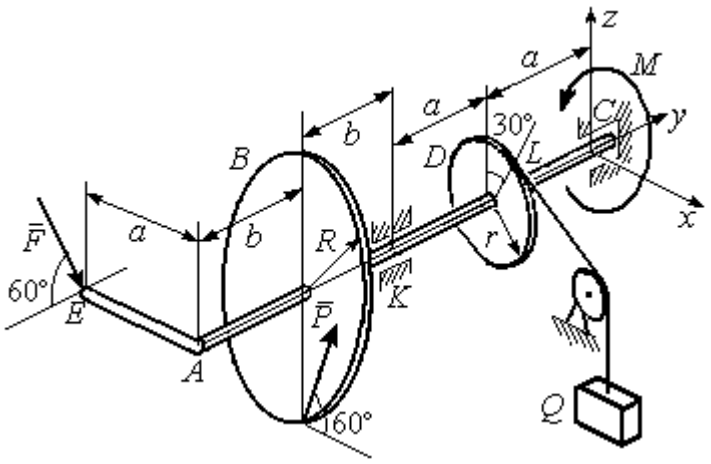


Рис. 1 39. Равновесие вала

На вал действуют силы: $\vec{F}$, $\vec{P}$ и пара сил с моментом *M*. Сила $\vec{F}$ находится в плоскости, параллельной *zCy*, и составляет угол 60° с направлением оси *Cy*. Сила $\vec{P}$ приложена в нижней точке шкива *B*, параллельна плоскости *zCx* и составляет угол 60° с направлением оси *Cx*. Определить вес удерживаемого груза Q и реакции подшипника и подпятника, если $P = 4$ кН; $F = 2$ кН; $M = 3$ кН·м; $R = 0{,}6$ м; $r = 0{,}3$ м; $a = 0{,}8$ м; $b = 0{,}4$ м.

Решение

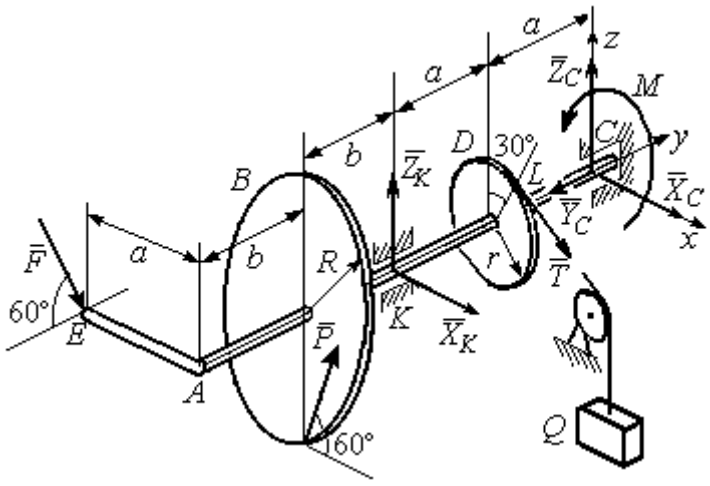


Рис. 1.40. Активные силы и реакции связей, действующие на вал, при его равновесии

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют активные силы $\vec{F}$, $\vec{P}$, пара с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом Q, подпятник *C* и подшипник *K*. Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию $\vec{R}_C$ подпятника *C* раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$, $\vec{Z}_C$, направленные вдоль координатных осей (рис. 1.40). Реакция $\vec{R}_K$ подшипника *K* лежит в плоскости, пер-

пендикулярной оси вала, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_K, \vec{Z}_K$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити от точки *L* и по модулю равна весу груза *Q*.

Активные силы и реакции связей составляют произвольную пространственную уравновешенную систему сил. При составлении уравнений равновесия изобразим вал вместе с действующими на него силами в проекциях на координатные плоскости (рис. 1.41).

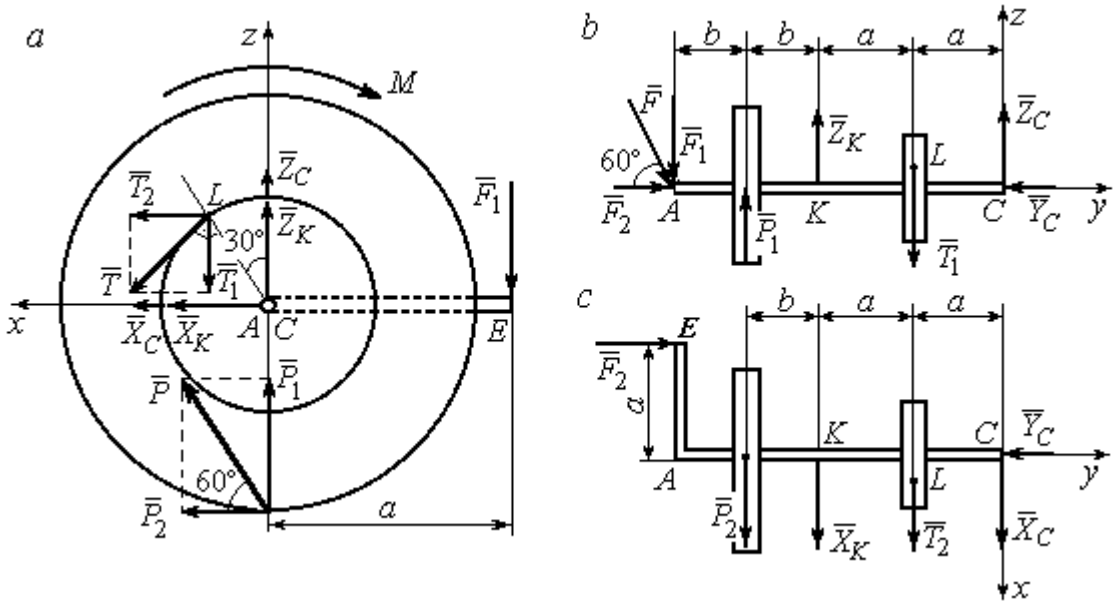


Рис. 1.41. Вал и действующие на него силы в проекциях на координатные плоскости:
a – вид вала в проекции на плоскость *zCx* с положительного конца оси *y*;
b – вид вала в проекции на плоскость *zCy* с положительного конца оси *x*;
c – вид вала в проекции на плоскость *xCy* с положительного конца оси *z*

На рис. 1.41, *a* показаны проекции вала и всех сил на плоскость *zCx*. Вычисляя моменты проекций сил относительно точки *C*, получим значения моментов этих сил относительно оси *y*. При вычислении моментов сил относительно оси *x* достаточно вычислить моменты проекций сил на плоскость *zCy* относительно точки *C* (рис. 1.41, *b*), а вычисляя моменты проекций сил на

плоскость *xCy* относительно точки *C*, получим значения моментов сил относительно оси *z* (рис. 1.41, *c*).

Величины проекций сил определяются равенствами: $P_1 = P\cos 30^\circ$;

$P_2 = P\cos 60^\circ$; $T_1 = T\cos 60^\circ$; $T_2 = T\cos 30^\circ$; $F_1 = F\cos 30^\circ$; $F_2 = F\cos 60^\circ$.

Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = P\cos 60^\circ + X_K + T\cos 30^\circ + X_C = 0; \quad \sum F_{ky} = F\cos 60^\circ - Y_C = 0;$$

$$\sum F_{kz} = P\cos 30^\circ + Z_K - T\cos 60^\circ + Z_C - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = T\cos 60^\circ \cdot a - Z_K \cdot 2a - P\cos 30^\circ \cdot (2a + b) +$$

$$+ F\cos 30^\circ \cdot (2a + 2b) = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -F\cos 30^\circ \cdot a - P\cos 60^\circ \cdot R + T \cdot r - M = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = T\cos 30^\circ \cdot a + X_K \cdot 2a + P\cos 60^\circ \cdot (2a + b) - F\cos 60^\circ \cdot a = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, получим систему шести уравнений с шестью неизвестными, решая которую, найдём:

$$X_C = -8{,}09 \text{ кН}, \; Y_C = 1 \text{ кН}, \; Z_C = 4{,}65 \text{ кН}, \; Z_K = 2{,}92 \text{ кН};$$

$$X_K = -10{,}02 \text{ кН}, \; T = 18{,}6 \text{ кН}.$$

Реакции подпятника и подшипника:

$$R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2} = 9{,}4 \text{ кН}, \; R_K = \sqrt{X_K^2 + Z_K^2} = 10{,}44 \text{ кН}.$$

Вес удерживаемого груза *Q* равен реакции нити *T*.

Задача 14. Однородная прямоугольная плита (рис. 1.42) веса 25 кН прикреплена к полу при помощи шарового шарнира *A*, подшипника *B* и удерживается в вертикальном положении стержнем *CO*, лежащим в плоскости, перпендикулярной плоскости плиты так, что $\angle COB = 60^\circ$. В плоскости плиты на неё действуют пара сил с моментом $M = 6$ кН·м, сила $\vec{F}_1$, равная $F_1 = 10$ кН, приложенная на верхней стороне плиты в точке *H* под углом 30º к линии *EC*, и сила $\vec{F}_2$, равная $F_2 = 5$ кН, приложенная в точке *D* параллельно стороне *AB*.

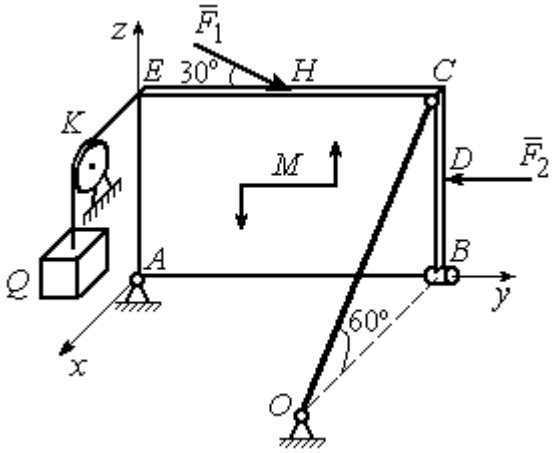


Рис. 1.42. Равновесие плиты

В точке E к плите прикреплён трос, на другом конце которого, перекинутым через блок K, подвешен груз весом $Q = 20$ кН. Отрезок троса EK перпендикулярен плоскости плиты.

Определить реакции шарнира A, подшипника B и реакцию стержня CO, если ширина плиты $AB = 3$ м; высота $AE = 2$ м; $EH = HC$, $CD = DB$.

Решение

Рассмотрим равновесие плиты $ABCE$. На плиту действуют активные силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, сила тяжести плиты $\vec{P}$, пара сил с моментом M и реакции связей. Связями являются пространственный шарнир A, нить, натянутая грузом Q, подшипник B и невесомый стержень CO.

Выберем систему координат, как показано на рис. 1.43. Освобождаем плиту от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию $\vec{R}_A$ шарнира A раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$, направленные вдоль координатных осей. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити параллельно оси Ax и равна весу груза $T = Q$, реакция $\vec{R}_B$ подшипника B расположена в плоскости, перпендикулярной оси Ay, и представлена в виде двух своих составляющих $\vec{X}_B$, $\vec{Z}_B$, реакция $\vec{S}$ невесомого стержня CO направлена вдоль стержня. Направления активных сил и реакций связей показаны на рис. 1.43.

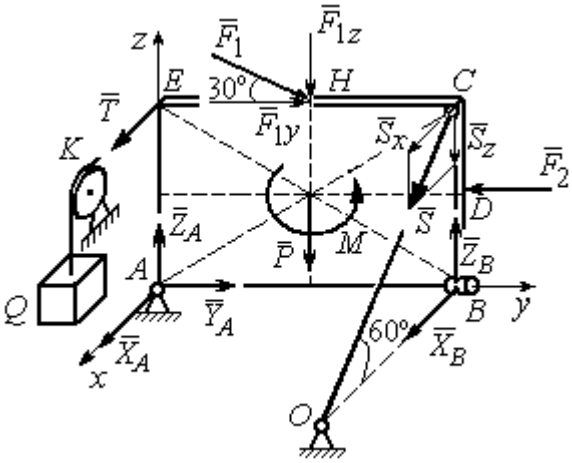


Рис. 1.43. Силы, действующие на плиту, при её равновесии

Силы, действующие на плиту, и реакции связей составляют пространственную уравновешенную систему сил. Составим уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = X_A + T + X_B + S\cos 60^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - F_2 + F_1\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kz} = Z_A - F_1\cos 60^\circ - P + Z_B - S\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = -F_1\cos 60^\circ \cdot 0{,}5 \cdot AB - F_1\cos 30^\circ \cdot AE - P \cdot 0{,}5 \cdot AB +$$

$$+ F_2 \cdot BD + Z_B \cdot AB - S\cos 30^\circ \cdot AB + M = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = T \cdot AE + S\cos 60^\circ \cdot CB = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = -X_B \cdot AB + S\cos 60^\circ \cdot EC = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, получим систему уравнений, решая которую, найдём значения реакций: $S = -40$ кН; $X_B = -20$ кН; $Z_B = -17{,}53$ кН; $X_A = 20$ кН; $Y_A = -3,66$ кН; $Z_A = 12{,}89$ кН.

Задача 15. Прямоугольная фрамуга *ACEB* весом $P = 50$ Н, закрепленная в точках *A* и *B* цилиндрическими шарнирами, открыта на угол 60º (рис. 1.44). На фрамуге в точке *H* закреплена верёвка, другой конец которой, переброшенный через невесомый блок *K*, несёт груз *Q*. При этом линия верёвки *HK* параллельна прямой *ED*. На фрамугу действует сила $\vec{F}$, приложенная в верхнем углу в точке *C* перпендикулярно плоскости фрамуги и равная по величине $F = 15$ Н.

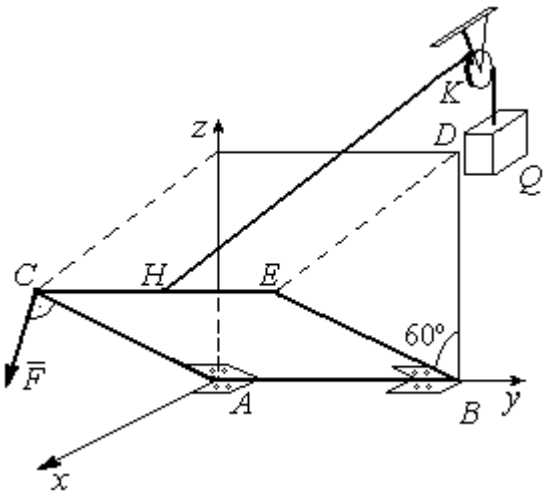


Рис. 1.44. Равновесие фрамуги

Определить вес груза *Q*, необходимый для удержания фрамуги в равновесии и реакции цилиндрических шарниров *A* и *B*, если размеры фрамуги $BE = BD = 2$ м; $AB = 3$ м; $CH = HE$.

Решение

Рассмотрим равновесие фрамуги *ABCE*. Изображаем внешние активные силы: силу $\vec{F}$, силу тяжести фрамуги $\vec{P}$, а также реакции связей. Связями являются два цилиндрических шарнира *A* и *B* (связь, аналогичная подшипнику) и нить, натянутая грузом *Q*. Выберем систему координат *Axyz*, как показано на рис. 1.45. Освобождаем фрамугу от связей, заменяя их действие реакциями. Реакции $\vec{R}_A$ и $\vec{R}_B$ шарниров *A* и *B* раскладываем на взаимно перпендикулярные составляющие: $\vec{X}_A$, $\vec{Z}_A$ и $\vec{X}_B$, $\vec{Z}_B$ в плоскостях, перпендикулярных оси вращения фрамуги (ось *Ay*), реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити и равна весу груза $T = Q$. Направления активных сил и реакций связей показаны на рис. 1.45.

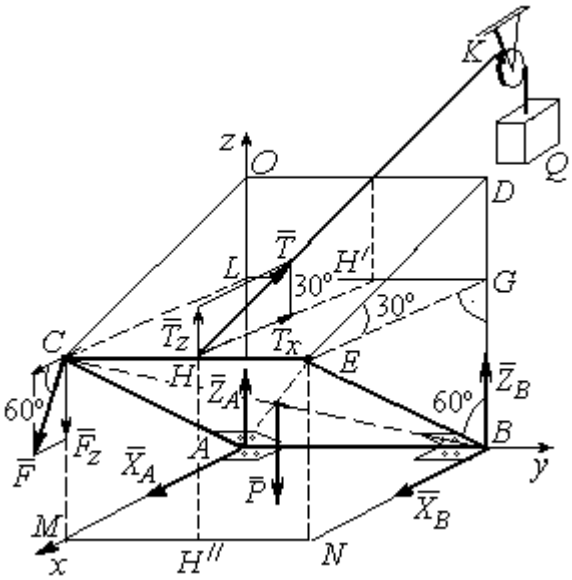


Рис. 1.45. Активные силы и реакции при равновесии фрамуги

Силы, действующие на фрамугу, составляют уравновешенную пространственную систему сил.

Составим уравнения равновесия. При этом для удобства вычисления моментов сил относительно осей изобразим плоскости, перпендикулярные этим осям, с проекциями на них сил, действующих на фрамугу (рис. 1.46). Тогда моменты сил, действующих на фрамугу, например, относительно оси *Ax* определяются как моменты векторов проекций этих сил на плоскость *zAy* относительно точки *A* – пересечения оси *Ax* и перпендикулярной ей плоскости *zAy* (см. рис. 1.46, *a*). Аналогично при вычислении моментов сил относительно оси *Az* достаточно вычислить моменты векторов проекций сил на плоскость *xAy* относительно точки *A* (см. рис. 1.46, *b*).

Значения моментов сил относительно оси Ay получим, вычисляя моменты векторов проекций сил на плоскость zAx относительно точки A (см. рис. 1.46, *c*).

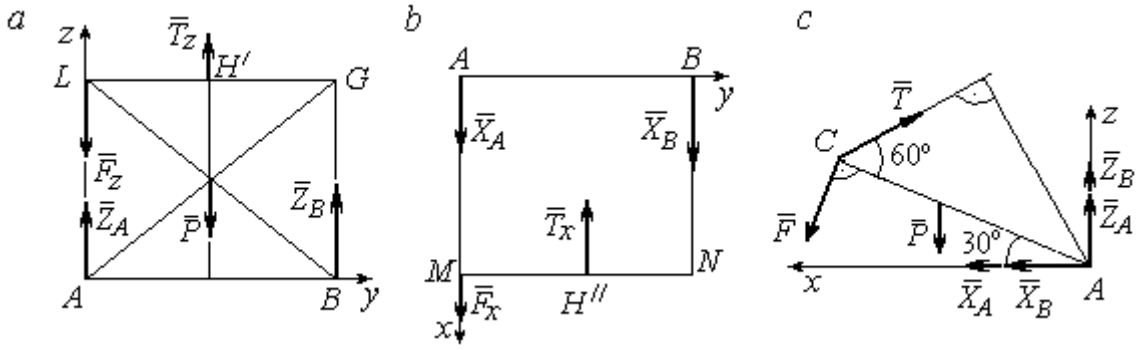


Рис. 1.46. Фрамуга и действующие на неё силы в проекциях на координатные плоскости:
a – проекция на плоскость *zAy* со стороны положительного направления оси *x*; *b* – проекция на плоскость *xAy* со стороны положительного направления оси *z*; *c* – проекция на плоскость *zAx* со стороны положительного направления оси *y*

Уравнения равновесия фрамуги имеют вид:

$$X_A + X_B + F\cos 60^\circ - T\cos 30^\circ = 0;$$

$$Z_A + Z_B - P - F\cos 30^\circ + T\cos 60^\circ = 0;$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = T_z \cdot 0{,}5 \cdot AB - P \cdot 0{,}5 \cdot AB + Z_B \cdot AB =$$

$$= T\cos 60^\circ \cdot 0{,}5 \cdot AB - P \cdot 0{,}5 \cdot AB + Z_B \cdot AB = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = P \cdot 0{,}5 \cdot AC\cos 30^\circ + F \cdot AC - T \cdot AC\sin 60^\circ = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = -X_B \cdot AB + T_x \cdot 0{,}5 \cdot AB = -X_B \cdot AB + T\cos 30^\circ \cdot 0{,}5 \cdot AB = 0.$$

Подставляя исходные данные из условия задачи и решая систему, найдём реакции шарниров фрамуги:

$$X_B = 18{,}22 \text{ Н},\ Z_B = 14{,}41 \text{ Н},\ R_B = \sqrt{X_B^2 + Z_B^2} = 23{,}31 \text{ Н};$$

$$X_A = 10{,}83 \text{ Н},\ Z_A = 27{,}41 \text{ Н},\ R_A = \sqrt{X_A^2 + Z_A^2} = 29{,}47 \text{ Н}.$$

Вес груза, удерживающий фрамугу в равновесии, численно равен реакции верёвки: $Q = T = 42{,}37$ Н.

Задача 16. Горизонтальный коленчатый вал *AD* (рис. 1.47) закреплен в подпятнике *A* и подшипнике *C*. Вал имеет шкив радиуса r и рукоять *DH*, перпендикулярные оси вала. Рукоять *DH* образует угол 30º к направлению оси *Ax*. Колено вала расположено в горизонтальной плоскости *xAy*. Нить, удерживающая груз *Q*, намотана на шкив и сходит с него вертикально вниз. На вал действуют силы $\vec{F}$, $\vec{P}$, $\vec{G}$ и пара сил с моментом *M*. Сила $\vec{F}$ приложена в верхней точке вертикального диаметра шкива под углом 30° к направлению оси *Ay* и находится в плоскости *zAy*. Сила $\vec{P}$ приложена в нижней точке *H* рукояти параллельно оси *Az*. Сила $\vec{G}$ приложена в крайней точке *K* стойки колена вала под углом 60º к стойке и находится в плоскости, перпендикулярной оси вала. Пара сил с моментом *M* создаёт вращение вала вокруг оси *Ay*.

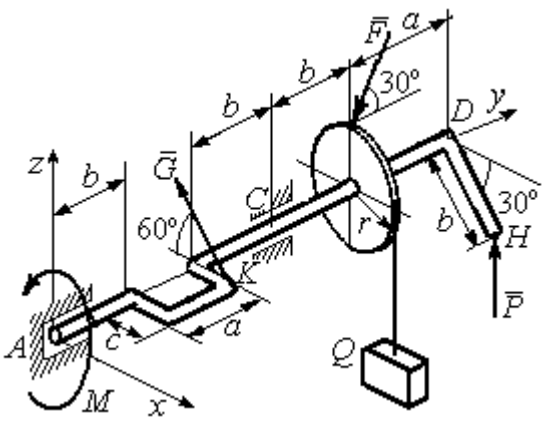


Рис. 1.47. Равновесие вала

Определить вес удерживаемого груза Q и реакции подшипника и подпятника, если: $P = 10$ кН; $F = 12$ кН; $G = 6$ кН; $M = 3$ кН·м; $r = 0{,}3$ м; $a = 0{,}8$ м; $b = 0{,}4$ м; $c = 0{,}2$ м.

Решение

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют активные силы – $\vec{F}$, $\vec{P}$, $\vec{G}$, пара сил с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом Q, подпятник *A* и подшипник *C*.

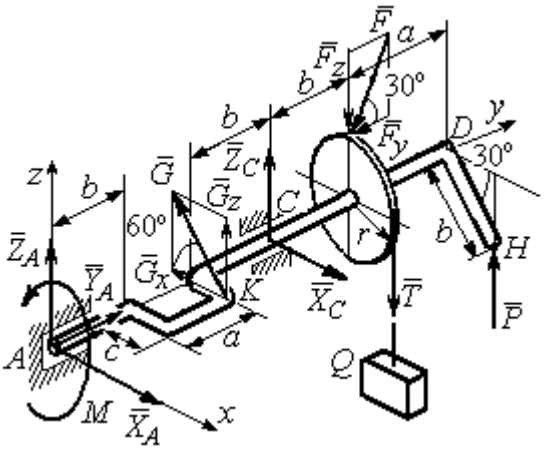


Рис. 1.48. Силы и реакции, действующие на вал при равновесии

Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями.

Реакцию подпятника A раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$, направленные вдоль координатных осей. Реакция подшипника C лежит в плоскости, перпендикулярной оси вала, и также может быть разложена на составляющие $\vec{X}_C, \vec{Z}_C$, направленные вдоль координатных осей Ax, Az. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити и по модулю равна весу груза, $T = Q$. Действие на вал активных сил и реакций связи показано на рис. 1.48.

Указанные силы составляют произвольную пространственную уравновешенную систему сил.

Составим уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = X_A - G\cos 60^\circ + X_C = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_A - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{kz} = Z_A + G\cos 30^\circ + Z_C - F\cos 60^\circ - T + P = 0.$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = G_z(b+a) + Z_C(b+a+b) - F_z(b+a+b+b) + F_y r -$$

$$- T(b+a+b+b) + P(b+a+b+b+a) = 0;$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -G_z c + Tr - Pb\cos 30^\circ - M = 0;$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = G_x(b+a) - X_C(b+a+b) = 0,$$

где значения проекций сил на оси $G_z = G\cos 30^\circ$; $G_x = G\cos 60^\circ$; $F_z = F\cos 60^\circ$; $F_y = F\cos 30^\circ$.

Подставляя исходные данные и решая систему, получим значения реакций:

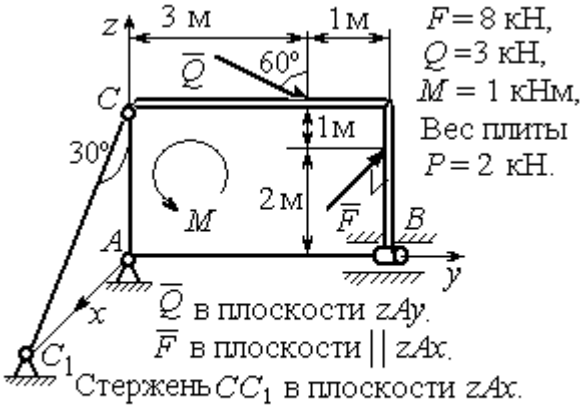
$$X_C = 2{,}25 \text{ кН}; \; Z_C = 13{,}57 \text{ кН}; \; R_C = \sqrt{X_C^2 + Z_C^2} = 15{,}58 \text{ кН};$$

$$Z_A = 0{,}39 \text{ кН}; \; Y_A = 10{,}39 \text{ кН}; \; X_A = 0{,}75 \text{ кН}; \; R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2} = 10{,}42 \text{ кН}.$$

Вес удерживаемого груза равен реакции нити $Q = T = 25{,}03$ кН.

Упражнения

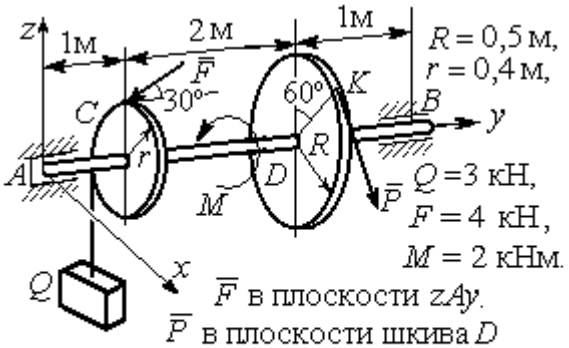
Упражнение 1.9



$F = 8$ кН,
$Q = 3$ кН,
$M = 1$ кНм,
Вес плиты
$P = 2$ кН.

$\overline{Q}$ в плоскости zAy.
$\overline{F}$ в плоскости $\|$ zAx.
Стержень CC_1 в плоскости zAx.
Найти реакцию шарнира A, реакцию подшипника B и реакцию стержня CC_1

Упражнение 1.10



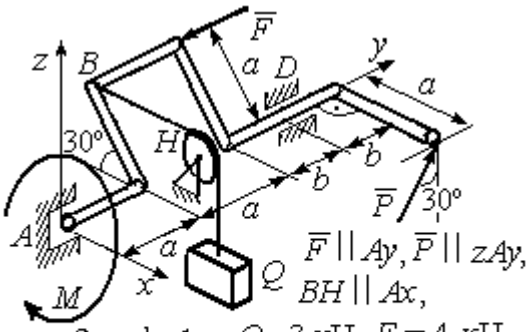
$R = 0{,}5$ м,
$r = 0{,}4$ м,
$Q = 3$ кН,
$F = 4$ кН,
$M = 2$ кНм.

$\overline{F}$ в плоскости zAy.
$\overline{P}$ в плоскости шкива D
и направлена по касательной в точке K.
Найти реакцию подпятника A, подшипника B и уравновешивающую силу P

Упражнение 1.11

$\overline{P}$ направлена по касат. к шкиву в точке K.
$\overline{F}$ в плос-ти zAy.
Нить сходит со шкива $\|$ оси Ay.
$a = 1$ м, $b = 2$ м,
$R = 0{,}5$ м, $r = 0{,}4$ м,
$Q = 3$ кН, $F = 4$ кН,
$M = 2$ кН·м.
Найти реакцию Q подпятника A, подшипника B и уравновешивающую силу P

Упражнение 1.12



$\overline{F} \| Ay$, $\overline{P} \| zAy$,
$BH \| Ax$,
$a = 2$м, $b = 1$м, $Q = 3$ кН, $F = 4$ кН,
$M = 2$ кН·м. Найти реакцию подпятника A, подшипника D и уравновешивающую силу P

Рис. 1.49. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 1.9 – 1.12

1.6. Равновесие тел при наличии сил трения

Трение скольжения. При наличии трения скольжения полная реакция $\vec{R}$ шероховатой опоры раскладывается на нормальную составляющую $\vec{N}$ опоры и

силу $\vec{F}_{\text{тр с}}$ трения скольжения, направленную по касательной к поверхности в точке опоры.

В покое сила трения скольжения может принимать любые значения от нуля до некоторого предельного значения $F_{\text{тр с}}$, называемого **предельной силой трения скольжения** (рис. 1.50).

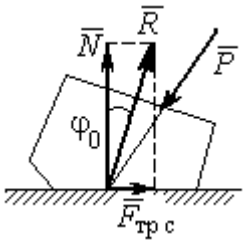


Рис. 1.50. Реакция опоры с трением скольжения

Наибольший угол φ_0, который полная реакция шероховатой поверхности образует с нормалью к поверхности, называется **предельным углом трения**. Предельная сила трения численно равна произведению коэффициента трения на величину нормальной реакции опоры тела на поверхность: $F_{\text{тр с}} = f \cdot N$, где f – безразмерный коэффициент трения, определяемый экспериментально.

Изучение равновесия тел с учетом сил трения сводится к рассмотрению предельного равновесия, когда сила трения принимает предельное значение.

Трением качения называется сопротивление, возникающее при качении одного тела по шероховатой поверхности другого. Реакция шероховатой опоры раскладывается на нормальную составляющую $\vec{N}$ и силу трения качения $\vec{F}_{\text{тр к}}$, направленную по касательной к поверхности качения. При этом за счёт небольшого вдавливания в поверхность качения нормальная реакция опоры $\vec{N}$ смещена в сторону от линии действия силы тяжести $\vec{P}$ так, что вместе с ней образует пару, противодействующую качению (рис. 1.51). В предельном положении равновесия тела смещение нормальной реакции опоры максимально. Величина максимального смещения k называется **коэффициентом трения качения**, измеряемого в единицах длины. Момент,

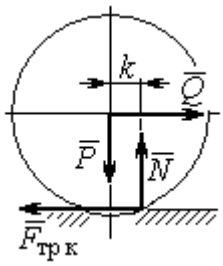


Рис. 1.51. Реакция опоры с трением качения

создаваемый парой $(\vec{N}, \vec{P})$, называется **моментом трения качения** $M_{\text{тр к}} = kN$. Максимальная сила трения качения $\vec{F}_{\text{тр к}}$ определяется из условия, что в предельном положении равновесия момент трения качения равен моменту качения, создаваемого парой $(\vec{F}_{\text{тр к}}, \vec{Q})$ (рис. 1.51).

Если максимальная сила трения качения меньше предельной силы трения скольжения, движение представляет качение без скольжения.

Примеры решения задач на равновесие тел с трением

Задача 17. Груз Q весом 50 Н удерживается нитью на шероховатой наклонной плоскости (рис.1.52). Один конец нити закреплен на грузе Q, а к другому, перекинутому через невесомый блок, подвешен груз весом P. Отрезок нити AB горизонтальный. Угол наклона плоскости составляет 30º к горизонту. Определить максимальное и минимальное значения веса груза P, при которых груз Q может начать скольжение по плоскости без опрокидывания, если коэффициент трения скольжения между грузом Q и наклонной плоскостью $f = 0{,}4$.

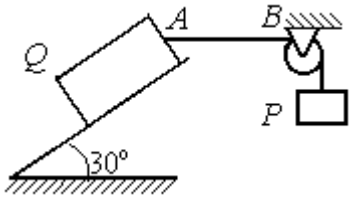


Рис.1.52. Равновесие груза на наклонной плоскости с трением

Решение

Рассмотрим равновесие груза Q при минимальном значении веса груза P. На груз действуют сила тяжести $\vec{Q}$, реакция нити $\vec{T}_{\min}$ и реакция шероховатой поверхности наклонной плоскости, состоящая из нормальной реакции наклонной плоскости $\vec{N}$ и силы трения $\vec{F}_{\text{тр1}}$ (рис. 1.53, *а*). Особенностью задач на равновесие призм является то, что точка приложения нормальной реакции не определена. В случае необходимости она находится из уравнений равновесия.

Определим направление силы трения. Если вес уравновешивающего груза P имеет минимальное значение $P_{\min}$, то при его дальнейшем уменьшении груз Q начнёт двигаться вниз по наклонной плоскости. Таким образом, предельная сила трения $\vec{F}_{\text{тр}1}$, обеспечивающая равновесие при минимальном значении веса груза P, направлена вверх по наклонной плоскости (см. рис. 1.53, *a*).

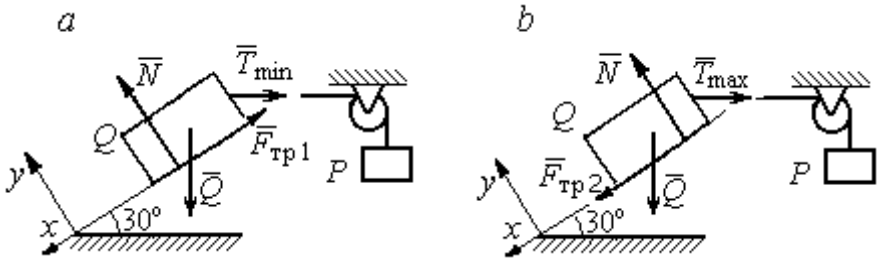


Рис. 1.53. Силы, действующие на груз при равновесии:
a – минимальный вес уравновешивающего груза;
b – максимальный вес уравновешивающего груза

Выберем систему координат, как показано на рис. 1.53, и составим уравнения равновесия в виде проекций сил:

$$\sum F_{kx} = Q\cos 60^\circ - T_{\min}\cos 30^\circ - F_{\text{тр}} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = -Q\cos 30^\circ + N - T_{\min}\cos 60^\circ = 0.$$

Полагая в первом уравнении $F_{\text{тр}1} = fN$, решаем систему и находим реакцию нити $T_{\min} = 7{,}21$ Н. Минимальное значение веса уравновешивающего груза равно реакции нити: $P_{\min} = T_{\min} = 7{,}21$ Н.

Рассмотрим равновесие груза Q при максимальном $P_{\max}$ значении веса груза P. На груз действует сила тяжести $\vec{Q}$, реакция нити $\vec{T}_{\max}$ и реакция шероховатой поверхности наклонной плоскости, состоящая, как и в первом случае, из нормальной реакции наклонной плоскости $\vec{N}$ и силы трения $\vec{F}_{\text{тр}2}$ (см. рис. 1.53, *b*).

При определении направления силы трения заметим, что увеличение веса груза P больше максимального вызывает движение груза Q вверх по наклонной плоскости. Тогда предельная сила трения $\vec{F}_{\text{тр}2}$, действующая против возможного движения, должна быть направлена вниз по наклонной плоскости (см. рис. 1.53, *b*). Уравнения равновесия груза Q:

$$\sum F_{kx} = Q\cos 60^\circ - T_{\max}\cos 30^\circ + F_{\text{тр}2} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = -Q\cos 30^\circ + N - T_{\max}\cos 60^\circ = 0.$$

Решаем систему, подставляя вместо силы трения её значение $F_{\text{тр}2} = fN$, и находим максимальное значение веса груза P: $P_{\max} = T_{\max} = 63{,}54$ Н.

Таким образом, груз Q будет находиться в равновесии на наклонной плоскости, если вес уравновешивающего груза находится в пределах $8{,}87 < P < 48{,}87$ Н.

Задача 18. Цилиндрический каток радиуса r = 0,5 м, весом P = 50 Н удерживается в равновесии на наклонной плоскости нитью, один конец которой закреплён в центре катка, а другой перекинут через блок и несёт груз весом Q (рис. 1.54). Коэффициент трения качения катка $f_{\text{к}}$ = 0,02 м. Наклонная плоскость составляет угол 30º с горизонтом.

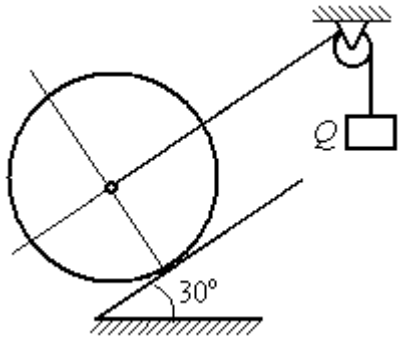


Рис. 1.54. Равновесие катка

Определить наименьшую и наибольшую величину веса Q, при которых каток будет в равновесии. Найти наименьшее значение коэффициента трения скольжения $f_{\text{с}}$, при котором в случае движения каток будет катиться без скольжения.

Решение

Рассмотрим равновесие катка при минимальном значении веса груза Q. На каток действует сила тяжести $\vec{P}$, реакции нити $\vec{Q}_{\min}$ и реакция шероховатой

поверхности наклонной плоскости $\vec{R}$, имеющая своими составляющими нормальную реакцию поверхности $\vec{N}$ и силу трения качения $\vec{F}_{\text{тр1к}}$ (рис. 1.55, *a*).

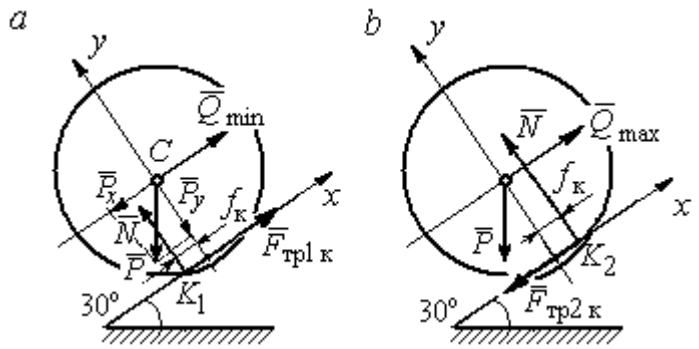


Рис. 1.55. Силы, действующие на каток, при равновесии:
a – минимальный вес груза; *b* – максимальный вес груза

Минимальный вес груза $Q_{\min}$ удерживает каток от качения вниз по наклонной плоскости. В этом случае составляющие реакции шероховатой поверхности наклонной плоскости приложены в точке K_1, слева от нормального к плоскости диаметра катка (см. рис. 1.55, *a*). Выбор точки приложения реакции шероховатой поверхности основан на том, что пара $(\vec{N}, \vec{P}_y)$ должна создавать момент трения качения, противодействующий предполагаемому движению.

На каток действует плоская уравновешенная система сил $(\vec{Q}_{\min}, \vec{F}_{\text{тр1к}}, \vec{N}, \vec{P}) \infty 0$. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.55, *a*, и составим уравнения равновесия катка, где уравнение моментов сил составлено относительно точки K_1:

$$\sum F_{kx} = -P\cos 60^\circ + Q_{\min} + F_{\text{тр1к}} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = = -P\cos 30^\circ + N = 0;$$

$$\sum M_{K_1}(\vec{F}_k) = P\cos 60^\circ \cdot r - Q_{\min} r - P\cos 30^\circ \cdot f_к = 0.$$

Подставляем данные задачи и находим минимальное значение веса груза, при котором каток находится в равновесии $Q_{\min} = 7{,}68$ Н, величину нормальной реакции наклонной плоскости $N = 43{,}3$ Н и значение силы трения качения, удерживающей каток в равновесии, $F_{\text{тр1к}} = 17{,}32$ Н.

Рассмотрим равновесие катка при максимальном значении веса груза $Q_{\max}$. Здесь нарушение предельного равновесия при увеличении веса груза Q вызывает движение катка вверх по наклонной плоскости. В таком случае точка приложения реакции опоры шероховатой поверхности (точка K_2) расположена справа от нормального к плоскости качения диаметра катка (рис. 1.55, *b*).

На каток действует плоская уравновешенная система сил $(\vec{Q}_{\max}, \vec{F}_{\text{тр2 к}}, \vec{N}, \vec{P}) \infty 0$. Выберем систему координат, как показано на рис. 1.55, *b*. Уравнения равновесия катка, где уравнение моментов сил составлено относительно точки K_2 имеют вид:

$$\sum F_{kx} = -P\cos 60^\circ + Q_{\max} - F_{\text{тр2 к}} = 0;$$

$$\sum F_{ky} = -P\cos 30^\circ + N = 0;$$

$$\sum M_{K_2}(\vec{F}_k) = -P\cos 60^\circ \cdot r + Q_{\max} r - P\cos 30^\circ \cdot f_{\text{к}} = 0.$$

Решая систему, получим: $Q_{\max} = 42{,}32$ Н; $N = 43{,}3$ Н; $F_{\text{тр2 к}} = 17{,}32$ Н.

Таким образом, на шероховатой поверхности каток находится в равновесии, если вес уравновешивающего груза выбран в пределах $7{,}68 \le Q \le 42{,}32$ Н.

При любом движении (вверх или вниз) качение катка будет без скольжения, если предельная сила трения скольжения $F_{\text{тр с}}$ больше аналогичной силы трения качения: $F_{\text{тр с}} > F_{\text{тр к}}$. Величина силы трения скольжения не зависит от направления движения: $F_{\text{тр с}} = f_{\text{с}} N = 43{,}3 f_{\text{с}}$, где $f_{\text{с}}$ – коэффициент трения скольжения. Величина силы трения качения также не зависит от направления движения: $F_{\text{тр к}} = F_{\text{тр1 к}} = F_{\text{тр2 к}} = 17{,}32$ Н. Таким образом, для определения требуемого коэффициента скольжения имеет место неравенство $43{,}3 f > 17{,}32$, откуда $f > 0{,}4$.

Задача 19. Для подъёма и опускания грузов в выработках используется ступенчатый ворот с тормозом, изображённый на рис. 1.56. Радиусы большой и малой ступенек барабана ворота $R = 0{,}5$ м и $r = 0{,}2$ м. Ворот тормозят, надавливая на конец A рычага AB, соединённого цепью CD с концом D тормозного рычага ED с расположенной на нём тормозной колодкой. Коэффициент трения между тормозной колодкой и барабаном ворота $f = 0{,}4$. На малой ступеньке барабана ворота навита верёвка, другой конец которой, переброшенный через невесомые неподвижный блок m и подвижный блок n, удерживает груз Q весом 1 кН (см. рис. 1.56). Угол наклона к горизонту участка верёвки, соединяющей барабан с неподвижным блоком m, составляет 30º.

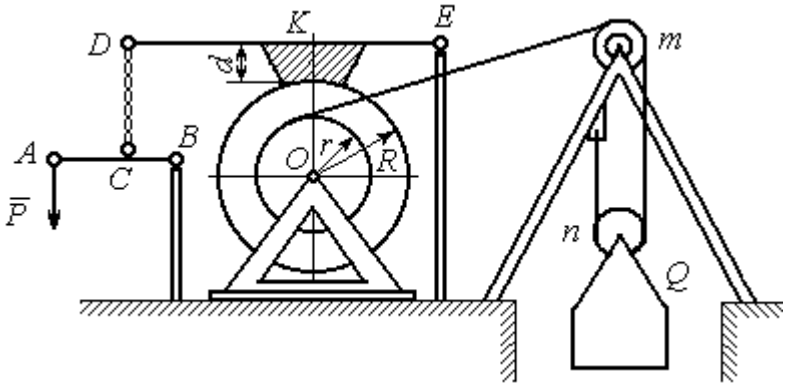


Рис. 1.56. Ворот с колодочным тормозом

Определить величину силы $\vec{P}$, уравновешивающей груз Q, и реакции шарниров O и E, если вес ворота G = 140 Н, высота тормозной колодки $d = 0{,}1$ м, расстояния AB = 1 м, BC = 0,1 м; $ED = 1{,}2$ м; $EK = 0{,}6$ м.

Решение

Рассмотрим отдельно равновесие барабана ворота, тормозного рычага DE и рычага AB (рис. 1.57).

Для того; чтобы определить силу натяжения верёвки, прикреплённой к барабану, рассмотрим равновесие груза вместе с подвижным блоком n (см. рис. 1.57, *а*). На объект равновесия действует сила тяжести груза $\vec{Q}$ и реакции $\vec{T}'$ и $\vec{T}''$ двух ветвей верёвки, огибающей снизу блок n.

Уравнения равновесия такой системы сил:

$$T' + T'' - Q = 0; \qquad T''r_{\text{бл}} = T'r_{\text{бл}},$$

где моменты сил вычислены относительно центра блока; $r_{бл}$ – радиус блока *n*. Решая систему уравнений, получим: $T' = T'' = 0{,}5Q = 500$ Н.

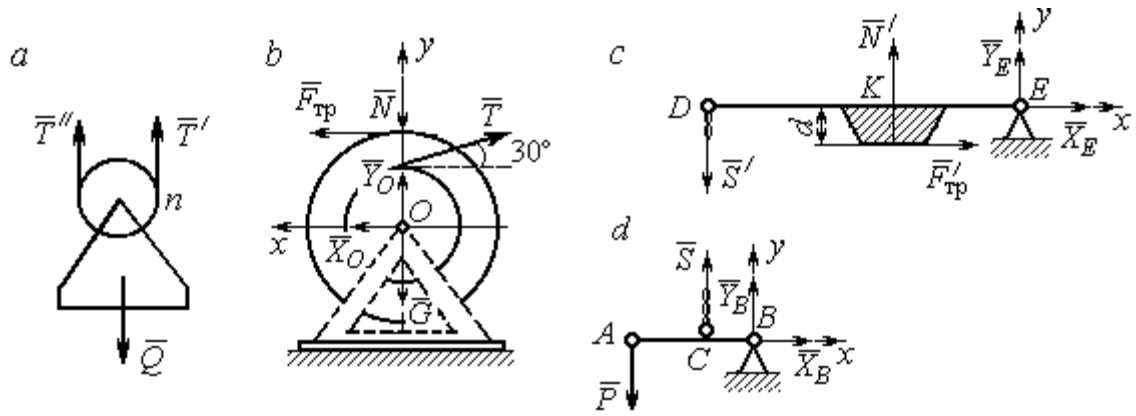


Рис. 1.57. Равновесие элементов конструкции ворота:
a – равновесие груза; *b* – силы, действующие на барабан; *c* – силы, действующие на тормозной рычаг *DE*; *d* – силы, действующие на рычаг *AB*

Рассмотрим равновесие барабана. На барабан действуют: сила веса барабана $\vec{G}$, сила давления $\vec{N}$ со стороны рычага, направленная по радиусу барабана, сила трения $\vec{F}_{тр}$, действующая по касательной к барабану в сторону, противоположную движению барабана при опускании груза, реакция $\vec{R}_O$ шарнира *O*, представленная двумя составляющими $\vec{X}_O, \vec{Y}_O$, и реакция верёвки $\vec{T}$, численно равная модулю силы $\vec{T}'$ (см. рис. 1.57, *b*).

Силы, действующие на барабан, составляют уравновешенную произвольную плоскую систему сил ($\vec{G}$, $\vec{X}_O, \vec{Y}_O$, $\vec{T}$, $\vec{N}$, $\vec{F}_{тр}$) ~ 0. Составим уравнение моментов относительно точки *O*:

$$-Tr + F_{тр}R = 0,$$ откуда с учётом $T = T'$ $F_{тр} = 200$ Н.

Величина силы $\vec{N}$ давления рычага на барабан находится из вида зависимости силы трения $F_{тр} = fN$, тогда $N = \dfrac{F_{тр}}{f} = 500$ Н.

Составим уравнения равновесия барабана в виде проекций сил на оси, выбранные, как показано на рис. 1.57, *b*:

$$\sum F_{kx} = X_O + F_{тр} - T\cos 30^\circ = 0;$$

$$\sum F_{ky} = Y_O + T\cos 60^\circ - N - G = 0.$$

Решая систему, найдём реакцию шарнира *O*:

$$X_O = 233 \text{ Н};\ Y_O = 390 \text{ Н};\ R_O = \sqrt{X_O^2 + Y_O^2} = 454{,}3 \text{ Н}.$$

Рассмотрим теперь равновесие тормозного рычага *DE* (см. рис. 1.57, *c*).

На рычаг действуют сила $\vec{N}'$ давления со стороны барабана и сила трения $\vec{F}'_{\text{тр}}$, приложенные в точке касания тормозной колодки с барабаном, равные по величине и противоположные по направлению, соответственно, силам $\vec{N}$ и $\vec{F}_{\text{тр}}$. Кроме того, в точке *D* на рычаг действует сила $\vec{S}'$, под действием которой рычаг прижимается к барабану, и реакция шарнира *E*, разложенная на составляющие $\vec{X}_E$, $\vec{Y}_E$ вдоль осей *x*, *y*. Уравнения равновесия рычага имеют вид:

$$\sum F_{kx} = X_E + F'_{\text{тр}} = 0; \qquad \sum F_{ky} = Y_E + N' - S' = 0;$$

$$\sum M_E(\vec{F}_k) = S' \cdot DE - N' \cdot EK + F'_{\text{тр}} d = 0.$$

Подставляя в систему данные из условия задачи, с учётом найденных значений $F'_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} = 200$ Н, $N' = N = 500$ Н, определим усилие S', с которым тормозной рычаг прижимается к барабану, и реакцию шарнира *E*:

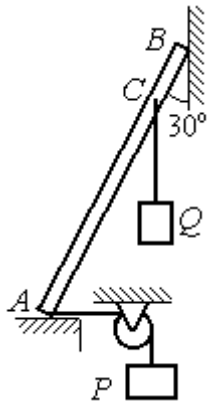
$$S' = 233{,}33 \text{ Н};\ X_E = -200 \text{ Н};\ Y_E = -266{,}67 \text{ Н};\ R_E = \sqrt{X_E^2 + Y_E^2} = 333{,}34 \text{ Н}.$$

Силу $\vec{P}$, необходимую для уравновешивания груза *Q*, найдём рассматривая равновесие рычага *AB* (см. рис. 1.57, *d*) . На рычаг действуют сила $\vec{P}$, реакция цепи $\vec{S}$ и реакция шарнира *B*, показанная на рис. 1.57, *d* составляющими $\vec{X}_B$, $\vec{Y}_B$.

Составим уравнение равновесия рычага в форме равенства нулю суммы моментов сил относительно точки *B*: $P \cdot AB - S \cdot CB = 0$. С учётом того, что модули сил $\vec{S}$ и $\vec{S}'$ равны, найдем $P = 23{,}3$ Н.

Упражнения

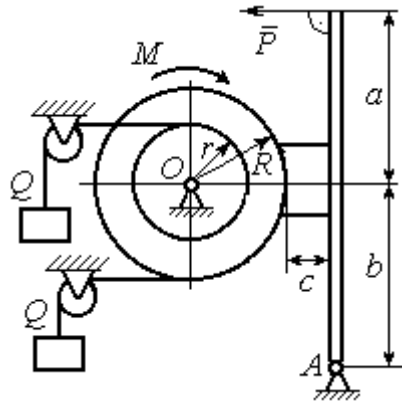
Упражнение 1.13



Невесомый стержень AB опирается в точках A и B на шероховатые поверхности – горизонтальный пол и вертикальную стену. Коэффициент трения между стержнем и полом и между стержнем и стеной $f = 0{,}2$. Угол наклона стержня к вертикальной стене 30°. В точке C к стержню подвешен груз Q. Стержень удерживается в равновесии горизонтальной нитью, прикреплённой в точке A и перекинутой через блок. К другому концу нити подвешен груз P. В каких границах можно изменять вес груза P, не нарушая равновесия стержня?

$AB = 3$ м, $AC = 2$ м, $Q = 200$ Н.

Упражнение 1.14



Шкив O состоит из двух барабанов радиусов R и r. На барабаны навиты верёвки, натянутые одинаковыми грузами Q. К шкиву приложена пара сил с моментом M. Шкив затормаживается с помощью рычажного тормоза. Коэффициент трения между тормозной колодкой и шкивом $f = 0{,}4$. Определить силу $\vec{P}$, приложенную к рычагу тормозной колодки и уравновешивающую шкив. Найти реакцию шарнира A.

$a = b = 1$ м; $c = 0{,}1$ м; $Q = 100$ Н; $M = 120$ Н·м;
$R = 0{,}6$ м; $r = 0{,}2$ м.

Рис. 1.58. Задания для самостоятельного решения. Упражнения № 1.13, 1.14

2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЁРДОГО ТЕЛА

2.1. Криволинейное движение точки

Кривая, которую описывает движущаяся точка, называется **траекторией** точки. Движение точки может быть задано **векторным**, **координатным** или **естественным** способами.

Координатный способ задания движения точки основан на том, что положение точки определяется ее координатами, заданными для каждого момента времени (рис. 2.1): $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$.

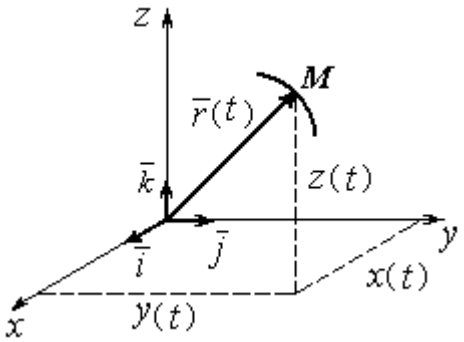


Рис. 2.1. Векторный и координатный способы задания движения точки

Мгновенная скорость, или скорость точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от радиус-вектора точки: $\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. **Вектор скорости точки $\vec{V}$ всегда направлен по касательной к траектории в сторону движения точки.** Величины V_x, V_y, V_z проекций вектора скорости $\vec{V}$ на координатные оси определяются как производные по времени от соответствующих координат: $V_x = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$; $V_y = \frac{dy}{dt} = \dot{y}$; $V_z = \frac{dz}{dt} = \dot{z}$. Модуль вектора скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$.

Мгновенное ускорение точки**,** или ускорение в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от вектора скорости точки или как вторая производная от радиус-вектора точки: $\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$. Величины a_x, a_y, a_z проекций вектора ускорения на координ-

натные оси определяются равенствами: $a_x = \frac{dV_x}{dt} = \dot{V}_x = \ddot{x}$; $a_y = \frac{dV_y}{dt} = \dot{V}_y = \ddot{y}$; $a_z = \frac{dV_z}{dt} = \dot{V}_z = \ddot{z}$. Модуль вектора ускорения: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

Естественный способ задания движения используется, если траектория движения точки заранее известна. Тогда положение точки однозначно определяется длиной дуги $O\breve{M} = S(t)$, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки *O*, принятой за начало отсчета (рис. 2.2). При этом заранее устанавливаются положительное и отрицательное направления отсчета дуговой координаты.

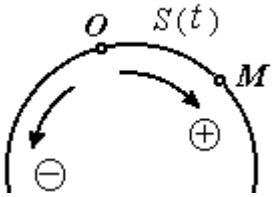


Рис. 2.2. Естественный способ задания движения точки

При естественном способе задания движения вектор скорости точки определяется равенством: $\vec{V} = \dot{S}\vec{\tau} = V_\tau \vec{\tau}$, где S – дуговая координата; $\vec{\tau}$ – единичный вектор касательной к траектории движения, направленный в сторону положительного направления дуговой координаты. Величина $V_\tau = \dot{S}$ называется алгебраической скоростью точки и представляет собой проекцию вектора скорости точки на касательную к траектории.

Вектор ускорения точки $\vec{a}$ раскладывается на составляющие по направлениям естественных осей – касательную (ось τ) и перпендикулярную к ней нормальную (ось *n*):

$$\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n} \text{ или } \vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n,$$

где $\vec{\tau}$ – единичный направляющий вектор касательной; $\vec{n}$ – единичный направляющий вектор нормали траектории; a_τ – проекция ускорения точки на касательную называется **касательным ускорением**; a_n – проекция вектора ускорения точки на нормаль называется **нормальным ускорением** (рис. 2.3). Касательная составляющая ускорения характеризует изменение величины скорости точки, нормальная – изменение направления вектора скорости.

Если проекции V_τ и a_τ имеют одинаковые знаки (направлены в одну сторону), движение будет ускоренным, если разных знаков (разнонаправлены) – замедленным (см. рис. 2.3, *a*, *b*).

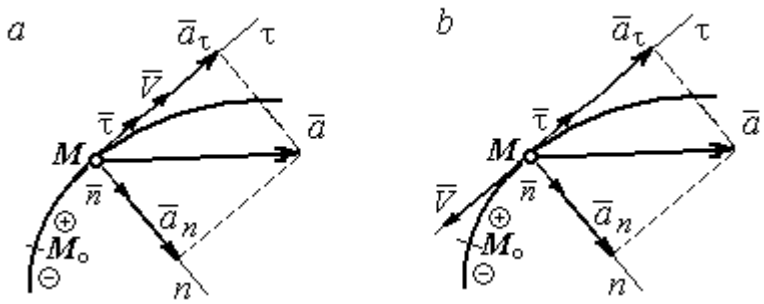


Рис. 2.3. Скорость и ускорение точки. Разложение ускорения на нормальную и касательную составляющие:
a – ускоренное движение; *b* – замедленное движение

Проекции ускорения на естественные оси и модуль вектора ускорения вычисляются по формулам:

$$a_\tau = \ddot{S} = \dot{V}_\tau,\ a_n = \frac{V^2}{\rho};$$

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}\ ,$$

где ρ – радиус кривизны траектории. Иногда при вычислении касательной составляющей ускорения удобнее пользоваться формулой $a_\tau = \dfrac{a_x V_x + a_y V_y}{V_\tau}$.

Вектор нормальной составляющей ускорения $\vec{a}_n$ всегда направлен к центру кривизны траектории. Вектор касательной составляющей ускорения $\vec{a}_\tau$ направлен в сторону положительного направления касательной (по направлению единичного вектора $\vec{\tau}$), если $\ddot{S} > 0$, и в противоположную сторону – при $\ddot{S} < 0$.

Криволинейное движение точки называется **равномерным**, если проекция вектора скорости на касательную – постоянная величина: $V_\tau = \text{const}$.

Криволинейное движение точки называется **равнопеременным**, если постоянна проекция вектора ускорения на касательную: $a_\tau = \text{const}$.

Примеры решения задач на криволинейное движение точки

Задача 20. Движение точки задано координатным способом уравнениями $x(t) = 2\sin\pi t$, $y(t) = \cos 2\pi t$, где *x*, *y* – в сантиметрах, *t* – в секундах.

Найти траекторию точки, величину и направление скорости и ускорения в моменты времени t_1 = 0,25 с, t_2 = 0,75 с. Определить участки ускоренного и замедленного движений точки.

Решение

Определяем траекторию точки. Из уравнений движения находим $y = \cos 2\pi t = \cos^2 \pi t - \sin^2 \pi t = 1 - 2\sin^2 \pi t = 1 - \frac{x^2}{2}$. Траекторией точки является парабола $y = 1 - \frac{x^2}{2}$ (рис. 2.4). Однако не вся парабола будет траекторией движения, а только та её часть, точки которой согласно уравнениям движения удовлетворяют неравенствам: $-2 \le x \le 2$, $-1 \le y \le 1$.

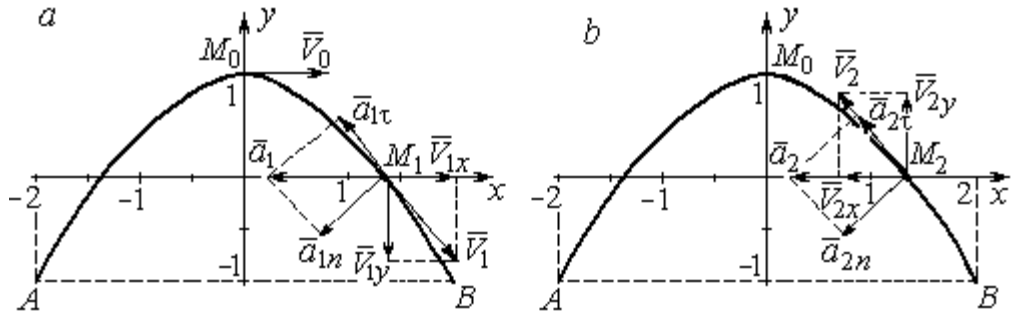


Рис. 2.4. Траектория движения точки:

a – замедленное движение точки на участке от M_0 к *B*;
b – ускоренное движение точки на участке от *B* к M_0

Определяем параметры движения точки в момент времени t_1 = 0,25 с.

Находим координаты x_1, y_1 положения точки M_1:

$$x_1 = x(0{,}25) = 2\sin\frac{\pi}{4} = \sqrt{2} \text{ см}, \quad y_1 = y(0{,}25) = \cos\frac{\pi}{2} = 0.$$

Находим проекции V_{1x}, V_{1y} вектора $\vec{V}_1$ скорости точки на оси системы координат:

$$V_x(t) = \dot{x} = 2\pi\cos\pi t; \; V_y(t) = \dot{y} = -2\pi\sin 2\pi t;$$

$$V_{1x} = V_x(0{,}25) = 2\pi\cos\frac{\pi}{4} = \pi\sqrt{2} \text{ см/с}; \quad V_{1y} = V_y(0{,}25) = -2\pi\sin\frac{\pi}{2} = -2\pi \text{ см/с}.$$

Модуль скорости $V_1 = \sqrt{V_{1x}^2 + V_{1y}^2} = \pi\sqrt{6}$ см/с.

Находим проекции a_{1x}, a_{1y} вектора $\vec{a}_1$ ускорения точки на оси системы координат:

$$a_x(t) = \dot{V}_x = -2\pi^2 \sin\pi t;\ a_y(t) = \dot{V}_y = -4\pi^2 \cos 2\pi t;$$

$$a_{1x} = a_x(0{,}25) = -2\pi^2 \sin\frac{\pi}{4} = -\pi^2\sqrt{2} \text{ см/с}^2;\ a_{1y} = a_y(0{,}25) = -4\pi^2 \cos\frac{\pi}{2} = 0.$$

Модуль вектора ускорения $a_1 = \sqrt{a_{1x}^2 + a_{1y}^2} = \pi^2\sqrt{2}$ см/с.

Положение точки M_1 в момент времени $t_1 = 0{,}25$ с, построение векторов скорости $\vec{V}_1$ и ускорения $\vec{a}_1$ по их проекциям показано на рис. 2.4, *а*.

Для того чтобы определить характер движения точки в положении M_1 – ускоренное или замедленное, найдём направление касательного ускорения. С этой целью разложим известный уже вектор ускорения $\vec{a}_1$ на нормальную и касательную составляющие согласно равенству $\vec{a}_1 = \vec{a}_{1\tau} + \vec{a}_{1n}$. При этом направление касательной совпадает с направлением вектора скорости $\vec{V}_1$, а направление нормали – перпендикулярно ему. Касательное ускорение $\vec{a}_{1\tau}$ оказалось направленным противоположно вектору скорости $\vec{V}_1$ (см. рис. 2.4, *а*). Следовательно, точка в рассматриваемый момент движется замедленно.

В момент времени $t_2 = 0{,}75$ с положение M_2 совпадает с положением M_1:

$$x_2 = x(0{,}75) = 2\sin\frac{3\pi}{4} = \sqrt{2} \text{ см};\ y_2 = y(0{,}75) = \cos 2\pi\frac{3}{4} = 0.$$

Проекции векторов скорости $\vec{V}_2$ и ускорения $\vec{a}_2$ точки на оси координат:

$$V_{2x} = V_x(0{,}75) = 2\pi\cos\frac{3\pi}{4} = -\pi\sqrt{2} \text{ см/с};\ V_{2y} = V_y(0{,}75) = -2\pi\sin 2\pi\frac{3}{4} = 2\pi \text{ см/с};$$

$$a_{2x} = a_x(0{,}75) = -2\pi^2 \sin\frac{3\pi}{4} = -\pi^2\sqrt{2} \text{ см/с}^2;\ a_{2y} = a_y(0{,}75) = -4\pi^2 \cos 2\pi\frac{3}{4} = 0.$$

Модули скорости и ускорения точки в момент времени $t_2 = 0{,}75$ с:

$$V_2 = \sqrt{V_{2x}^2 + V_{2y}^2} = \pi\sqrt{6} \text{ см/с}; \quad a_2 = |a_{2x}| = \pi^2\sqrt{2} \text{ см/с}^2.$$

Положение точки M_2 в момент времени t_2 = 0,75 с, построение векторов скорости $\vec{V}_2$ и ускорения $\vec{a}_2$ по их проекциям, а также разложение вектора ускорения $\vec{a}_2$ на составляющие $\vec{a}_{2n}$ и $\vec{a}_{2\tau}$ показано на рис. 2.4, *b*. В данном случае вектор касательного ускорения совпадает по направлению с вектором скорости (см. рис. 2.4, *b*), поэтому движение ускоренное.

В целом движение точки по траектории происходит следующим образом. Из начального положения M_0 (t_0 = 0) точка с замедлением перемещается по правой ветви параболы. Достигнув положения *B* на траектории (t_B = 0,5 с), точка совершает мгновенную остановку и начинает обратное ускоренное движение. Достигнув положения M_0 (t_{M_0} = 1 с), точка переходит на левую часть параболы, где движется аналогично.

Задача 21. Рудничный поезд выходит на закруглённый участок пути радиуса *R* = 1 км с начальной скоростью 54 км/ч. Считая движение поезда равнопеременным, определить его скорость и ускорение в конце 10-й секунды движения по закруглённому участку, если за это время поезд прошёл путь 500 м.

Решение

Примем за начало отсчёта расстояния точку M_0, где поезд выходит на закруглённый участок пути (рис. 2.5). Предположим, движение поезда равноускоренное и происходит в сторону возрастания дуговой координаты *S*. В этом случае вектор скорости и вектор касательного ускорения направлены в положительную сторону касательной.

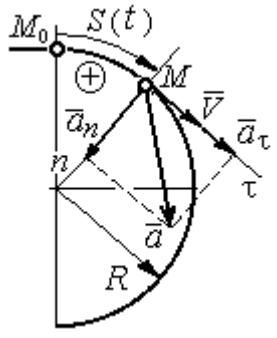


Рис. 2.5. Скорость и ускорение поезда

При равнопеременном движении проекция вектора ускорения на касательную постоянна: a_τ = const. Так как $a_\tau = \dfrac{dV_\tau}{dt}$, то $V_\tau = a_\tau t + C_1$, где V_τ – проекция вектора скорости на касательную

ось. Далее, поскольку $V_\tau = \frac{dS}{dt}$, имеем $S = \frac{a_\tau t^2}{2} + C_1 t + C_2$. Константы интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных условий: при $t = 0$ $S = 0$ и $V_\tau = V_0 =$ = 54 км/ч = 15 м/с. Подставив эти условия в уравнения движения, найдём константы интегрирования: C_1 = 15 м/с; C_2 = 0.

В результате получена система уравнений:

$$V_\tau = a_\tau t + 15; \quad S = \frac{a_\tau t^2}{2} + 15t .$$

По условию задачи через 10 с от начала движения по закруглённому участку поезд прошёл по дуге путь S = 500 м. Подставляя это условие во второе уравнение, получим a_τ = 7 м/с^2. Скорость поезда в конце пройденного пути с учётом известной величины касательного ускорения найдём из первого уравнения V_τ = 85 м/с. Следует заметить, что при указанном движении поезда проекция вектора скорости на касательную ось положительна и равна его модулю: $V_\tau = V$.

Нормальное ускорение поезда при движении по дуге окружности радиуса R = 1000 м в момент времени t = 10 с равно $a_n = \frac{V_\tau^2}{R}$ = 7,23 м/с^2. Величина (модуль) полного ускорения поезда $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$ = 10,06 м/с^2. Разложение вектора ускорения поезда на нормальную и касательную составляющие показано на рис. 2.5.

Задача 22. Вагонетка движется равнопеременно по дуге окружности радиуса R = 80 м. За время движения скорость вагонетки изменилась от начальной V_0 = 18 км/ч до конечной V_1 = 9 км/ч.

Определить характер движения – ускоренное или замедленное. Найти ускорение вагонетки в начале и в конце участка движения, если за это время она прошла путь S = 60 м.

Решение

Выберем некоторую точку на траектории в качестве начальной, а направление положительного отсчёта расстояний – в сторону движения вагонетки.

Уравнения равнопеременного движения точки при начальных условиях: $t = 0$; $S = 0$ и $V_\tau = V_0 = 5$ м/с имеют вид:

$$V_\tau = 5 + a_\tau t\,; \quad S = 5t + \frac{a_\tau t^2}{2}.$$

Подставим в уравнения параметры движения в момент времени $t = t_1$, когда скорость вагонетки стала $V_{1\tau} = 2{,}5$ м/с, а пройденный ею путь составил 60 м. Получим систему:

$$-2{,}5 = a_\tau t_1\,; \quad 60 = 5t_1 + \frac{a_\tau t_1^2}{2},$$

откуда найдём касательное ускорение: $a_\tau = -0{,}16$ м/с^2.

Отрицательная величина означает, что вектор касательного ускорения направлен в сторону, противоположную направлению вектора скорости, и движение равнозамедленное.

Нормальное ускорение вагонетки в начале движения $a_{n0} = \frac{V_0^2}{R} = 0{,}31$ м/с^2.

Полное ускорение $a_0 = \sqrt{a_{n0}^2 + a_\tau^2} = 0{,}35$ м/с^2. В конце движения нормальное ускорение $a_{n1} = \frac{V_1^2}{R} = 0{,}08$ м/с^2. Полное ускорение $a_1 = \sqrt{a_{n1}^2 + a_\tau^2} = 0{,}18$ м/с^2.

2.2. Поступательное движение и вращение твердого тела вокруг неподвижной оси

Движение твёрдого тела называется **поступательным**, если любой прямолинейный отрезок, связанный с телом, остаётся в процессе движения параллельным самому себе. При **поступательном** движении твёрдого тела все его

точки движутся по одинаковым траекториям, имеют равные скорости и ускорения.

Вращением твёрдого тела вокруг неподвижной оси называется такое его движение, при котором две точки тела остаются неподвижными в течение всего времени движения. Прямая, проходящая через неподвижные точки, называется **осью вращения** тела.

Положение вращающегося тела определяется углом поворота $\varphi = \varphi(t)$ относительно какой-либо системы отсчёта, например, относительно неподвижной плоскости, проходящей через ось вращения.

Вектор угловой скорости вращения тела $\vec{\omega}$ лежит на оси вращения и направлен в сторону, откуда вращение тела видно против хода часовой стрелки. **Алгебраическим значением угловой скорости** вращения тела называют проекцию вектора угловой скорости на ось вращения (ось z) $\omega_z = \dot{\varphi}$. При $\dot{\varphi} > 0$ тело вращается в сторону положительного направления отсчёта угла φ, при $\dot{\varphi} < 0$ – в обратную сторону. Направление угловой скорости обычно показывают дуговой стрелкой вокруг оси вращения. Модуль алгебраического значения угловой скорости вращения тела называется угловой скоростью $\omega = |\omega_z| = |\dot{\varphi}|$.

Алгебраическим значением **углового ускорения** вращающегося тела называют проекцию вектора углового ускорения на ось вращения (ось z) $\varepsilon_z = \dot{\omega}_z = \ddot{\varphi}$. Модуль алгебраического значения углового ускорения вращения тела называется угловым ускорением: $\varepsilon = |\varepsilon_z| = |\dot{\omega}_z| = |\ddot{\varphi}|$.

Вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения. Если $\varepsilon_z \omega_z > 0$ (вектора угловой скорости и углового ускорения сонаправлены), движение ускоренное, если $\varepsilon_z \omega_z < 0$ (векторы угловой скорости и углового ускорения противоположны по направлению), – замедленное.

При равномерном вращении угловая скорость тела (алгебраическое значение) – постоянная величина: ω_z = const. Угол поворота тела изменяется по линейному закону $\varphi = \varphi_0 + \omega_z t$, где φ_0 – начальный угол поворота тела.

При равнопеременном вращении постоянной величиной является алгебраическое значение углового ускорения: ε_z = const. В этом случае справедливы уравнения движения: $\omega_z = \omega_{z0} + \varepsilon_z t$; $\varphi = \varphi_0 + \omega_{z0} t + \dfrac{\varepsilon_z t^2}{2}$.

При вращательном движении тела все его точки движутся по окружностям, радиусы которых равны расстояниям от выбранной точки до неподвижной оси. **Скорость точки** вращающегося твердого тела **(**в отличие от угловой скорости тела) называют **линейной,** или **окружной скоростью** точки. Модуль скорости точки рассчитывается по формуле: $V = \omega h$, где ω – угловая скорость тела; h – расстояние от точки до оси вращения. Вектор скорости направлен по касательной к описываемой точкой окружности в сторону вращения тела.

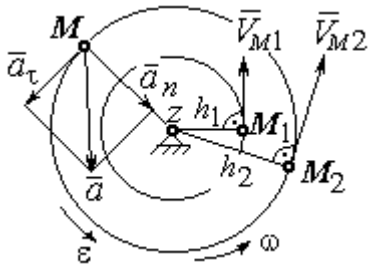


Рис. 2.6. Скорость и ускорение точек вращающегося тела

При вращении тела отношение скоростей двух точек тела равно отношению расстояний от этих точек до оси вращения: $\dfrac{V_{M_1}}{V_{M_2}} = \dfrac{h_1}{h_2}$ (рис. 2.6).

Ускорение точки вращающегося твердого тела рассчитывается как ускорение точки при естественном способе задания движения в виде суммы векторов касательного и нормального ускорений (см. рис. 2.6): $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где модули векторов $a_\tau = \varepsilon h$, $a_n = \omega^2 h$; $a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$; ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела, $\varepsilon = |\varepsilon_z|$; h – расстояние от точки до оси вращения. **Вектор касательного ускорения точки** $\vec{a}_\tau$ направлен по касательной к описываемой точкой окружности в сторону движения точки, если вращение тела ускоренное, и в противоположную сторо-

ну, если движение тела замедленное. **Вектор нормального ускорения точки** $\vec{a}_n$ направлен вдоль радиуса описываемой точкой окружности к её центру.

При **передаче вращения** одного тела другому без проскальзывания соотношения между угловыми скоростями и угловыми ускорениями выражаются из равенства скоростей и касательных ускорений в точке контакта: $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$; $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{r_2}{r_1}$ (рис. 2.7).

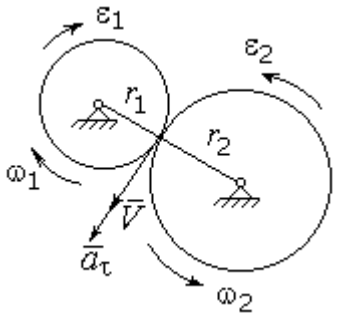


Рис. 2.7. Передача вращения одного тела другому

Примеры решения задач на вращательное движение тел

Задача 23. Вал, начиная вращаться равноускоренно из состояния покоя, за первые 2 мин. сделал 3600 оборотов. Определить угловую скорость вала в конце 2-й минуты и угловое ускорение вала.

Решение

Допустим, вращение вала вокруг оси *z* происходит в сторону положительного направления отсчёта угла. Тогда алгебраические значения угловой скорости и углового ускорения равны модулям соответствующих векторов $\omega_z = \omega$; $\varepsilon_z = \varepsilon$.

Воспользуемся уравнениями равнопеременного вращения вала с нулевыми начальными условиями (начальный угол поворота $\varphi_0 = 0$ и начальная угловая скорость вала $\omega_0 = 0$). Имеем $\omega = \varepsilon t$; $\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2}$.

Подставим в уравнения параметры движения вала в момент времени $t = t_1 = 2$ мин = 120 с; $\varphi_1 = 3600$ об $= 7200\pi$ рад. Получим систему:

$$\omega_1 = \varepsilon \cdot 120, \quad 7200\pi = \frac{\varepsilon \cdot 120^2}{2}, \text{ откуда } \varepsilon = \pi \text{ с}^{-2}; \quad \omega_1 = 120\pi \text{ с}^{-1}.$$

Задача 24. В механизме стрелочного индикатора (рис. 2.8) движение от рейки мерительного штифта 1 передаётся шестерне 2, скреплённой на одной оси с зубчатым колесом 3. Колесо 3 сцепляется, в свою очередь, с шестернёй 4, несущей стрелку-индикатор. Определить угловую скорость стрелки, если движение штифта задаётся уравнением $x = 4\sin\pi t$ и радиусы зубчатых колёс: $r_2 = 6$ см, $r_3 = 10$ см, $r_4 = 4$ см.

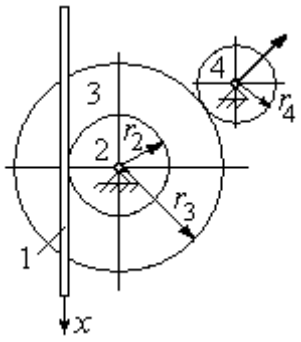


Рис. 2.8. Механизм стрелочного индикатора

Решение

Мерительный штифт движется поступательно вдоль оси x (см. рис. 2.8). Проекция скорости любой точки штифта на ось x $V_{1x} = \dot{x} = 4\pi\cos\pi t$ см/с. Такую же скорость имеет и точка касания штифта с шестернёй 2.

Полагая, что точка касания штифта с шестернёй 2 принадлежит и шестерне, найдём алгебраическое значение угловой скорости шестерни 2: $\omega_{2z} = \dfrac{V_{1x}}{r_2} = \dfrac{4\pi\cos\pi t}{6} = \dfrac{2\pi}{3}\cos\pi t$ рад/с. Зубчатое колесо 3 скреплено с шестернёй 2 на одной оси и имеет ту же угловую скорость $\omega_{3z} = \omega_{2z}$. Вращение колеса 3 через точку зацепления передаётся шестерне 4. Выразим соотношение между алгебраическими значениями угловых скоростей при передаче вращения одного тела другому: $\dfrac{\omega_{3z}}{\omega_{4z}} = \dfrac{r_4}{r_3}$. Отсюда получим: $\omega_{4z} = \dfrac{V_{1x} r_3}{r_2 r_4} = \dfrac{5\pi}{3}\cos\pi t$ с$^{-1}$. Угловая скорость стрелки равна угловой скорости шестерни 4.

Задача 25. Ведущее колесо 1 подъёмного устройства (рис. 2.9) передаёт движение шестерне 2. На одной оси с шестернёй 2 расположен шкив 3, жёстко скреплённый с шестернёй. Шкив 3 соединяется со шкивом 4 бесконечным

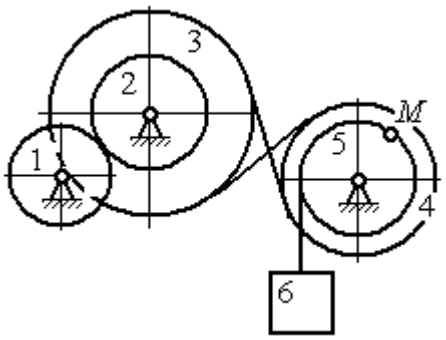


Рис. 2.9. Схема механизма подъёмного устройства

перекрёстным ремнём. Барабан 5 скреплён со шкивом 4 и находится с ним на одной оси. На барабан намотана нить, удерживающая груз 6. По заданному уравнению движения колеса 1 определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки M на ободе барабана 5 в момент времени $t_1 = 1$ с, а также скорость и ускорение груза 6. Скольжение между звеньями механизма отсутствует.

Значения радиусов колёса, шкивов и барабана механизма: $r_1 = 20$ см, $r_2 = 10$ см, $r_3 = 40$ см, $r_4 = 16$ см, $r_5 = 8$ см. Уравнение вращения колеса 1: $\varphi_1 = 2t^2 - 5t$ рад.

Решение

Ведущим звеном в механизме является колесо 1. Выберем положительное направление отсчёта угла поворота колеса 1 в сторону, противоположную направлению вращения часовой стрелки. На рис. 2.10 это направление показано дуговой стрелкой φ_1.

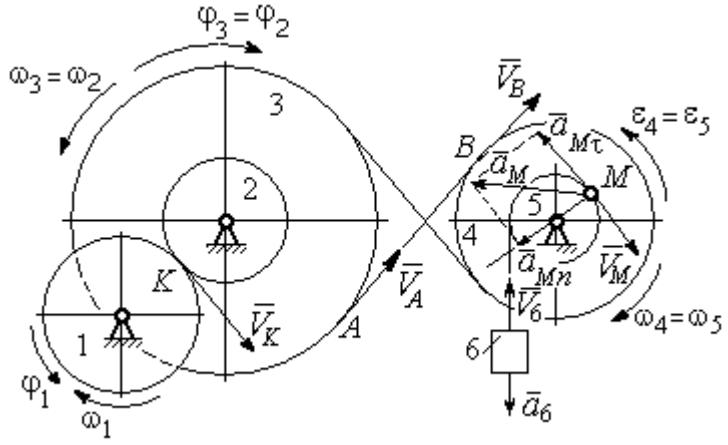


Рис. 2.10. Расчётная схема механизма

Продифференцировав по времени уравнение движения колеса 1, получим алгебраическое значение его угловой скорости: $\omega_{1z} = \dot{\varphi}_1 = 4t - 5$ рад/с. В момент времени $t_1 = 1$ с алгебраическое значение угловой скорости колеса 1 отрицательно: $\dot{\varphi}_1(1) = -1$ рад/с. Это означает, что в данный момент времени колесо 1 вращается в сторону, противоположную положительному направлению отсчёта угла φ_1. Угловая скорость колеса 1 равна модулю: $\omega_1 = |\omega_{1z}| = 1$ рад/с. Направление угловой скорости ω_1 колеса 1 в момент времени $t_1 = 1$ с показано дуговой стрелкой ω_1.

Вращение колеса 1 передаётся шестерне 2 через точку контакта *K*. Из соотношения $\frac{\omega_1}{\omega_2}=\frac{r_2}{r_1}$ найдём угловую скорость шестерни 2: $\omega_2=\frac{\omega_1 r_1}{r_2}$. Шкив 3, закреплённый на одной оси с шестернёй 2 имеет такую же угловую скорость, $\omega_3=\omega_2$. Направление угловых скоростей шестерни 2 и шкива 3 показано на рис. 2.10 дуговой стрелкой ω_2.

Передача движения шкива 3 шкиву 4 производится с помощью ремённой передачи. На участке от точки *A*, где ремень сходит со шкива 3, и до точки *B*, где ремень набегает на шкив 4, ремень движется поступательно, поэтому скорости точек *A* и *B* равны: $V_A=V_B$. Выразив скорости точек через угловые скорости тел, имеем равенство $\omega_3 r_3=\omega_4 r_4$, откуда с учётом, что $\omega_3=\omega_2$, найдём угловую скорость шкива 4: $\omega_4=\frac{\omega_3 r_3}{r_4}=\frac{\omega_1 r_1 r_3}{r_2 r_4}$. Угловая скорость барабана 5 равна угловой скорости шкива 4, $\omega_5=\omega_4$. Направление угловых скоростей шкива 4 и барабана 5 показано на рис. 2.10 дуговой стрелкой ω_4.

Величина (модуль) скорости точки *M* рассчитывается по формуле: $V_M=\omega_5 r_5$. В момент времени $t_1=1$ с $\omega_5=\frac{\omega_1 r_1 r_3}{r_2 r_4}=5$ рад/с и $V_M=20$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ направлен по касательной к ободу барабана в точке *M* и направлен в сторону вращения барабана 5 (см. рис. 2.10).

Нить, несущая груз 6, сматываясь с обода барабана, имеет скорость, равную скорости точек обода барабана, и, следовательно, равна скорости точки *M*: $V_6=V_M$. Направление скорости груза 6 определяется направлением вращения барабана 5. При $t_1=1$с груз поднимается со скоростью $V_6=20$ см/с.

Определим ускорение точки *M*. Вектор ускорения точки *M* равен сумме векторов: $\vec{a}_M=\vec{a}_M^{\tau}+\vec{a}_M^{n}$, где $\vec{a}_M^{\tau}$, $\vec{a}_M^{n}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения.

Найдём алгебраическое значение угловой скорости барабана 5: $\omega_{5z} = \dfrac{\omega_{1z} r_1 r_3}{r_2 r_4} = 20t - 25$ рад/с. Алгебраическое значение углового ускорения барабана 5 ε_{5z} равно производной $\varepsilon_{5z} = \dot{\omega}_{5z} = 20$ рад/с^2. Так как в момент времени $t_1 = 1$ с знаки алгебраических значений угловой скорости барабана и его углового ускорения разные ($\omega_{5z} = -5$ рад/с $\vec{a}_M = \vec{a}_M^{\tau} + \vec{a}_M^{n}$ $\varepsilon_{5z} = +20$ рад/с^2), угловое ускорение (по величине равное модулю $\varepsilon_5 = |\varepsilon_{5z}|$) направлено в сторону, противоположную угловой скорости. На рис. 2.10 направление углового ускорения барабана 5 показано дуговой стрелкой ε_5.

Касательное ускорение точки: $a_{M\tau} = \varepsilon_5 r_5 = 80$ см/с^2. Вектор $\vec{a}_{M\tau}$ касательного ускорения точки M направлен по касательной к траектории в точке M в сторону углового ускорения ε_5 (см. рис. 2.10).

Нормальное ускорение точки M рассчитывается как $a_M^n = \omega_5^2 r_5$, где угловая скорость барабана $\omega_5 = |\omega_{5z}|$. В момент времени $t_1 = 1$ с $\omega_5 = 5$ рад/с и величина нормального ускорения: $\vec{a}_M^{\,n} = 100$ см/с^2. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_M^{\,n}$ направлен по радиусу к центру барабана 5.

Модуль полного ускорения точки M в заданный момент времени: $a_M = \sqrt{(a_M^{\tau})^2 + (a_M^n)^2} = 128{,}06$ см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_M^{\,n}$ и $\vec{a}_M^{\tau}$ (см. рис. 2.10).

Ускорение a_6 груза 6 находится из условия, что груз движется прямолинейно. При прямолинейном движении нормальная составляющая ускорения равна нулю. В результате, ускорение груза 6 $a_6 = a_6^{\tau} = \dot{V}_6 = \dot{V}_M = a_M^{\tau} = \varepsilon_5 r_5 = 80$ см/с^2. Направление вектора ускорения груза 6 определяется направлением углового ускорения барабана 5. На рис. 2.10 направление ускорения груза 6 показано вектором $\vec{a}_6$.

Задача 26. По заданному уравнению поступательного движения звена 1 механизма (рис. 2.11, *a*) определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки *M* диска 3 в момент времени $t_1 = 1$ с, а также скорость и ускорение звена 4. Скольжение между звеньями механизма отсутствует. Значения радиусов колес механизма и закон движения звена 1: $R_2 = 20$ см, $r_2 = 5$ см, $R_3 = 8$ см, $r_3 = 4$ см, $x_1 = \cos\pi t + \sin\pi t$ см.

Решение

Звено 1 движется поступательно вдоль оси *x*. Положительное направление движения задаётся направлением оси *x* (рис. 2.11, *a*). Продифференцировав по времени уравнение движения звена 1, получим его алгебраическое значение скорости: $V_{1x}(t) = \dot{x}_1 = -\pi\sin\pi t + \pi\cos\pi t$.

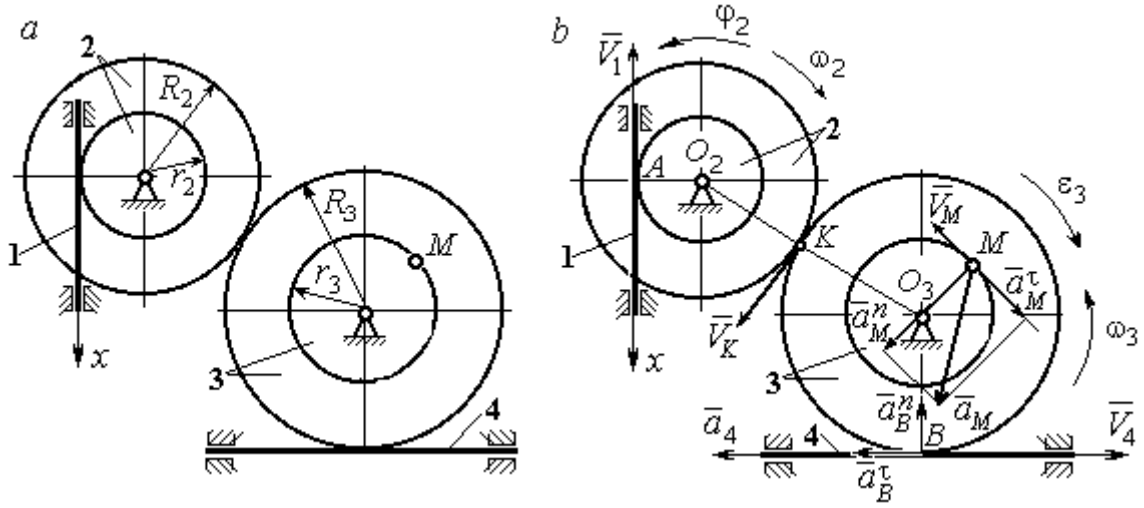


Рис. 2.11. Кинематика поступательного и вращательного движений твердого тела:
a – схема механизма; *b* – расчетная схема для определения скоростей
и ускорений точек механизма

В момент времени $t_1 = 1$ с алгебраическое значение скорости звена 1 отрицательное: $V_{1x}(1) = -\pi$ см/с. Это показывает, что в данный момент времени звено 1 движется в сторону, противоположную положительному направлению оси *x*. Скорость звена 1 равна модулю производной $V_1(1) = |\dot{x}_1| = \pi$ см/с. На рис. 2.11, *b* показано направление вектора скорости $\vec{V}_1$.

Точка A соприкосновения звена 1 с диском 2 имеет ту же скорость, что и звено 1. Угловая скорость диска 2 определяется из равенства $\omega_2 = \frac{V_1}{r_2}$ рад/с. Направление угловой скорости вращения диска 2 показано на рис. 2.11, *b* дуговой стрелкой ω_2.

Передача вращения диска 2 диску 3 происходит в точке *K*. Из соотношения $\frac{\omega_3}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_3}$ находим угловую скорость диска 3: $\omega_3 = \frac{V_1 R_2}{r_2 R_3} = \frac{\pi}{2}$. Направление угловой скорости диска 3 показано на рис. 2.11, *b* дуговой стрелкой ω_3.

Модуль скорости точки M $V_M = \omega_3 r_3 = 2\pi$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ направлен по касательной к траектории движения точки *M* в сторону вращения диска 3 (см. рис. 2.11, *b*).

Звено 4 движется поступательно. Величина и направление скорости звена 4 совпадают с величиной и направлением скорости точки *B* касания звена 4 с диском 3: $V_4 = V_B = \omega_3 R_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с $V_4 = 4\pi$ см/с. Направление вектора скорости $\vec{V}_4$ определяется направлением вращения диска 3.

Определим ускорение точки *M*. Найдём алгебраическое значение ω_{3z} угловой скорости диска 3: $\omega_{3z} = \frac{V_{1x} R_2}{r_2 R_3} = \frac{\pi}{2}(-\sin\pi t + \cos\pi t)$. Алгебраическое значение ε_{3z} углового ускорения диска 3: $\varepsilon_{3z} = \dot{\omega}_{3z} = -\frac{\pi^2}{2}(\cos\pi t + \sin\pi t)$ и в момент времени $t_1 = 1$ с $\varepsilon_{3z} = \frac{\pi^2}{2}$. Разные знаки алгебраических значений угловой скорости и углового ускорения диска 3 ($\omega_{3z} = -\frac{\pi}{2}; \varepsilon_{3z} = +\frac{\pi^2}{2}$) показывают, что угловое ускорение направлено в сторону, противоположную угловой скорости. На рис 2.11, *b* направление углового ускорения диска 3 показано дуговой стрелкой ε_3.

Касательное ускорение точки M рассчитывается по формуле $a_M^{\tau} = \varepsilon_3 r_3$, где угловое ускорение $\varepsilon_3 = |\varepsilon_{3z}|$. В момент времени $t_1 = 1$ с $a_M^{\tau} = 2\pi^2$ см/с^2. Вектор касательного ускорения точки M $\vec{a}_M^{\tau}$ направлен по касательной к траектории точки M в сторону углового ускорения ε_3 (см. рис. 2.11, *b*).

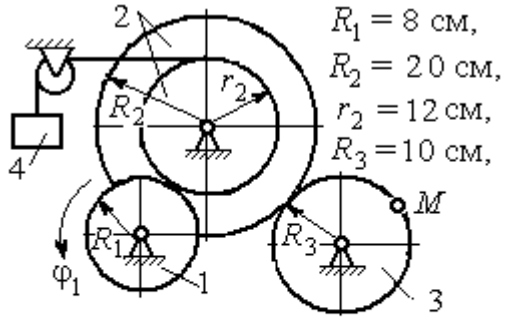
Нормальное ускорение точки M рассчитывается как $a_M^n = \omega_3^2 r_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с величина нормального ускорения $a_M^n = \pi^2$ см/с^2. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_M^n$ направлен по радиусу к центру диска 3.

Модуль полного ускорения точки M: $a_M = \sqrt{(a_M^n)^2 + (a_M^{\tau})^2} = \pi^2\sqrt{5}$ см/с^2. Вектор полного ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_M^n$ и $\vec{a}_M^{\tau}$.

Звено 4 движется поступательно и прямолинейно. Ускорение звена 4 равно проекции ускорения точки B (касания диска 3 со звеном 4) на линию движения звена 4: $a_4 = a_B^{\tau} = \varepsilon_3 R_3 = 4\pi^2$ см/с^2. Направление ускорения звена 4 совпадает с касательным ускорением точки B.

Упражнения

Упражнение 2.1

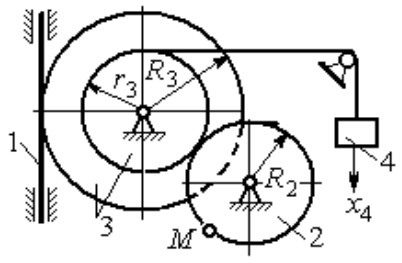


$R_1 = 8$ см,
$R_2 = 20$ см,
$r_2 = 12$ см,
$R_3 = 10$ см,

$\varphi_1 = 3t + 2\sin\frac{\pi t}{2}$ рад,

Найти скорость и ускорение точки M и груза 4 в момент $t = 1$ с

Упражнение 2.2



$R_2 = 0{,}2$ м, $R_3 = 0{,}4$ м, $r_3 = 0{,}3$ м,

$x_4 = t - 1 - \sin\frac{\pi t}{3} + \cos\frac{\pi t}{3}$ м.

Найти скорость и ускорение точки M и звена 1 в момент $t = t_1 = 3$ с.

Рис. 2.12. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.1, 2.2

2.3. Скорости точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела

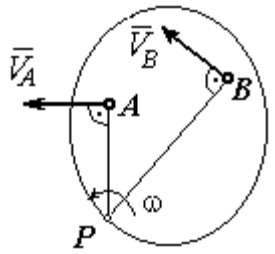
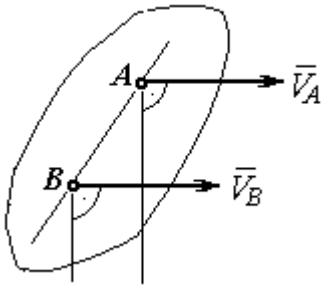
Плоскопараллельным, или плоским движением твердого тела, называется такое движение, при котором все точки тела движутся параллельно некоторой неподвижной (основной) плоскости.

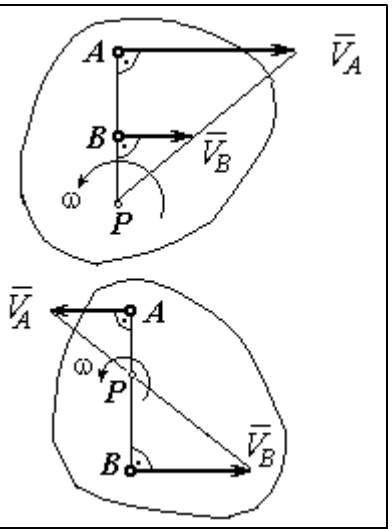
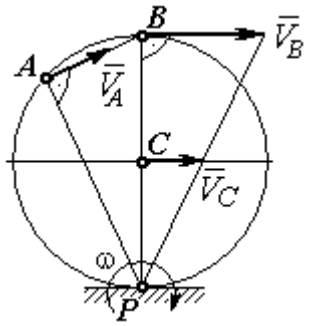
Для скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_M$ двух точек A и M тела, совершающего плоское движение, справедливо утверждение: **проекции скоростей двух точек твердого тела на ось, проходящую через эти точки, равны друг другу:** $V_A\cos\alpha = V_M\cos\beta$, где α, β – углы между векторами скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_M$ и осью, проходящей через точки A и M.

Мгновенным центром скоростей (МЦС) называется точка P плоской фигуры, скорость которой в данный момент времени равна нулю. При известном положении МЦС скорость любой точки плоской фигуры находят так, как если бы движение фигуры было мгновенно вращательным вокруг мгновенного центра скоростей с угловой скоростью, равной угловой скорости плоской фигуры. Способы построения мгновенного центра скоростей приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Способы построения мгновенного центра скоростей

1. Если известны направления скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ каких-нибудь двух точек A и B плоской фигуры, то мгновенный центр скоростей P находится в точке пересечения перпендикуляров, восстановленных из этих точек к векторам скоростей.	
2. Если скорости двух точек $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ параллельны, но точки A и B не лежат на общем перпендикуляре к скоростям, то, как видно из рисунка, мгновенный центр P бесконечно удалён. В этом случае угловая скорость $\omega = 0$ и тело в данный момент движется поступательно (движение является мгновенным поступательным). При таком движении скорость любой точки тела равна $\vec{V}_A$.	

3. Если скорости двух точек $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ параллельны, а точки A и B лежат на общем перпендикуляре к скоростям, то мгновенный центр скоростей P находится как пересечение прямой, соединяющей точки A и B и линии, проходящей через концы векторов, изображающих скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$.	
4. Если плоскопараллельное движение осуществляется путем качения без скольжения одного тела по неподвижной поверхности другого, то мгновенный центр скоростей P расположен в точке касания катящегося тела с неподвижной поверхностью.	

Примеры решения задач на плоскопараллельное движение тела

Задача 27. Приводной механизм насоса находится в положении, показанном на рис. 2.13. Кривошип O_1C вращается с постоянной угловой скоростью $\omega_{O_1C} = 2$ рад/с вокруг оси, проходящей через точку O_1 перпендикулярно плоскости чертежа. Определить скорость поршня D и угловые скорости шатуна BC, коромысла AB и штока AD, если O_1C = 20 см, $OB = 2 \cdot OA$ = 40 см, AD = 60 см.

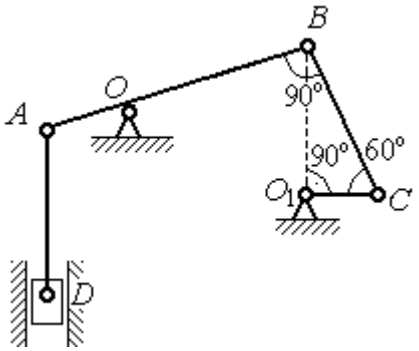


Рис. 2.13. Приводной механизм насоса

Решение

Предположим для определённости, что кривошип O_1C вращается в направлении по ходу часовой стрелки. Вектор $\vec{V}_C$ скорости точки C направлен

перпендикулярно кривошипу O_1C, в сторону его вращения (рис. 2.14). Модуль скорости $V_C = \omega_{O_1C} \cdot O_1C = 40$ см/с.

Коромысло AB качается (вращается) вокруг оси, проходящей через точку O, параллельно оси вращения кривошипа. Скорость точки B направлена перпендикулярно коромыслу AB вдоль шатуна BC (рис. 2.14).

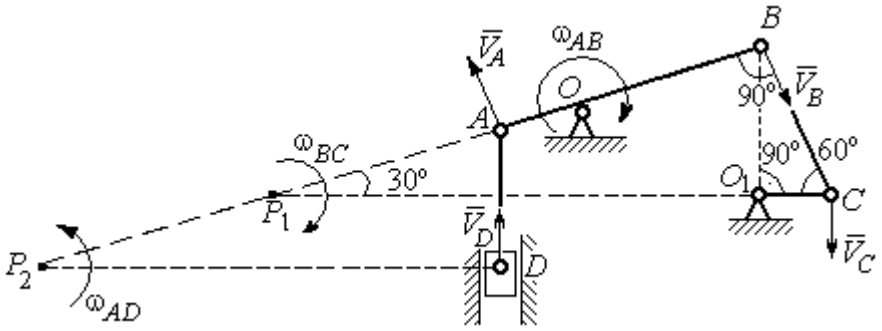


Рис. 2.14. Расчётная кинематическая схема механизма привода насоса

Шатун BC совершает плоскопараллельное движение. Мгновенный центр скоростей шатуна P_1 расположен в точке пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$ точек C и B шатуна. Находим $P_1C = 4O_1C =$ 80 см. Угловая скорость вращения шатуна BC $\omega_{BC} = \dfrac{V_C}{CP_1} =$ 0,5 рад/с. Направление угловой скорости вращения шатуна BC определяется направлением вращения кривошипа O_1C и на рис. 2.14 показано дуговой стрелкой ω_{BC}.

Скорость V_B найдём по теореме о проекциях скоростей. Спроектируем вектора скоростей $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$ точек C и B на линию BC. Получим $V_B \cos 0^\circ = V_C \cos 30^\circ$. Отсюда $V_B = 20\sqrt{3}$ см/с.

Угловая скорость коромысла AB $\omega_{AB} = \dfrac{V_B}{OB} = \dfrac{\sqrt{3}}{2}$ рад/с. Направление угловой скорости коромысла определяется направлением вектора скорости $\vec{V}_B$ и показано дуговой стрелкой ω_{AB}.

Скорость точки A коромысла равна половине скорости точки B: $V_A = \frac{1}{2}V_B = 10\sqrt{3}$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно коромыслу AB в сторону его вращения.

Точка P_2 пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_D$ является мгновенным центром скоростей штока AD. Тогда угловая скорость штока $\omega_{AD} = \frac{V_A}{AP_2} = \frac{\sqrt{3}}{12}$ рад/с. Направление угловой скорости штока определяется по направлению скорости точки A и на рис. 2.14 показано дуговой стрелкой ω_{AD}.

Скорость поршня $V_D = \omega_{AD} \cdot P_2D = 15$ см/с.

Задача 28. Механизм качалки (рис. 2.15) состоит из кривошипа OA, вращающегося вокруг оси O и несущего в точке A ось подвижной шестерни 2, которая катится по неподвижной шестерне 1. Вращение кривошипа происходит с угловой скоростью $\omega_{OA} = 2$ рад/с. Радиусы шестерён $r_1 = r_2 = 6$ см. К ободу шестерни 2 в точке B шарнирно прикреплён шатун BC длиной $BC = 8$ см, который в точке C передаёт движение коромыслу CO_1 длиной $CO_1 = 16$ см.

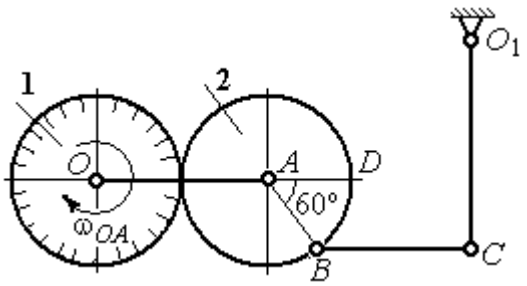


Рис. 2.15. Схема механизма качалки

Определить угловые скорости шестерни 2, шатуна BC, коромысла CO_1, а также скорости точек A, B, C, D в момент, когда кривошип OA и шатун BC горизонтальны и угол $\angle DAB = 60^\circ$.

Решение

Найдём скорость точки A кривошипа: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 24$ см/с. Вектор скорости точки $\vec{V}_A$ расположен перпендикулярно кривошипу OA и направлен в сторону вращения кривошипа (рис. 2.16).

Мгновенный центр скоростей P_2 шестерни 2 находится в точке касания с неподвижной поверхностью шестерни 1. Угловая скорость шестерни 2 $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = 4$ рад/с. Направление угловой скорости шестерни 2 определяется направлением вектора скорости $\vec{V}_A$ и на рис. 2.16 показано дуговой стрелкой ω_2.

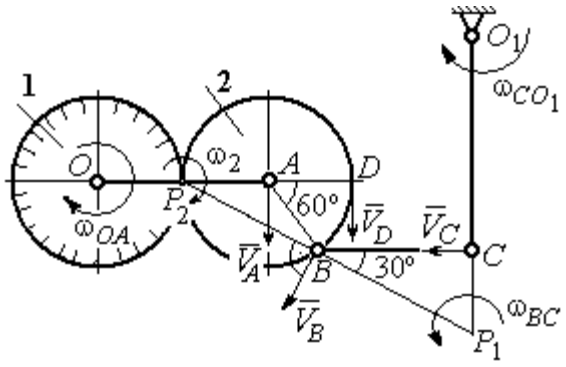


Рис.2.16. Расчётная кинематическая схема механизма качалки

Найдём расстояние P_2B из равнобедренного треугольника P_2AB по теореме косинусов: $P_2B = \sqrt{r^2 + r^2 - 2r^2\cos 120^\circ} = 6\sqrt{3}$ см. Скорость точки B $V_B = \omega_2 \cdot P_2B = 24\sqrt{3}$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии P_2B и направлен в сторону вращения шестерни 2.

Скорость точки D: $V_D = \omega_2 \cdot P_2D = 48$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен линии P_2D и направлен в ту же сторону (см. рис. 2.16).

Скорость точки C перпендикулярна линии CO_1. Восстанавливая перпендикуляры к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$, получим точку пересечения P_1, которая будет мгновенным центром скоростей шатуна BC. Расстояние $P_1B = \dfrac{BC}{\cos 30^\circ} = \dfrac{16}{\sqrt{3}}$ см.

Угловая скорость шатуна $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{P_1B} = \dfrac{9}{2}$ рад/с. Направление угловой скорости определяется по направлению скорости $\vec{V}_B$ и показано дуговой стрелкой ω_{BC}.

Скорость точки C: $V_C = \omega_{BC} \cdot P_1C = \dfrac{36}{\sqrt{3}}$ см/с. Направление вектора скорости определяется направлением вращения шатуна BC.

Угловая скорость коромысла CO_1: $\omega_{CO_1} = \dfrac{V_C}{O_1C} = \dfrac{9}{4\sqrt{3}}$ рад/с.

Задача 29. В планетарном механизме (рис. 2.17) кривошип OA длиной OA = 25 см вращается вокруг неподвижной оси O, перпендикулярной плоскости рисунка, с угловой скоростью ω_{OA} = 3,6 рад/с. На конец A кривошипа насажена шестерёнка 2, находящаяся во внутреннем зацеплении с колесом 1 радиуса r_1 = 45 см, соосным с кривошипом OA и вращающимся с угловой скоростью ω_1 = 1 рад/с. Шатун BC, шарнирно соединённый с шестерёнкой 2 на её ободе в точке B, приводит в движение кривошип CO_1. Определить угловые скорости шестерёнки 2, шатуна BC и кривошипа CO_1, скорости точек A, B, C в положении, показанном на рис.2.17, если длина шатуна BC = 100 см, длина кривошипа CO_1 = 50 см.

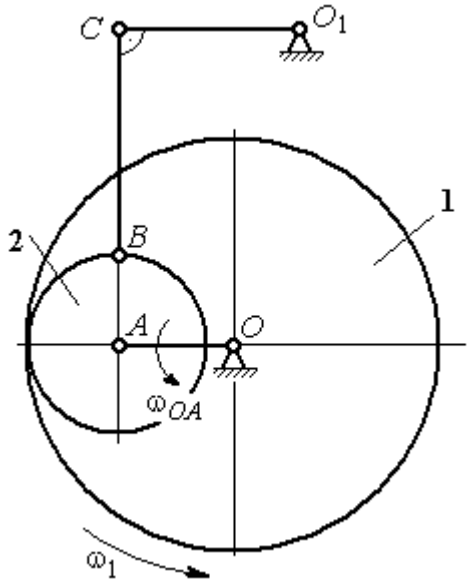


Рис. 2.17. Планетарный механизм

Решение

Найдём скорости точек A и D

$$V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 90 \text{ см/с}; \quad V_D = \omega_1 \cdot r_1 = 45 \text{ см/с}.$$

Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу OA в сторону его вращения. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен радиусу OD колеса 1 и направлен в сторону вращения колеса (рис. 2.18).

Мгновенный центр скоростей P_2 шестерни 2 находится на пересечении прямой, соединяющей точки A и D, и линии, проходящей через концы векторов $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_D$, изображающих скорости точек A и D Расстояние P_2D от центра скоростей до точки D находится из пропорции $\frac{V_A}{V_D} = \frac{AP_2}{DP_2} = \frac{DP_2 + 20}{DP_2}$, откуда P_2D = 20 см.

Угловая скорость шестерёнки 2 $\omega_2 = \dfrac{V_D}{P_2 D} = 2{,}25$ рад/с. Направление угловой скорости ω_2 показано на рис. 2.18 дуговой стрелкой ω_2.

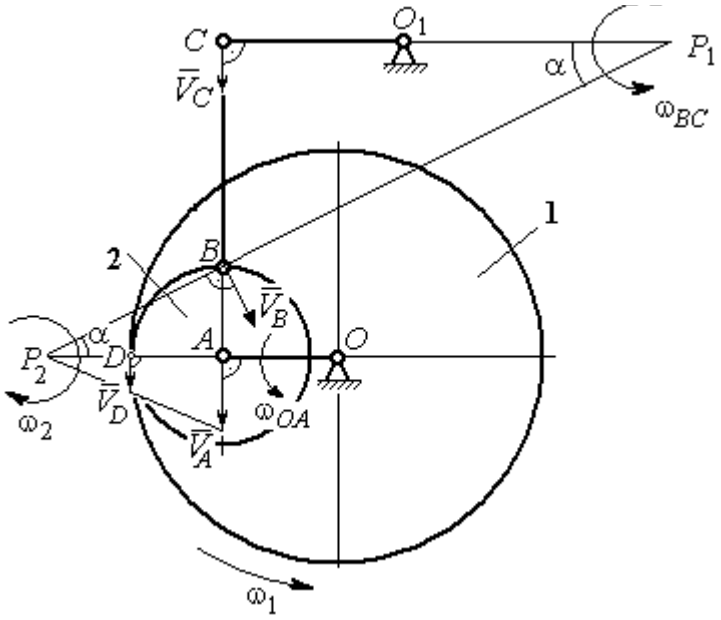


Рис. 2.18. Расчётная кинематическая схема планетарного механизма

Скорость точки *B,* которая находится на ободе шестеренки, $V_B = \omega_2 \cdot P_2 B = = 45\sqrt{5}$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии P_2B и направлен в сторону вращения шестерни 2.

Направим вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярно кривошипу CO_1 и восстановим перпендикуляры к скоростям $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$. Точка P_1 пересечения перпендикуляров является мгновенным центром скоростей шатуна *BC.* Расстояние P_1B найдём из треугольника P_1BC: $P_1B = \dfrac{BC}{\sin\alpha}$, где $\sin\alpha = \dfrac{AB}{P_2B} = \dfrac{1}{\sqrt{5}}$. Тогда $P_1B = 100\sqrt{5}$ см. Угловая скорость шатуна $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{P_1B} = 0{,}45$ рад/с. Скорость точки *C* шатуна *BC* найдём по теореме о проекциях скоростей. Спроектируем скорости $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_B$ точек *C* и *B* на линию, проходящую через эти точки Имеем: $V_C \cos 0^\circ = V_B \cos\alpha$, откуда $V_C = 90$ см/с.

Угловая скорость кривошипа CO_1 $\omega_{CO_1} = \dfrac{V_C}{O_1C} = 1{,}8$ рад/с.

Задача 30. В плоском механизме (рис. 2.19) кривошип OA вращается вокруг оси O с угловой скоростью ω_{OA}. На конец A кривошипа насажена шестерня 2, находящаяся во внешнем зацеплении с неподвижным колесом 1. Радиусы колеса и шестерни r_1 и r_2. Шестерня 2 соединяется с колесом 3 шатуном BC, закреплённым на шестерне в точке B и на колесе в точке C. Колесо 3 катится без скольжения по горизонтальной поверхности. Все соединения шарнирные. Качение шестерни 2 по неподвижному колесу 1 без проскальзывания. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.19, определить скорости точек A, B, C и угловые скорости шатуна BC, шестерни 2 и колеса 3, если $\omega_{OA} = 4$ рад/с; $r_1 = 4$ см; $r_2 = r_3 = 8$ см.

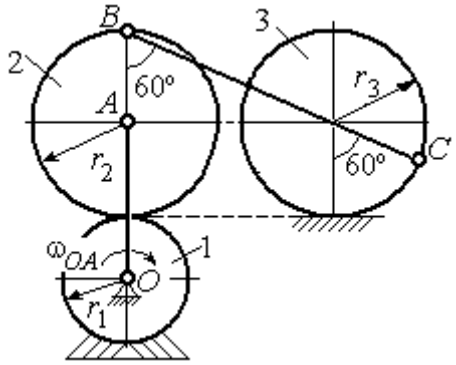


Рис. 2.19. Схема движения плоского механизма

Решение

Рассмотрим вращательное движение кривошипа OA. Скорость точки A кривошипа: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 48$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу OA в сторону его вращения (рис. 2.20).

При качении шестерни 2 по неподвижной поверхности колеса 1 точка их соприкосновения P_2 является мгновенным центром скоростей шестерни.

Угловая скорость шестерни 2 $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = 6$ рад/с.

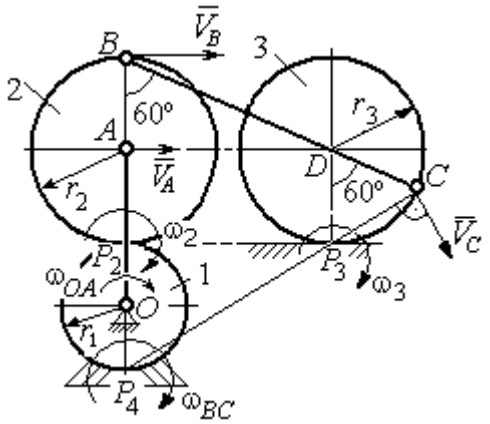


Рис. 2.20. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

Скорость точки B шестерни 2 $V_B = \omega_2 \cdot BP_2 = 96$ см/с.

Точка P_3 касания колеса 3 с неподвижной поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Вектор $\vec{V}_C$ скорости точки C колеса 3 перпендикулярен линии P_3C и направлен в сторону качения колеса (см. рис. 2.20).

Мгновенный центр скоростей шатуна BC – точка P_4 находится на пересечении перпендикуляров, восстановленных к скоростям точек B и C. По построению $BP_4 = BC = BD + DC = 2r_2 + r_3 = 24$ см. Угловая скорость шатуна BC $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{BP_4} = 4$ рад/с. Так как $BP_4 = CP_4$, скорости точек C и B $V_C = 96$ см/с.

Угловая скорость колеса 3 $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} = 12$ рад/с.

Задача 31. В плоском механизме (рис. 2.21) кривошип OC, вращаясь вокруг неподвижной оси O, приводит в движение два шатуна CD и CE, присоединённых к кривошипу в точке C. Шатун CE прикреплён в точке E к ободу цилиндрического выступа диска 1, который катится без проскальзывания своим выступом по неподвижному горизонтальному рельсу. К другому шатуну CD в точке D прикреплён ползун, перемещающийся вдоль направления вертикального диаметра диска 1. Все соединения шарнирные. Радиусы диска и цилиндрического выступа $R_1 = 3$ см, $r_1 = 2$ см. Длина шатуна $CE = 4$ см. В заданном положении механизма (см. рис. 2.21) шатун CE горизонтален.

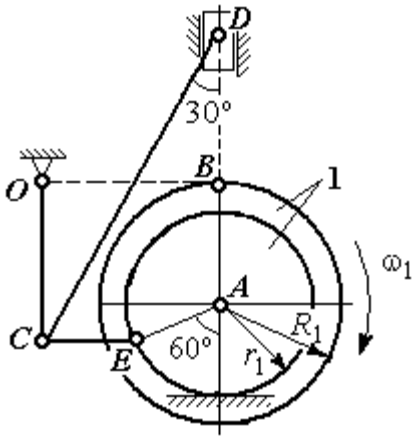


Рис. 2.21. Схема движения плоского механизма

Определить скорости точек A, E, C, D и угловые скорости диска 1, шатунов CE, CD и кривошипа CO, если известна скорость точки B на ободе диска 1 $V_B = 10$ см/с и направление ω_1 угловой скорости диска.

Решение

Изобразим вектор скорости точки B диска 1 в соответствии с заданным направлением его движения. При качении диска 1 по неподвижной поверхности рельса точка P_1 касания обода выступа с поверхностью рельса является его мгновенным центром скоростей (рис. 2.22).

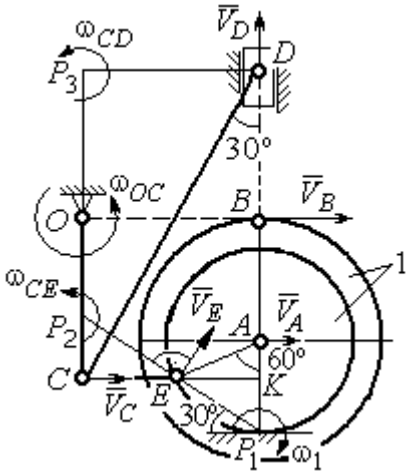


Рис. 2.22. Расчётная схема для определения скоростей точек и угловых скоростей звеньев механизма

Угловая скорость диска 1 $\omega_1 = \dfrac{V_B}{BP_1} = 2$ рад/с. Скорость точки A $V_A = \omega_1 \cdot AP_1 = 4$ см/с. Скорость точки E $V_E = \omega_1 \cdot EP_1 = 4$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ и вектор скорости $\vec{V}_E$ перпендикулярны, соответственно, линиям AP_1 EP_1 и направлены в сторону вращения диска.

Шатун CE совершает плоскопараллельное движение. Скорость точки C шатуна неизвестна по величине, но известно, что вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен кривошипу OC и направлен вдоль CE в сторону точки E. Мгновенный центр скоростей P_2 шатуна CE находится на пересечении перпендикуляров, восстановленных к скоростям $\vec{V}_E$ и $\vec{V}_C$ (см. рис. 2.22).

Расстояние $EP_2 = \dfrac{EC}{\cos 30^\circ} = 4{,}62$ см. Угловая скорость шатуна CE $\omega_{CE} = \dfrac{V_E}{EP_2} = 0{,}86$ рад/с. Направление угловой скорости шатуна, определяемое по направлению скорости точки E, на рис. 2.22 показано дуговой стрелкой ω_{CE}. Скорость точки C шатуна CE $V_C = \omega_{CE} \cdot CP_2 = \dfrac{V_E}{2} = 2$ см/с.

Длина кривошипа $OC = BK = R_1 + r_1 \sin 30^\circ = 4$ см. Угловая скорость кривошипа $\omega_{OC} = \dfrac{V_C}{OC} = 0{,}5$ рад/с.

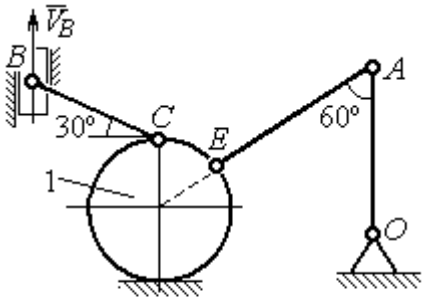
Для шатуна CD известны величина и направление вектора $\vec{V}_C$ скорости точки C и направление вектора $\vec{V}_D$ скорости точки D. Мгновенный центр скоростей шатуна CD находится в точке P_3, полученной на пересечении перпендикуляров, восстановленных к скоростям $\vec{V}_C$ и $\vec{V}_D$.

Расстояние $CP_3 = DK = (CE + r_1 \cos 30^\circ)\operatorname{ctg} 30^\circ = 9{,}92$ см (см. рис. 2.22). Угловая скорость шатуна CD: $\omega_{CD} = \dfrac{V_C}{CP_3} = 0{,}21$ рад/с.

Скорость ползуна D: $V_D = \omega_{CD} DP_3 = \omega_{CD}(CE + r_1 \cos 30^\circ) = 1{,}2$ см/с.

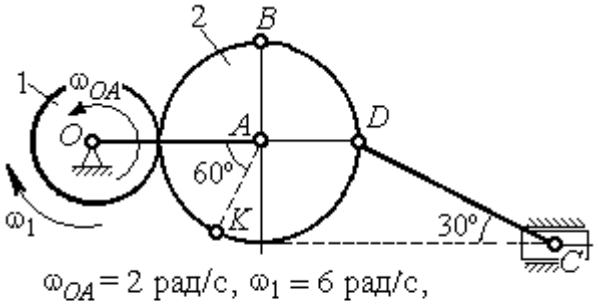
Упражнения

Упражнение 2.3



$R_1 = 2$ см, $OA = AE = 6$ см,
$BC = 5$ см, $V_B = 5$ см/с.
Найти: $\omega_{OA}, \omega_{AE}, \omega_{CB}, \omega_1, V_C, V_A, V_E$

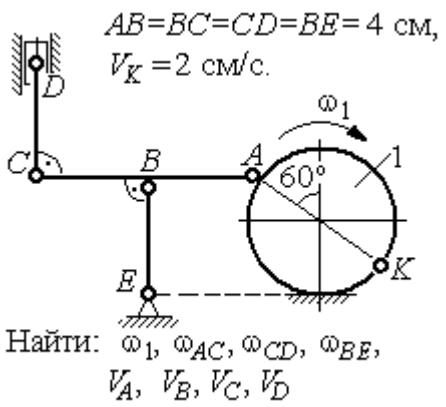
Упражнение 2.4



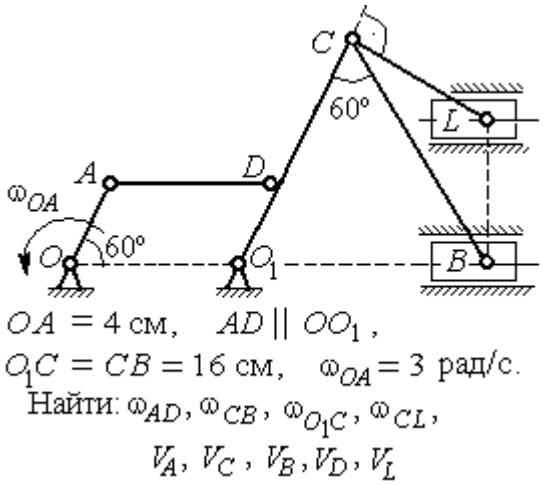
$\omega_{OA} = 2$ рад/с, $\omega_1 = 6$ рад/с,
$r_1 = 3$ см, $r_2 = 6$ см.
Найти: $\omega_2, \omega_{DC}, V_B, V_K, V_D, V_C$

Рис. 2.23. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.3, 2.4

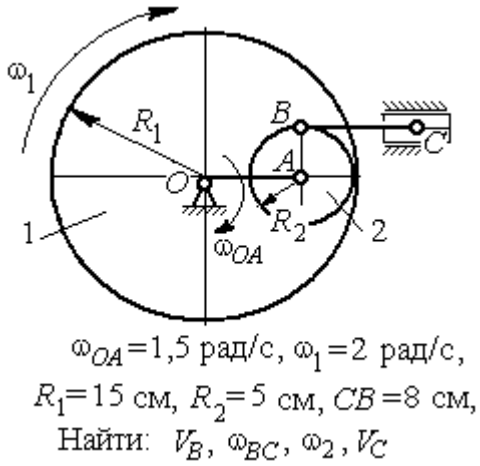
Упражнение 2.5



Упражнение 2.6



Упражнение 2.7



Упражнение 2.8

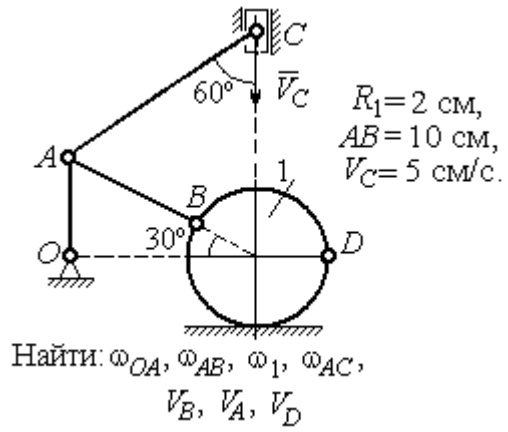


Рис. 2.24. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.5 – 2.8

2.4. Ускорения точек при плоскопараллельном движении твёрдого тела

Ускорение любой точки M плоской фигуры при плоскопараллельном движении твердого тела представляется как сумма векторов $\vec{a}_M = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса A; $\vec{a}^{\tau}_{MA}$, $\vec{a}^{n}_{MA}$ – касательная и

нормальная составляющие ускорения точки *M* при вращении фигуры вокруг полюса *A* (рис. 2.25).

Вектор нормального ускорения $\vec{a}^{\,n}_{MA}$ всегда направлен от точки *M* к полюсу *A*. Вектор касательного ускорения $\vec{a}^{\,\tau}_{MA}$ направлен перпендикулярно отрезку *AM* в сторону вращения, если оно ускоренное (см. рис. 2.25, *a*), и против вращения, если оно замедленное (см. рис. 2.25, *b*). Величины касательного и нормального составляющих ускорения точки *M* определяются по формулам:

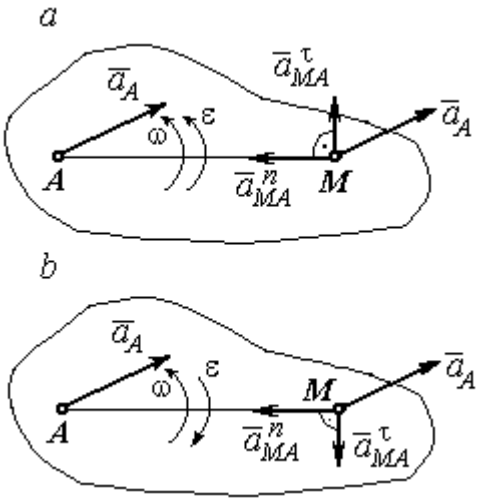


Рис. 2.25. Ускорение точки плоской фигуры:
a – ускоренное движение;
b – замедленное движение

$a^{\tau}_{MA} = \varepsilon \cdot AM$; $a^{n}_{MA} = \omega^2 \cdot AM$, где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела (плоской фигуры); AM – расстояние от точки *M* до полюса *A*.

Если при движении плоской фигуры известны траектории движения полюса *A* и точки *M*, то для определения ускорения точки *M* используется векторное равенство $\vec{a}^{\,\tau}_{M} + \vec{a}^{\,n}_{M} = \vec{a}^{\,\tau}_{A} + \vec{a}^{\,n}_{A} + \vec{a}^{\,\tau}_{MA} + \vec{a}^{\,n}_{MA}$, где $\vec{a}^{\,\tau}_{M}$, $\vec{a}^{\,n}_{M}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{A}$, $\vec{a}^{\,n}_{A}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *M* и полюса *A* при движении их по заданным траекториям.

Примеры решения задач на определение ускорений точек

Задача 32. Поршень *D* гидравлического пресса приводится в движение шарнирно-рычажным механизмом *OABD*. В положении механизма, указанном на рис. 2.26, точка *L* рычага имеет скорость $V_L = 0{,}6$ м/с и ускорение $a_L = 0{,}5$ м/с^2. Длина рычага $OA = 2 \cdot AL = 0{,}6$ м, длина звена $AB = 0{,}4$ м. Определить скорость и ускорение поршня *D*, угловую скорость и ускорение звена *AB*.

Решение

Найдём угловую скорость рычага OL: $\omega_{OL} = \dfrac{V_L}{OL} = \dfrac{2}{3}$ рад/с.

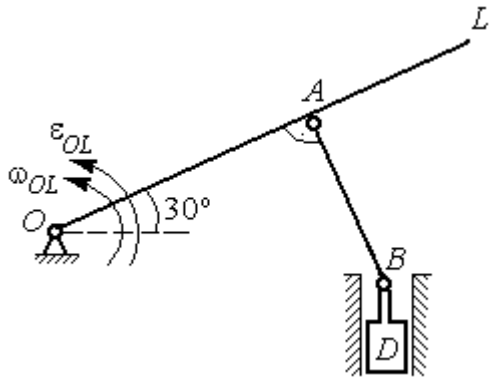


Рис. 2.26. Шарнирно-рычажный механизм гидравлического пресса

Ускорение точки L представляется в виде суммы векторов нормального и касательного ускорений: $\vec{a}_L = \vec{a}_L^{\,\tau} + \vec{a}_L^{\,n}$ (рис. 2.27). Модуль нормального ускорения точки L $a_L^n = \omega_{OL}^2 \cdot OL = 0{,}4$ м/с^2. Модуль её касательного ускорения и угловое ускорение рычага, соответственно, равны:

$$a_L^{\tau} = \sqrt{a_L^2 - (a_L^n)^2} = 0{,}3 \text{ м/с}^2, \quad \varepsilon_{OL} = \frac{a_L^{\tau}}{OL} = \frac{1}{3} \text{ рад/с}^2.$$

Скорость $\vec{V}_A$ точки A перпендикулярна рычагу OL и направлена в сторону вращения рычага. Её модуль $V_A = \omega_{OL} \cdot OA = 0{,}4$ м/с. Скорость $\vec{V}_B$ точки B направлена вертикально вверх вдоль линии движения поршня. Направления векторов скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ показаны на рис. 2.27. Точка P_1 – пересечения перпендикуляров, восстановленных к векторам скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ - определяет положение мгновенного центра скоростей звена AB. Расстояние $AP_1 = P_1B \cdot \cos 30^\circ = 0{,}4\sqrt{3}$ м.

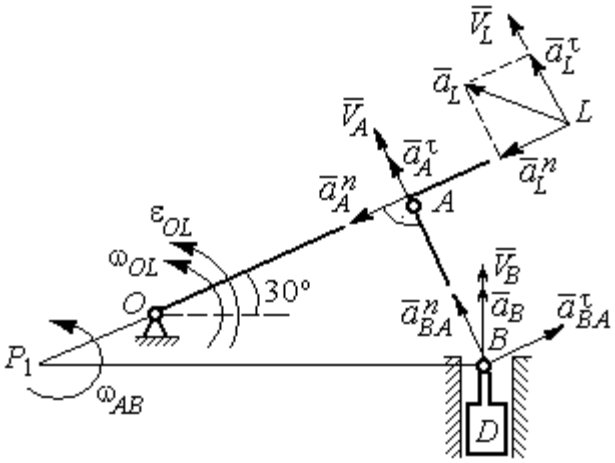


Рис. 2.27. Расчётная кинематическая схема механизма

Угловая скорость звена AB $\omega_{AB} = \dfrac{V_A}{P_1A} = \dfrac{1}{\sqrt{3}}$ рад/с.

Представим ускорение точки B через полюс A: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса A; $\vec{a}^{\tau}_{BA}$, $\vec{a}^{n}_{BA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки B при вращении звена AB вокруг полюса A. Так как траекторией точки A является окружность с центром в точке O, ускорение этой точки может быть разложено на две составляющие: $\vec{a}_A = \vec{a}^{\tau}_{A} + \vec{a}^{n}_{A}$. В результате ускорение точки B представляется в виде векторной суммы $\vec{a}_B = \vec{a}^{\tau}_{A} + \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$. Направления векторов ускорений показаны на рис. 2.27.

Модули ускорений:

$$a^{n}_{A} = \omega^{2}_{OL} \cdot OA = 0{,}27 \text{ см/с}^2;\ a^{n}_{BA} = \omega^{2}_{AB} \cdot AB = 0{,}13 \text{ см/с}^2;$$

$$a^{\tau}_{A} = \varepsilon_{OL} \cdot OA = 0{,}2 \text{ см/с}^2.$$

Ускорение $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_{AB} \cdot AB$ остаётся неизвестной величиной, так как угловое ускорение ε_{AB} звена AB неизвестно.

Спроектируем векторное равенство ускорения точки B на оси x, y, где ось x проходит вдоль линии звена AB, ось y – перпендикулярна ей (рис. 2.28). Получим равенства:

$$a_B \cdot \cos 30^\circ = a^{\tau}_{A} + a^{n}_{BA};\ \ a_B \cdot \cos 60^\circ = -a^{n}_{A} + a^{\tau}_{BA}.$$

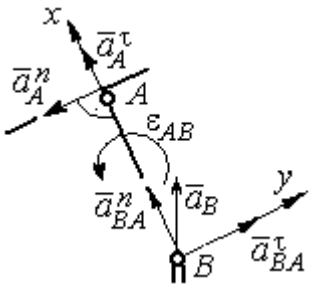


Рис. 2.28. Вычисление проекций векторов ускорений

Решая систему уравнений, находим модуль ускорения точки B: $a_B = 0{,}38$ см/с^2 и величину касательного ускорения: $a^{\tau}_{BA} = 0{,}46$ см/с^2. Угловое ускорение стержня AB $\varepsilon_{AB} = \dfrac{a^{\tau}_{BA}}{AB} = 1{,}15$ рад/с^2. Направление углового ускорения ε_{AB} звена AB определяется направлением вектора $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ касательного ускорения точки B при вращении звена вокруг полюса A (см. рис. 2.28).

Ускорение поршня D равно ускорению точки B: $a_D = a_B = 0{,}38$ см/с^2.

Задача 34. Колесо 1 радиуса $r_1 = 0{,}6$ м катится без скольжения по прямолинейному участку пути и приводит в движение шатун 2, соединённый шарнирно с колесом в точке B на его ободе. На другом конце шатуна в точке C к нему присоединён ползун, перемещающийся горизонтально (рис. 2.29).

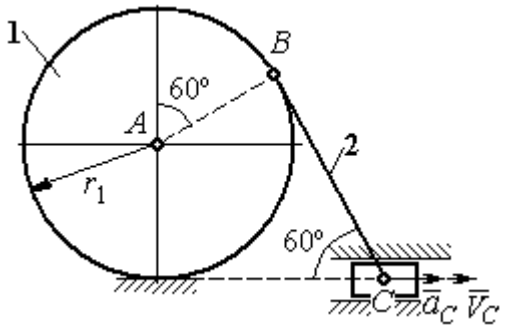


Рис. 2.29. Механизм, связывающий качение колеса с поступательным движением ползуна

В положении механизма, показанном на рис. 2.29, найти ускорение центра A колеса 1, его угловое ускорение, а также угловое ускорение шатуна 2, если заданы скорость и ускорение ползуна C: $V_C = 9$ м/с; $a_C = 4$ м/с^2.

Решение

При качении диска 1 по неподвижной поверхности точка P_1 касания его с поверхностью является мгновенным центром скоростей диска. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии P_1B. Восстановим перпендикуляры к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$. Их пересечение в точке P_2 определяет положение мгновенного центра скоростей шатуна 2 (рис. 2.30).

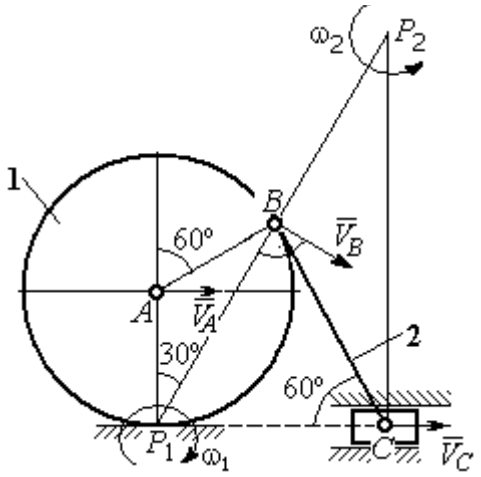


Рис. 2.30. Расчётная схема механизма для определения скоростей точек

Вычислим необходимые расстояния.

Расстояние P_1B (см. рис. 2.30) найдём из треугольника P_1AB по теореме косинусов: $P_1B = r_1\sqrt{3} = 1{,}04$ м. Из построения мгновенных центров скоростей P_1 и P_2 следует: $P_1B = BP_2 = BC$. Расстояние P_2C определяется из треугольника P_1P_2C: $P_2C = P_1P_2 \cdot \cos 30^\circ = 1{,}8$ м.

Угловая скорость шатуна 2 $\omega_2 = \dfrac{V_C}{P_2C}$ = 5рад/с. Направление угловой скорости ω_2 определяется направлением скорости $\vec{V}_C$.

Скорость точки *B* найдём по формуле $V_B = \omega_2 \cdot P_2B$ = 5,2 м/с.

Угловая скорость диска 1 $\omega_1 = \dfrac{V_B}{P_1B}$ = 5 рад/с. Скорость центра колеса 1 $V_A = \omega_1 \cdot P_1A$ = 3 м/с.

Найдём ускорение точки *A*.

Примем точку *B* за полюс и выразим ускорение точки *A* через полюс *B*: $\vec{a}_A = \vec{a}_B + \vec{a}^{\tau}_{AB} + \vec{a}^{n}_{AB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение полюса *B*; $\vec{a}^{\tau}_{AB}$, $\vec{a}^{n}_{AB}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *A* при вращении диска 1 вокруг полюса *B* (рис. 2.31). Направления ускорения точки $\vec{a}_A$ и касательной составляющей ускорения $\vec{a}^{\tau}_{AB}$ точки *A* выбраны в предположении ускоренного движения диска.

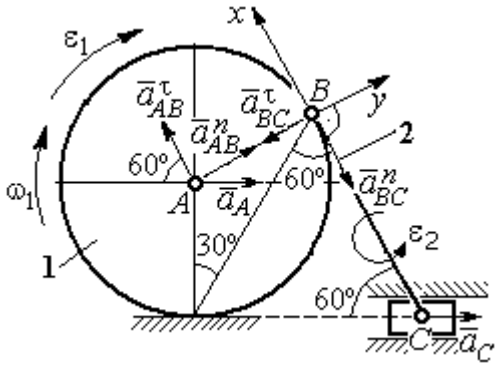


Рис. 2.31. Расчётная схема механизма для определения ускорений точек

Ускорение полюса *B* выразим через полюс *C*: $\vec{a}_B = \vec{a}_C + \vec{a}^{\tau}_{BC} + \vec{a}^{n}_{BC}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение полюса *C*; $\vec{a}^{\tau}_{BC}$, $\vec{a}^{n}_{BC}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *B* при вращении шатуна 2 вокруг полюса *C*. Направление касательной составляющей ускорения $\vec{a}^{\tau}_{BC}$ точки *B* выбрано в направлении вращения шатуна 2 (см. рис. 2.30) исходя из предположения его ускоренного движения. В результате ускорение точки *A* выражается векторной суммой:

$$\vec{a}_A = \vec{a}^{\tau}_{AB} + \vec{a}^{n}_{AB} + \vec{a}^{\tau}_{BC} + \vec{a}^{n}_{BC} + \vec{a}_C.$$

Направления векторов ускорений показаны на рис. 2.31.

Заметим, что в любой момент времени движения колеса 1 расстояние от точки A до мгновенного центра скоростей колеса P_1 остаётся постоянным, равным радиусу колеса. Дифференцируем выражение $V_A = \omega_1 \cdot P_1A = \omega_1 \cdot r_1$. Получим $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_1}{dt} r_1 = \varepsilon_1 \cdot r_1$, откуда с учётом $\frac{dV_A}{dt} = a_A$ (прямолинейное движение точки A) угловое ускорение диска 1 $\varepsilon_1 = \frac{a_A}{r_1}$. В результате, касательное ускорение a^{τ}_{AB} точки A при вращении диска 1 вокруг полюса B $a^{\tau}_{AB} = \varepsilon_1 \cdot AB = a_A$.

Найдём модули векторов ускорений:

$$a^n_{AB} = \omega_1^2 \cdot AB = 15 \text{ м/с}^2;\ a^n_{BC} = \omega_2^2 \cdot BC = 26 \text{ м/с}^2.$$

Ускорение $a^{\tau}_{BC} = \varepsilon_2 \cdot BC$ остаётся неизвестным. Применить здесь способ дифференцирования выражения $V_C = \omega_2 \cdot P_2C$ для определения углового ускорения ε_2 невозможно, так как расстояние P_2C от мгновенного центра скоростей P_2 шатуна 2 до точки C меняется во время движения механизма неизвестным образом.

Спроектируем векторное равенство ускорения точки A на оси x, y, выбранные, как показано на рис. 2.31. Получим систему уравнений:

$$\text{проекция на ось } x\text{: } -a_A\cos60^\circ = a^{\tau}_{AB} - a^n_{BC} - a_C\cos60^\circ;$$

$$\text{проекция на ось } y\text{: } a_A\cos30^\circ = a^n_{AB} - a^{\tau}_{BC} + a_C\cos30^\circ.$$

Из первого уравнения с учётом того, что $a^{\tau}_{AB} = a_A$, найдём ускорение точки A: a_A = 18,67 м/с^2. Положительное значение ускорения точки A означает, что вектор $\vec{a}_A$ направлен так, как показано на рис. 2.31, – в сторону направления вектора скорости $\vec{V}_A$. Из этого следует, что диск 1 движется ускоренно и угловое ускорение направлено в сторону его угловой скорости.

Из второго уравнения получим: $a_{BC}^{\tau} = 2{,}29$ м/с^2. Угловое ускорение шатуна 2: $\varepsilon_2 = \dfrac{\left|a_{BC}^{\tau}\right|}{BC} = 2{,}2$ рад/с^2. Из того, что касательное ускорение a_{BC}^{τ} положительно, следует, что направление вектора $\vec{a}_{BC}^{\tau}$ совпадает с направлением, указанным на рис. 2.31. Это, в свою очередь, означает, что в данном положении механизма угловое ускорение шатуна 2 направлено так, как показано на рис. 2.31, – по направлению его угловой скорости, то есть шатун 2 вращается ускоренно.

Задача 35. По неподвижной шестерне 1 радиуса r_1 обкатывается шестерня 2 радиуса r_2, насаженная в центре на кривошип OA (рис. 2.32). Кривошип OA вращается вокруг оси O с угловой скоростью ω_{OA} и угловым ускорением ε_{OA}. На ободе шестерни 2 в точке B шарнирно прикреплен стержень BC, соединенный другим концом с центром C диска 3, катящегося без скольжения вдоль горизонтальной прямой. Радиус диска 3 равен радиусу шестерни 2: $r_3 = r_2$. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.32, определить ускорение точки D и угловое ускорение стержня BC, если $r_1 = 0{,}2$ м, $r_2 = 0{,}4$ м, $\omega_{OA} = 4$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с^2. Длина стержня $BC = 1$ м.

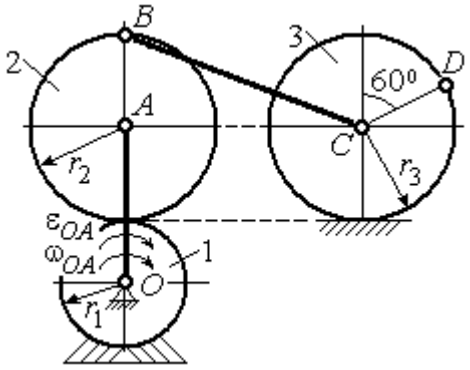


Рис. 2.32. Схема движения плоского механизма

Решение

Найдём угловые скорости звеньев механизма.

Рассмотрим вращательное движение кривошипа OA. Скорость его точки A: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 2{,}4$ м/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу OA в сторону его вращения (рис. 2.33).

При качении подвижной шестерни 2 по неподвижной 1, точка их соприкосновения P_2 является мгновенным центром скоростей шестерни 2. Угловая скорость шестерни 2: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} =$ 6 рад/с. Скорость точки B шестерни 2: $V_B = \omega_2 \cdot BP_2 =$ 4,8 м/с.

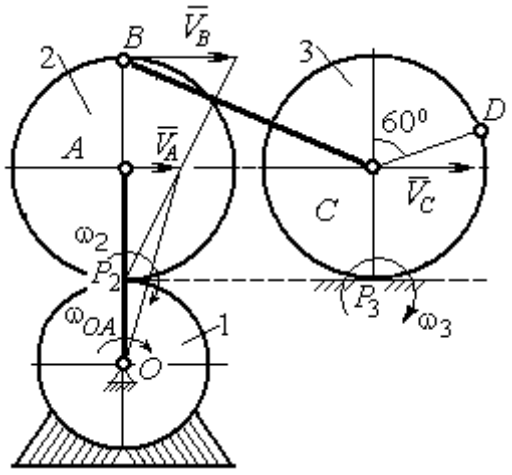


Рис. 2.33. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

Для определения угловой скорости стержня BC заметим, что скорости двух точек стержня $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ параллельны, но точки B и C не лежат на общем перпендикуляре к скоростям. В этом случае мгновенный центр скоростей стержня BC отсутствует (или бесконечно удалён), угловая скорость стержня равна нулю и стержень совершает мгновенное поступательное движение. При таком движении мгновенные скорости всех точек стержня BC одинаковы по величине и направлению. Таким образом, $\omega_{BC} = 0$; $V_C = V_B =$ 4,8 м/с.

При качении диска 3 по неподвижной поверхности без проскальзывания точка P_3 касания диска с поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Угловая скорость диска 3: $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} =$ 12 рад/с. Направление угловой скорости ω_3 определяется направлением вектора $\vec{V}_C$.

Найдём ускорения точек и угловые ускорения звеньев механизма.

Выразим ускорение $\vec{a}_C$ точки C, направленное вдоль линии движения центра колеса 3, через полюс B. Ускорение представляется векторной суммой: $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – вектор ускорения полюса B; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки C при вращении

стержня BC вокруг полюса B. Вектор $\vec{a}^{n}_{CB}$ направлен вдоль стержня от точки C к полюсу B, вектор $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ перпендикулярен стержню BC. Направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ выбрано по предполагаемому угловому ускорению стержня BC, показанному на рис. 2.34 дуговой стрелкой ε_{CB}.

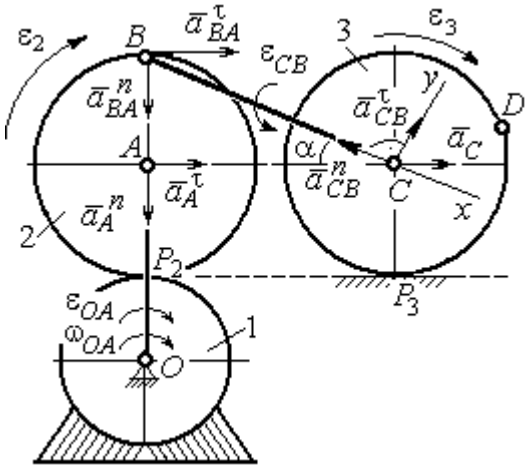


Рис. 2.34. Расчетная схема для определения ускорений точек механизма и угловых ускорений его звеньев

Рассмотрим плоскопараллельное движение шестерни 2 и выразим ускорение точки B через полюс A в виде векторного равенства: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса A; $\vec{a}^{n}_{BA}$, $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки B при вращении шестерни 2 вокруг полюса A. Вектор $\vec{a}^{n}_{BA}$ направлен вдоль радиуса шестерни от точки B к полюсу A, вектор $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ перпендикулярен линии BA. Направление вектора $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ соответствует ускоренному вращению шестерни 2.

Рассмотрим вращение кривошипа OA. Вектор ускорения точки A кривошипа при вращении его вокруг неподвижной оси O представляется в виде суммы: $\vec{a}_A = \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{A}$, где $\vec{a}^{n}_{A}$ и $\vec{a}^{\tau}_{A}$ – вектора нормальной и касательной составляющих ускорения точки A. Вектор $\vec{a}^{n}_{A}$ направлен вдоль кривошипа по направлению к оси вращения, вектор $\vec{a}^{\tau}_{A}$ перпендикулярен кривошипу и направлен в сторону углового ускорения ε_{OA} вращения кривошипа.

В результате для определения ускорения точки C имеем векторное равенство:

$$\vec{a}_C = \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{A} + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{CB} + \vec{a}^{\tau}_{CB}.$$

Направления всех векторов ускорений показаны на рис. 2.34.

Вычислим модули векторов, составляющих векторную сумму:

$$a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA = 9{,}6 \text{ м/с}^2; \quad a_A^\tau = \varepsilon_{OA} \cdot OA = 1{,}2 \text{ м/с}^2;$$

$$a_{BA}^n = \omega_2^2 \cdot BA = 14{,}4 \text{ м/с}^2; \quad a_{CB}^n = \omega_{BC}^2 \cdot BC = 0.$$

Заметим, что во время движения шестерни 2 расстояние AP_2 остается постоянным, равным r_2. Дифференцируя равенство $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = \omega_2 r_2$, получим: $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_2}{dt} r_2$. При криволинейном движении точки A производная от скорости равна касательному ускорению: $\frac{dV_A}{dt} = a_A^\tau$. С учётом, что $\frac{d\omega_2}{dt} = \varepsilon_2$, получим: $a_A^\tau = \varepsilon_2 r_2$, откуда $\varepsilon_2 = \frac{a_A^\tau}{r_2} = 3$ рад/с^2 и $a_{BA}^\tau = \varepsilon_2 \cdot BA = 1{,}2$ м/с^2.

Выберем оси Cx, Cy, как показано на рис. 2.34, – вдоль отрезка BC и перпендикулярно ему и спроектируем на них векторное равенство ускорения точки C. Получим систему уравнений:

$$a_C \cos\alpha = a_A^n \sin\alpha + a_A^\tau \cos\alpha + a_{BA}^n \sin\alpha + a_{BA}^\tau \cos\alpha - a_{CB}^n;$$

$$a_C \sin\alpha = -a_A^n \cos\alpha + a_A^\tau \sin\alpha - a_{BA}^n \cos\alpha + a_{BA}^\tau \sin\alpha + a_{CB}^\tau,$$

где α – угол между стержнем BC и линией центров AC, $\sin\alpha = \frac{AB}{BC} = 0{,}4$; $\cos\alpha = 0{,}92$.

Находим из первого уравнения ускорение точки C: $a_C = 12{,}83$ м/с^2, из второго – касательное ускорение точки C при вращении стержня BC вокруг полюса B: $a_{CB}^\tau = 33{,}95$ м/с^2. Величина углового ускорения стержня BC: $\varepsilon_{CB} = \frac{\left|a_{CB}^\tau\right|}{BC} = 33{,}95$ рад/с^2. Положительное значение a_{CB}^τ означает, что вектор касательного ускорения $\vec{a}_{CB}^\tau$ направлен так, как показано на рис. 2.34. Тогда и

направление углового ускорения ε_{CB} стержня BC совпадает с направлением, показанным дуговой стрелкой на рис. 2.34.

При качении диска 3 точка C движется по прямой и расстояние CP_3 остается постоянным, равным радиусу диска 3. В этом случае равенство $V_C = \omega_3 \cdot CP_3 = \omega_3 r_3$ можно продифференцировать по времени. Получим: $\frac{dV_C}{dt} = \frac{d\omega_3}{dt} r_3$. Так как движение точки C является прямолинейным, производная от скорости точки C равна ускорению этой точки: $\frac{dV_C}{dt} = a_C$. Тогда с учётом $\frac{d\omega_3}{dt} = \varepsilon_3$ имеем равенство $a_C = \varepsilon_3 r_3$. Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3 = \frac{a_C}{r_3} = 32{,}07$ рад/с^2.

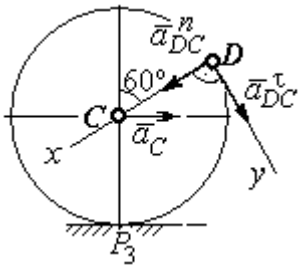


Рис.2.35. Расчетная схема для определения ускорения точки D

Выразим ускорение точки D через полюс C, ускорение которого известно и по величине, и по направлению: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^n_{DC} + \vec{a}^\tau_{DC}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение точки C; $\vec{a}^n_{DC}$, $\vec{a}^\tau_{DC}$ – нормальное и касательное составляющие ускорения точки D при вращении диска 3 вокруг полюса C. Модули ускорений

$$a_C = 12{,}83 \text{ м/с}^2;\ a^n_{DC} = \omega_3^2 DC = 57{,}6 \text{ м/с}^2;\ a^\tau_{DC} = \varepsilon_3 DC = 12{,}83 \text{ м/с}^2.$$

Проведём оси Dx и Dy, как показано на рис. 2.34, и спроектируем векторное равенство ускорения точки D на оси. Получим систему уравнений:

$$a_{Dx} = -a_C \cos 30^\circ + a^n_{DC};\quad a_{Dy} = a_C \cos 60^\circ + a^\tau_{DC}.$$

Подставляя в уравнения проекций значения модулей ускорений, найдём: $a_{Dx} = 46{,}49$ м/с^2; $a_{Dy} = 19{,}25$ м/с^2.

Величина ускорения точки D: $a_D = \sqrt{a^2_{Dx} + a^2_{Dy}} = 50{,}32$ м/с^2.

Заметим, что для определения ускорения точки D невозможно было сразу использовать приём с последовательным выражением ускорения точки D через

ускорения полюсов C, B и A, так как в полученной в результате проекций системе двух уравнений будет три неизвестных величины - a_{Dx}, a_{Dy} и величина ускорения a_{CB}^{τ}.

Задача 36. Механизм качалки (рис. 2.36) включает в себя кривошип OA, вращающийся вокруг неподвижной оси O, шестерню 1 радиуса r_1, насаженную на кривошип в точке A и обкатывающуюся по неподвижной цилиндрической поверхности, и шатун BC, присоединённый одним концом в точке B к шестерне, а другим – в точке C к коромыслу CO_1. В положении, указанном на рис. 2.36, определить угловую скорость и угловое ускорение коромысла CO_1, если ω_{OA} = 2 рад/с; ε_{OA} = 4 рад/с^2; OA = 0,8 м; r_1 = 0,4 м; AB = 0,2 м; BC = 0,6 м. Для этого же положения определить ускорение точки C.

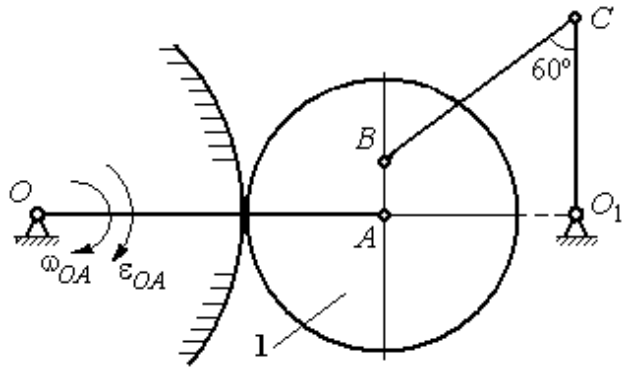


Рис. 2.36. Механизм качалки

Решение

Найдём угловые скорости звеньев механизма.

Скорость точки A кривошипа $V_A = \omega_{OA} \cdot OA$ = 1,6 м/с. Вращаясь, кривошип передаёт движение шестерне 1, которая катится по неподвижной поверхности. Точка касания P_1 шестерни с неподвижной поверхностью является мгновенным центром скоростей шестерни. Тогда её угловая скорость $\omega_1 = \dfrac{V_A}{AP_1}$ = 4 рад/с. Направление угловой скорости показано на рис. 2.37 дуговой стрелкой ω_1.

Расстояние от мгновенного центра скоростей шестерни до её точки B P_1B = 0,45 м. Скорость точки B: $V_B = \omega_1 \cdot P_1B$ = 1,8 м/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен линии P_1B и направлен в сторону вращения шестерни.

При вращении коромысла CO_1 вокруг неподвижной оси O_1 вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен коромыслу. Точка P_2, лежащая на пересечении перпендикуляров, восстановленных к векторам $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ – скоростей точек B и C, является мгновенным центром скоростей шатуна BC (рис. 2.37). Расстояние $BK = BC\cos 30^\circ = 0{,}52$ м; $\cos\alpha = \dfrac{AP_1}{BP_1} = 0{,}89$; $P_2B = \dfrac{BK}{\cos\alpha} = 0{,}58$ м. Угловая скорость шатуна $\omega_{BC} = \dfrac{V_B}{BP_2} = 3{,}1$ рад/с. Направление угловой скорости шатуна показано на рис. 2.37 дуговой стрелкой ω_{BC}.

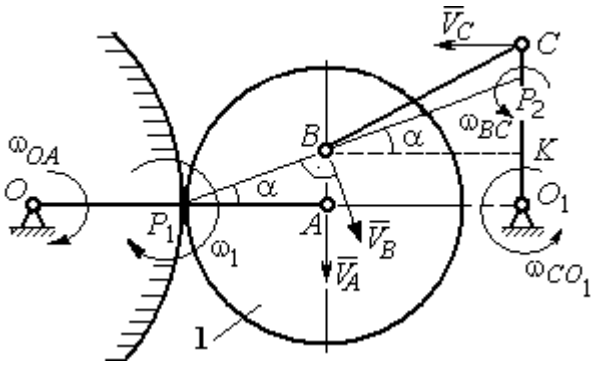


Рис. 2.37. Расчётная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

Расстояние $P_2C = BC \cdot \sin 30^\circ - P_2B \cdot \sin\alpha = 0{,}04$ м. Скорость точки C шатуна BC: $V_C = \omega_{BC} \cdot P_2C = 0{,}12$ м/с. Длина коромысла $CO_1 = CK + KO_1 = 0{,}5$ м, угловая скорость коромысла $\omega_{CO_1} = \dfrac{V_C}{CO_1} = 0{,}24$ рад/с.

Найдём ускорения звеньев механизма.

Считая, что точка C принадлежит шатуну BC, выразим ускорение точки C через полюс B: $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение полюса B; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки C при вращении шатуна вокруг полюса B.

Полагая, что точка B принадлежит шестерне 1, выразим её ускорение через полюс A: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\,n}_{BA} + \vec{a}^{\,\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение точки A шестерни; $\vec{a}^{\,n}_{BA}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки B при вращении шестерни вокруг полюса A.

Поскольку точка A принадлежит и кривошипу OA, а точка C – коромыслу CO_1, вращающихся вокруг своих неподвижных осей, вектора ускорений этих точек можно представить в виде сумм векторов:

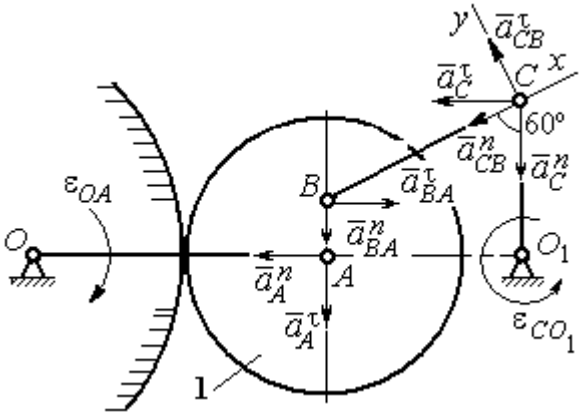


Рис. 2.38. Расчётная схема для определения ускорений точек механизма

$$\vec{a}_A = \vec{a}_A^{\,n} + \vec{a}_A^{\,\tau},\ \vec{a}_C = \vec{a}_C^{\,n} + \vec{a}_C^{\,\tau},$$

где $\vec{a}_A^{\,n}$, $\vec{a}_A^{\,\tau}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки A при вращении кривошипа вокруг оси O; $\vec{a}_C^{\,n}$, $\vec{a}_C^{\,\tau}$ – нормальная и касательная составляющие вектора ускорения точки C при вращении коромысла вокруг оси O_1.

В результате подстановок получим полное векторное равенство, связывающее ускорения точек механизма:

$$\vec{a}_C^{\,n} + \vec{a}_C^{\,\tau} = \vec{a}_{CB}^{\,n} + \vec{a}_{CB}^{\,\tau} + \vec{a}_{BA}^{\,n} + \vec{a}_{BA}^{\,\tau} + \vec{a}_A^{\,n} + \vec{a}_A^{\,\tau}.$$

Направления векторов ускорений показаны на рис. 2.38.

Модули векторов ускорений:

$$a_C^n = \omega_{CO_1}^2 \cdot CO_1 = 0{,}03 \text{ м/с}^2;\ \ a_{CB}^n = \omega_{CB}^2 \cdot CB = 5{,}77 \text{ м/с}^2,$$

$$a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA = 3{,}2 \text{ м/с}^2;\ a_A^\tau = \varepsilon_{OA} \cdot OA = 3{,}2 \text{ м/с}^2,$$

$$a_{BA}^n = \omega_1^2 \cdot BA = 3{,}2 \text{ м/с}^2;\ \ a_{BA}^\tau = \varepsilon_1 \cdot BA.$$

Для определения ε_1 углового ускорения шестерни 1 продифференцируем равенство $V_A = \omega_1 \cdot AP_1 = \omega_1 r_1$. Получим: $a_A^\tau = \varepsilon_1 r_1$, откуда $\varepsilon_1 = \dfrac{a_A^\tau}{r_1} = 8$ рад/с^2.

Тогда $a_{BA}^\tau = 1{,}6$ м/с^2.

Неизвестными в векторном равенстве ускорений остаются модули векторов $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ и $\vec{a}^{\tau}_{C}$. Выберем ось x вдоль шатуна BC, как показано на рис. 2.38, и спроектируем на неё полное векторное равенство.

Получим уравнение:

$$-a^{n}_{C}\cos 60^{\circ} - \vec{a}^{\tau}_{C}\cos 30^{\circ} = -a^{n}_{CB} - a^{n}_{BA}\cos 60^{\circ} + a^{\tau}_{BA}\cos 30^{\circ} - a^{n}_{A}\cos 30^{\circ} - a^{\tau}_{A}\cos 60^{\circ},$$

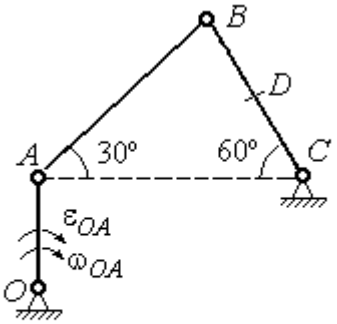
откуда найдём ускорение a^{τ}_{C} = 11,94 м/с^2. Угловое ускорение качалки

$$\varepsilon_{CO_1} = \frac{\left|a^{\tau}_{C}\right|}{CO_1} = 23{,}88 \text{ рад/с}^2.$$

Положительное значение касательного ускорения a^{τ}_{C} свидетельствует о том, что направление вектора ускорения $\vec{a}^{\tau}_{C}$ совпадает с направлением, показанным на рис. 2.38. В эту же сторону направлена и скорость $\vec{V}_C$ точки C (см. рис. 2.37). Следовательно, в данном положении движение качалки ускоренное и угловое ускорение направлено в сторону угловой скорости.

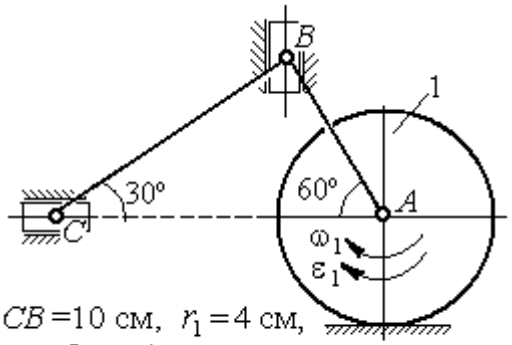
Упражнения

Упражнения 2.9



$OA = 4$ см, $BD = DC = 4$ см,
$\omega_{OA} = 3$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с^2.
Найти ускорение точки D

Упражнения 2.10



$CB = 10$ см, $r_1 = 4$ см,
$\omega_1 = 3$ рад/с, $\varepsilon_1 = 2$ рад/с^2.
Найти ускорение точки C

Рис. 2.39. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 2.9, 2.10

3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

3.1. Основные понятия и определения сложного движения точки

Рассматривается подвижное твердое тело и точка, перемещающаяся относительно тела.

Неподвижная система координат, относительно которой определяются движения точки и тела, называется **основной**. Связанная с телом и движущаяся вместе с ним система координат называется **подвижной.**

Движение точки относительно подвижной системы координат (фактически движение точки относительно тела) называется **относительным**. **Переносным** движением называют движение, которое совершает точка вместе с подвижной системой координат (фактически вместе с телом). Движение точки относительно основной (неподвижной) системы координат называется **абсолютным.**

Скорость точки относительно подвижной системы координат называют **относительной скоростью**, ускорение – **относительным ускорением**.

Переносной скоростью точки и **переносным ускорением** называют скорость и ускорение той точки тела, с которой в данный момент совпадает движущаяся точка.

Скорость и ускорение точки относительно основной системы называют **абсолютной скоростью и абсолютным ускорением.**

При вычислении абсолютной скорости используется теорема о сложении скоростей: **скорость абсолютного движения точки равна векторной сумме переносной и относительной скоростей:** $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$, где $\vec{V}$, $\vec{V}_e$, $\vec{V}_r$ – вектора абсолютной, переносной и относительной скоростей точки.

При вычислении абсолютного ускорения используется теорема Кориолиса о сложении ускорений: **абсолютное ускорение точки равно векторной сумме трех ускорений – относительного, переносного и ускорения Кориолиса:** $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_к$, где $\vec{a}$ – вектор абсолютного ускорения точки; $\vec{a}_e, \vec{a}_r$ –

вектора соответственно переносного и относительного ускорений точки; $\vec{a}_{\text{к}}$ – вектор ускорения Кориолиса.

Вектор ускорения Кориолиса определяется векторным произведением: $\vec{a}_{\text{к}} = 2(\vec{\omega}_e \times \vec{V}_r)$, где $\vec{\omega}_e$ – вектор угловой скорости переносного движения; $\vec{V}_r$ – вектор относительной скорости точки. Модуль ускорения Кориолиса: $|\vec{a}_{\text{к}}| = 2|\vec{\omega}_e| \cdot |\vec{V}_r| \sin\alpha$, где α – угол между вектором угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}_e$ и вектором относительной скорости точки $\vec{V}_r$ (рис. 3.1).

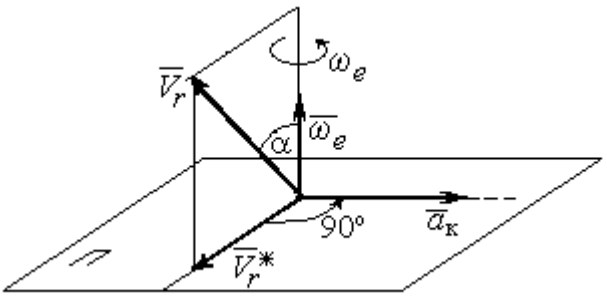


Рис. 3.1. Определение ускорения Кориолиса по правилу Жуковского

На рис. 3.1 показан способ определения вектора ускорения Кориолиса по правилу Н. Е. Жуковского. Правило состоит в следующем. Построим плоскость *П*, перпендикулярную вектору угловой скорости $\vec{\omega}_e$, и спроектируем вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ на эту плоскость. Проекцию обозначим $\vec{V}_r^*$ (см. рис. 3.1). Чтобы получить направление ускорения Кориолиса, следует вектор проекции относительной скорости $\vec{V}_r^*$ повернуть на 90° в плоскости *П* вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Если сложное движение точки происходит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, направление ускорения Кориолиса можно получить простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения. При этом модуль ускорения Кориолиса $a_{\text{к}} = 2|\omega_e| \cdot |V_r| \sin 90^\circ = 2\omega_e V_r$.

Примеры решения задач на сложное движение точки

Задача 37. Компрессор с криволинейными каналами (рис. 3.2) вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = 10$ рад/с вокруг оси *O*, перпендикулярной плоскости рисунка. Воздух перемещается по каналу *AB* с постоянной относительной скоростью $V_r = 4$ м/с. Найти ускорение частицы воздуха в начале канала в точке *A* и проекции этого ускорения на оси неподвижной системы координат *xOy*, если радиус $OA = 0{,}5$ м, радиус кривизны канала в точке *A* $\rho = 0{,}8$ м, угол между нормалью *n* к кривой *AB* в точке *A* и радиусом *OA* $\alpha = 30^\circ$.

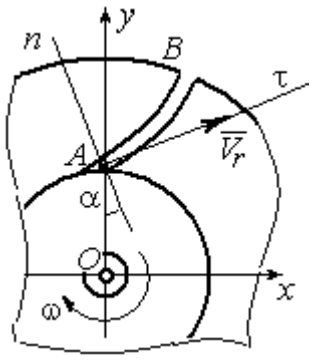


Рис.3.2. Движение воздуха по каналу компрессора

Решение

Переносным движением для частицы воздуха будет вращательное движение компрессора, а скорость точки *A* компрессора, где по условию находится частица воздуха, будет её переносной скоростью: $V_e = \omega \cdot OA = 5$ м/с. Вектор $\vec{V}_e$ переносной скорости частицы перпендикулярен радиусу *OA* и направлен в сторону угловой скорости вращения компрессора (рис. 3.3).

Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости частицы воздуха направлен вдоль касательной к кривой *AB* (стенки канала) в точке *A*.

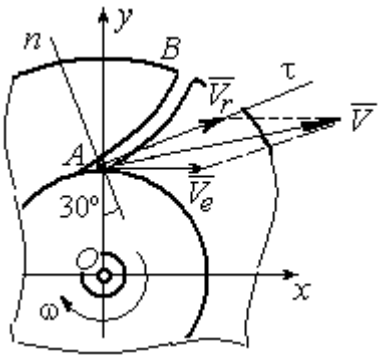


Рис. 3.3. Построение вектора абсолютной скорости частицы

Вектор абсолютной скорости частицы воздуха равен геометрической сумме векторов относительной и переносной скоростей: $\vec{V} = \vec{V}_r + \vec{V}_e$ (см. рис. 3.3). Спроектируем это векторное равенство на оси *x*, *y*. Получим систему уравнений:

$$V_x = V_e + V_r \cos 30^\circ = 8{,}46 \text{ м/с}; \; V_y = V_r \cos 60^\circ = 2 \text{ м/с}.$$

Модуль абсолютной скорости $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 8{,}69$ м/с.

Найдём ускорение частицы воздуха.

Абсолютное ускорение частицы определяется по теореме сложения ускорений:

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_{\text{к}}.$$

В относительном движении частица движется между стенками канала по криволинейной траектории, и её ускорение $\vec{a}_r$ представляется суммой: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_r^{\,\tau}$, где $\vec{a}_r^{\,n}$, $\vec{a}_r^{\,\tau}$ – вектора нормальной и касательной составляющих относительного ускорения частицы.

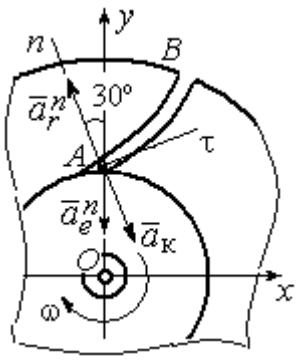


Рис. 3.4. Составляющие ускорения частицы в сложном движении

Переносное ускорение частицы $\vec{a}_e$ есть ускорение точки *A* вращающегося компрессора, которое выражается суммой $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau}$, где $\vec{a}_e^{\,n}$, $\vec{a}_e^{\,\tau}$ – вектора нормальной и касательной составляющих переносного ускорения частицы.

В результате абсолютное ускорение частицы воздуха в точке А выражается векторной суммой:

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

Вычислим модули ускорений:

$$a_r^{\tau} = \dot{V}_r = 0,\ a_r^n = \frac{V_r^2}{\rho} = 20 \text{ м/с}^2;\ a_e^{\tau} = \varepsilon \cdot OA = \dot{\omega} \cdot OA = 0,$$

$$a_e^n = \omega^2 r = 50 \text{ м/с}^2;\ a_{\text{к}} = 2\omega V_r = 80 \text{ м/с}^2.$$

Направление ускорения Кориолиса определяется простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения. Вектора ускорений показаны на рис. 3.4.

Спроектируем векторное равенство ускорения частицы на оси неподвижной системы координат *xOy*. Получим:

$$a_x = -a_r^n \cos 60^\circ + a_к \cos 60^\circ = 30 \text{ м/с}^2 ;$$

$$a_y = a_r^n \cos 30^\circ - a_e^n - a_к \cos 30^\circ = -101{,}96 \text{ м/с}^2.$$

Модуль ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 106{,}28$ м/с^2.

Задача 38. При совмещении работы механизмов подъёма груза и поворота крана (рис. 3.5) груз *A* перемещается в горизонтальном и вертикальном направлениях. На участке разгона барабан *B* радиуса $r_1 = 0{,}5$ м, на который навит канат, поддерживающий груз, вращается с постоянным угловым ускорением $\varepsilon_1 = 3$ рад/с^2, а кран разворачивается вокруг оси O_1O_2 с угловым ускорением $\varepsilon_2 = 0{,}5$ рад/с^2.

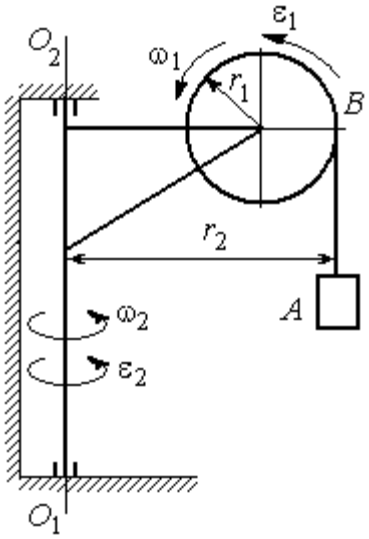


Рис. 3.5. Механизм поворотного крана

Пренебрегая отклонением каната от вертикали, определить скорость и ускорение груза в момент времени $t_1 = 1$ с, если вылет стрелы крана до линии подвеса груза $r_2 = 10$ м.

Решение

Подъём груза *A* на канате является для груза относительным движением, а вращение крана – переносным. Вектор абсолютной скорости груза равен сумме $\vec{V} = \vec{V}_r + \vec{V}_e$, где вектора относительной $\vec{V}_r$ и переносной $\vec{V}_e$ скоростей.

При равноускоренном вращении барабана *B* из состояния покоя его угловая скорость $\omega_1 = \varepsilon_1 t$. В момент времени $t_1 = 1$ с $\omega_1 = 3$ рад/с. Скорость подъёма груза *A* в этот момент $V_r(1) = \omega_1(1) r_1 = 1{,}5$ м/с. Вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ направлен вдоль линии движения груза, в сторону его подъёма (рис. 3.6).

Угловая скорость крана при постоянном угловом ускорении $\omega_2 = \varepsilon_2 t$. При $t_1 = 1$ с $\omega_2 = 0{,}5$ рад/с. Переносная скорость груза A равна скорости груза, движущегося вместе со стрелой крана по окружности радиуса r_2: $V_e = \omega_2 r_2 = 5$ м/с. Вектор переносной скорости груза $\vec{V}_e$ направлен по касательной к траектории переносного движения груза в сторону угловой скорости вращения крана (см. рис. 3.6).

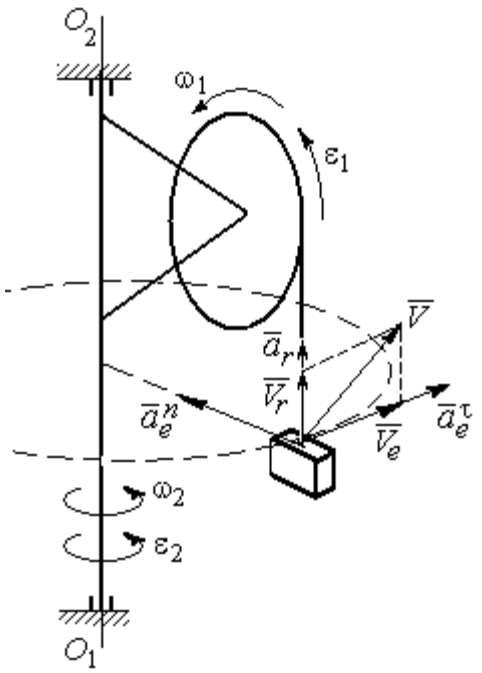


Рис. 3.6. Расчётная схема для определения скорости и ускорения груза на поворотном кране

Так как вектора относительной и переносной скоростей груза взаимно перпендикулярны, модуль абсолютной скорости $V = \sqrt{V_r^2 + V_e^2} = 5{,}22$ м/с.

Найдём абсолютное ускорение груза.

Теорема сложения ускорений имеет вид векторной суммы: $\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_\text{к} = \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_\text{к}$, где $\vec{a}_r^{\,n}$, $\vec{a}_r^{\,\tau}$, $\vec{a}_e^{\,n}$, $\vec{a}_e^{\,\tau}$, $\vec{a}_\text{к}$ – вектора нормального и касательного ускорений груза в относительном и переносном движениях и ускорение Кориолиса. Найдём модули векторов ускорений.

Нормальное относительное ускорение a_r^n груза, движущегося прямолинейно, равно нулю: $a_r^n = 0$, а касательное a_r^τ равно по величине касательному ускорению точки на поверхности барабана: $a_r^\tau = \varepsilon_1 r_1 = 1{,}5$ м/с^2. Направление вектора $\vec{a}_r^{\,\tau}$ относительного касательного ускорения груза определяется направлением углового ускорения барабана.

Переносные нормальное a_e^n и касательное a_e^τ ускорения груза: $a_e^n = \omega_2^2 r_2$ = 2,5 м/с^2; $a_e^\tau = \varepsilon_2 r_2$ = 5 м/с^2. Вектор касательного ускорения $\vec{a}_e^\tau$ направлен в сторону углового ускорения вращения крана.

Ускорение Кориолиса $a_к$ равно нулю, так как вектор $\vec{V}_r$ параллелен вектору $\vec{\omega}_2$: $a_к = 0$.

Направления векторов ускорений, модули которых отличны от нуля, показаны на рис. 3.6. В результате вектор абсолютного ускорения груза представлен в виде разложения на три взаимно перпендикулярных вектора: $\vec{a} = \vec{a}_e^n + \vec{a}_e^\tau + \vec{a}_r^\tau$, поэтому модуль абсолютного ускорения груза $a = \sqrt{(a_e^n)^2 + (\vec{a}_e^\tau)^2 + (\vec{a}_r)^2}$ = 5,79 м/с^2.

Задача 39. Фигура, состоящая из половины диска и построенного на его диаметре равнобедренного треугольника (рис. 3.7), вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости фигуры и проходящей через вершину A треугольника, по закону $\varphi_e = 5t - 2t^2$ рад. Положительное направление вращения отмечено на схеме дуговой стрелкой φ.

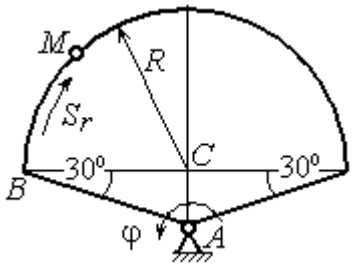


Рис. 3.7. Схема сложного движения точки

По ободу диска из начального положения B движется точка M. Уравнение движения точки: $\breve{BM} = S_r = 9\pi t^2$, см.. Положительное направление отсчёта дуги BM показано дуговой стрелкой S_r (см. рис. 3.7). Радиус диска R = 9 см. Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки M в момент времени t_1 = 1 с.

Решение

Переносным движением точки M является вращение фигуры вокруг оси A, относительным – её движение по окружности обода диска.

Положение точки M на окружности определяется центральным углом: $\alpha = \dfrac{S_r}{R}$, где S_r – длина дуги окружности, пройденная точкой. В момент времени $t_1 = 1$ с $S_r = 9\pi$ см и $\alpha = \pi$. Расчётное положение точки M на рис. 3.8 обозначено M_1.

Угловая скорость вращения фигуры равна модулю производной $\omega_e = |\dot{\varphi}_e| = |5 - 4t|$. При $t_1 = 1$ с $\omega_e(1) = 1$ рад/с. Направление угловой скорости определяется знаком производной $\dot{\varphi}_e$. Положительная на данный момент времени величина производной ($\dot{\varphi}_e = 1$) показывает, что вращение фигуры происходит в положительном направлении отсчёта угла φ_e и отмечено на рис. 3.8 дуговой стрелкой ω_e.

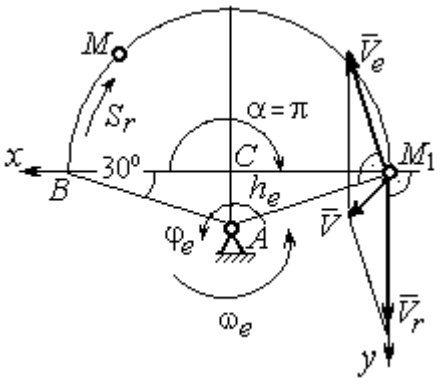


Рис. 3.8. Расчетная схема для вычисления абсолютной скорости точки

Переносная скорость точки V_e – это скорость расчётного положения точки M вращающейся фигуры: $V_e = \omega_e h_e = = \omega_e AM_1 = \dfrac{\omega_e R}{\cos 30^\circ} = 10{,}39$ см/с. Вектор переносной скорости точки $\vec{V}_e$ перпендикулярен отрезку AM_1 и направлен в сторону вращения фигуры (см. рис. 3.8).

Скорость точки в относительном движении определяется как модуль производной: $V_r = |\dot{S}_r| = |18\pi t|$. При $t_1 = 1$ с $V_r = 56{,}5$ см/с. Положительное значение производной $\dot{S}_r = 18\pi > 0$ указывает, что в этот момент времени относительное движение точки происходит в положительном направлении отсчёта дуги окружности, по которой движется точка. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки перпендикулярен отрезку CM_1 и направлен в сторону её движения.

Абсолютная скорость точки равна сумме векторов переносной и относительной скоростей $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Для того чтобы найти абсолютную скорость

точки, выберем оси координат M_1x, M_1y, как показано на рис. 3.8, и спроектируем обе части векторного равенства теоремы сложения скоростей на эти оси:

$$V_x = V_e\cos 60^\circ = 5{,}2 \text{ см/с}, \; V_y = -V_e\cos 30^\circ + V_r = 47{,}5 \text{ см/с}.$$

Модуль абсолютной скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = 47{,}8$ см/с.

Абсолютное ускорение точки определяется по теореме сложения ускорений: $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_\text{к}$.

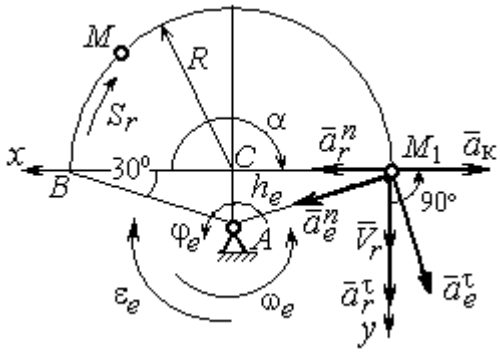


Рис. 3.9. Расчетная схема для определения абсолютного ускорения точки

Переносное ускорение точки представляется в виде суммы: $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n}$, где $\vec{a}_e^{\,\tau}$ и $\vec{a}_e^{\,n}$ – переносные касательное и нормальное ускорения. В относительном движении точки (по дуге окружности) ускорение также может быть разложено на две составляющие – относительные касательное и нормальное ускорения: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n}$. В результате теоремa о сложении ускорений приобретает вид: $\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_\text{к}$.

Вычислим модули и направления векторов ускорений в расчётном положении точки M_1.

Относительное касательное ускорение a_r^τ вычисляется по формуле: $a_r^\tau = \left|\ddot{S}_r\right|$, где $\ddot{S}_r = 18\pi = 56{,}5$ см/с^2. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r^{\,\tau}$ направлен по касательной в сторону положительного отсчёта траектории относительного движения. Относительное нормальное ускорение точки a_r^n вычисляется по формуле: $a_r^n = \dfrac{V_r^2}{R}$ и в момент $t_1 = 1$ с равно 355,3 см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_r^{\,n}$ направлен по радиусу диска к центру C (рис. 3.9).

Угловое ускорение фигуры в момент времени $t_1 = 1$ с, $\varepsilon_e = |\ddot{\varphi}_e| = 4$ рад/с^2. Поскольку значение второй производной угла поворота отрицательное ($\ddot{\varphi}_e = -4$ рад/с^2), то угловое ускорение направлено в сторону, противоположную положительному направлению отсчёта угла поворота фигуры, как показано на рис. 3.9 дуговой стрелкой ε_e. Модуль переносного касательного ускорения a_e^τ определяется по формуле $a_e^\tau = \varepsilon_e h_e = \varepsilon_e \cdot AM_1$ и в момент времени $t_1 = 1$ с равен 41,6 см/с^2. Вектор переносного касательного ускорения точки $\vec{a}_e^\tau$ перпендикулярен AM_1 и направлен в сторону углового ускорения фигуры ε_e (см. рис. 3.9). Переносное нормальное ускорение вычисляется по формуле $a_e^n = \omega_e^2 h_e = \omega_e^2 \cdot AM_1$ и на момент времени $t_1 = 1$ с: $a_e^n = 10{,}4$ см/с^2. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^n$ направлен вдоль отрезка M_1A к оси вращения тела (см. рис. 3.9).

Модуль ускорения Кориолиса в момент времени $t_1 = 1$ с $a_к = 2\omega V_r =$ $=113{,}1$ см/с^2. По условию задачи вектор $\vec{V}_r$ скорости относительного движения точки перпендикулярен вектору $\vec{\omega}_e$ угловой скорости переносного движения. В этом случае для определения направления ускорения Кориолиса достаточно повернуть вектор относительной скорости $\vec{V}_r$ на 90° в сторону переносного движения (см. рис. 3.9).

Для определения абсолютного ускорения точки выберем оси M_1x и M_1y, как показано на рис. 3.9, и спроектируем обе части векторного равенства теоремы сложения ускорений на эти оси. Получим:

$$a_x = -a_e^\tau \cos 60^\circ + a_e^n \cos 30^\circ + a_r^n - a_к = 230{,}4 \text{ см/с}^2;$$

$$a_y = a_e^\tau \cos 30^\circ + a_e^n \cos 60^\circ + a_r^\tau = 97{,}9 \text{ см/с}^2.$$

Модуль абсолютного ускорения

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 250{,}3 \text{ см/с}^2.$$

Задача 40. Диск (рис. 3.10) вращается вокруг оси O_1O_2, проходящей вдоль вертикального диаметра, с угловой скоростью $\omega = 2t^2 + 4\cos\pi t$ рад/с. Положительное направление отсчёта угла поворота диска отмечено на схеме дуговой стрелкой φ. Вдоль другого диаметра диска, наклоненного под углом 30º к вертикальному, движется точка M по закону $CM = S_r = (4t-1)^2 - 1$ см. Расстояние отсчитывается от точки C на краю диска. Положительное направление движения точки M показано стрелкой S_r. Радиус диска $R = 4$ см. Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки M в момент времени $t_1 = 1$ с.

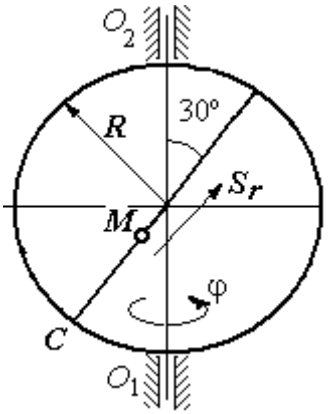


Рис. 3.10. Схема сложного движения точки

Решение

Переносным движением точки M является вращение диска вокруг вертикального диаметра, относительным – её прямолинейное движение вдоль наклонного диаметра диска.

Расстояние S_r, пройденное точкой, к моменту времени $t_1 = 1$ с равно 8 см. При радиусе диска $R = 4$ см точка M в данный момент времени находится на противоположном от точки C конце диаметра. На рис. 3.11 это положение обозначено буквой M_1.

Угловая скорость диска равна модулю производной: $\omega = |\dot{\varphi}| = |2 + 4\cos\pi|$ и при $t_1 = 1$ с $\omega = 2$ рад/с. Направление угловой скорости определяется по знаку производной $\dot{\varphi}$. В данном случае производная имеет отрицательное значение ($\dot{\varphi} = -2$ рад/с). Это означает, что вращение диска происходит в сторону, противоположную положительному направлению отсчёта угла поворота. Направление угловой скорости диска в данный момент времени отмечено на рис. 3.11 дуговой стрелкой ω.

Переносная скорость точки V_e – это скорость точки M_1 на вращающемся диске: $V_e = \omega h_e = \omega \cdot KM_1$, где $KM_1 = h_e$ – расстояние от оси вращения диска до точки M_1. Очевидно, $KM_1 = 0{,}5R = 2$ см. При $t_1 = 1$ с величина переносной скорости $V_e = 4$ см/с. Вектор переносной скорости $\vec{V}_e$ перпендикулярен плоскости диска $O_1M_1O_2$ и направлен в сторону вращения диска (рис. 3.11, *a*).

(На рис. 3.11, *a* символ ⊙ рядом с вектором означает, что данный вектор направлен перпендикулярно плоскости рисунка «к нам», символ ⊕ – «от нас».)

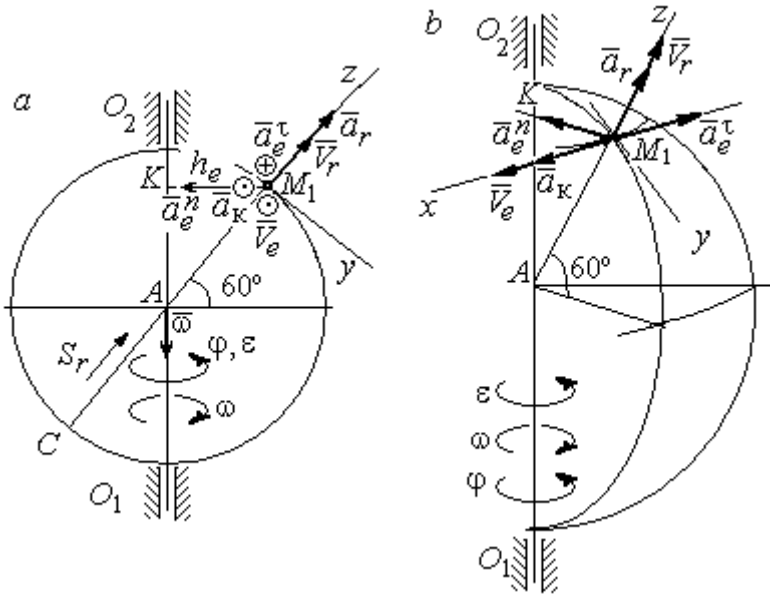


Рис. 3.11. Расчётная схема определения абсолютной скорости и ускорения точки:
a – плоская модель движения;
b – пространственная модель движения

Относительная скорость точки равна модулю производной: $V_r = \left|\dot{S}_r\right| = \left|8(4t - 1)\right|$. При $t_1 = 1$ с $V_r = 24$ см/с. Положительное значение самой производной $\dot{S}_r$ указывает, что относительное движение точки в данный момент времени происходит в положительном направлении. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки в положении M_1 направлен вдоль диаметра диска CM_1 в сторону движения.

Абсолютная скорость точки равна сумме векторов переносной и относительной скоростей: $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Так как векторы $\vec{V}_e$ и $\vec{V}_r$ взаимно перпендикулярны, модуль абсолютной скорости $V = \sqrt{V_e^2 + V_r^2} = 24{,}33$ см/с. Вектор абсолютной скорости на рис. 3.11 не показан.

Абсолютное ускорение точки определяется векторной суммой, которая при прямолинейном относительном и вращательном переносном движениях представляется в виде: $\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n} + \vec{a}_{\text{к}}$.

Относительное ускорение точки $a_r = \left|\ddot{S}_r\right| = 32$ см/с^2. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r$ в точке M_1 направлен по линии движения точки в сторону положительного направления (см. рис. 3.11).

Угловое ускорение диска $\varepsilon = \left|\dot{\omega}\right| = \left|4t - 4\pi\sin\pi t\right|$. В момент времени $t_1 = 1$ с $\varepsilon = 4$ рад/с^2. Положительное значение производной в данный момент времени ($\dot{\omega} = 4$ рад/с^2) означает, что угловое ускорение ε направлено в сторону положительного направления отсчёта угла поворота диска. Направление углового ускорения показано на рис. 3.11 дуговой стрелкой ε. Модуль переносного касательного ускорения a_e^{τ} определяется по формуле $a_e^{\tau} = \varepsilon h_e$, и при $t_1 = 1$ с $a_e^{\tau} = 8$ см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_e^{\tau}$ перпендикулярен плоскости диска $O_1M_1O_2$ в точке M_1 и направлен в сторону углового ускорения (противоположно вектору скорости).

Переносное нормальное ускорение a_e^{n} рассчитывается по формуле $a_e^{n} = \omega^2 h_e = \omega^2 \cdot KM_1$, и при $t_1 = 1$ с $a_e^{n} = 8$ см/с^2. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^{n}$ направлен вдоль отрезка M_1K к оси вращения диска (см. рис. 3.11).

Вектор скорости относительного движения точки $\vec{V}_r$ составляет с вектором угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}$ угол 150º. Модуль ускорения Кориолиса на момент времени $t_1 = 1$ с $a_{\text{к}} = 2\left|\omega\right\|V_r\left|\sin 150^\circ = 48\right.$ см/с^2. Направление вектора ускорения Кориолиса определяем по правилу Жуковского. Так, вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r$ проектируем на плоскость, перпенди-

кулярную вектору $\vec{\omega}$ (т. е. на плоскость, перпендикулярную оси вращения тела). На рис 3.11, *а* это будет проекция на линию KM_1. Далее следует повернуть вектор проекции относительной скорости вокруг оси вращения на 90° в сторону угловой скорости вращения диска. На рис 1.11, *а* вектор ускорения Кориолиса перпендикулярен плоскости рисунка в точке M_1 и направлен «на нас».

Для определения абсолютного ускорения точки выберем оси координат M_1x, M_1y и M_1z, как показано на рис. 3.11 (на рис. 3.11, *а* ось M_1x направлена перпендикулярно рисунку «к нам» и на рисунке не показана). Спроектируем обе части векторного равенства теоремы сложения ускорений на оси

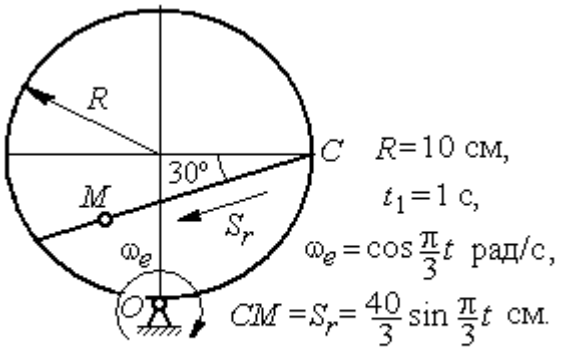
$$a_x = -a_e^{\tau} + a_{\text{к}} = 40 \text{ см/с}^2; \quad a_y = -a_e^n \cos 30^\circ = 6{,}93 \text{ см/с}^2;$$

$$a_z = a_r - a_e^n \cos 60^\circ = 28 \text{ см/с}^2.$$

Модуль абсолютного ускорения $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = 49{,}32$ см/с^2.

Упражнения

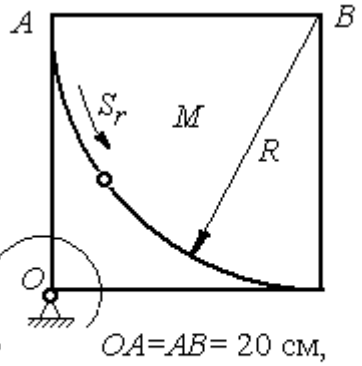
Упражнение 3.1



$R = 10$ см,
$t_1 = 1$ с,
$\omega_e = \cos\frac{\pi}{3}t$ рад/с,
$CM = S_r = \frac{40}{3}\sin\frac{\pi}{3}t$ см.

Найти скорость и ускорение точки M в момент $t = t_1$

Упражнение 3.2



$OA = AB = 20$ см,
$\overset{\smile}{AM} = S_r = 5\pi t^2$ см, $\varphi_e = t^2 - 5t$ рад.
Найти скорость и ускорение точки M в момент $t = t_1 = 1$ с

Рис. 3.12. Задания для самостоятельного решения. Упражнения 3.1, 3.2

4. ДИНАМИКА ТОЧКИ

4.1. Дифференциальные уравнения движения точки

Движение материальной точки под действием системы сил $\vec{F}_1,\ \vec{F}_2,\ldots,\ \vec{F}_K$ в прямоугольной декартовой системе координат *Oxyz* описывается **дифференциальными уравнениями:**

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F_{kx}\ ,\ m\frac{d^2y}{dt^2} = \sum F_{ky}\ ,\ m\frac{d^2z}{dt^2} = \sum F_{kz}\ .$$

Обозначая вторые производные от координат по времени двумя точками, уравнения движения можно записать в виде:

$$m\ddot{x} = \sum F_{kx}\ ;\ m\ddot{y} = \sum F_{ky}\ ;\ m\ddot{z} = \sum F_{kz}\ ,$$

где m – масса точки; x, y, z – текущие координаты точки; $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\ddot{z}$ – проекции вектора ускорения точки на оси координат; $\sum F_{kx}$, $\sum F_{ky}$, $\sum F_{kz}$ – алгебраические суммы проекций всех сил на оси координат.

Для удобства интегрирования дифференциальные уравнения движения иногда представляют в виде:

$$m\frac{dV_x}{dt} = \sum F_{kx}\ ;\ \ m\frac{dV_y}{dt} = \sum F_{ky}\ ;\ \ m\frac{dV_z}{dt} = \sum F_{kz}\ ,$$

где $V_x = \dot{x}$, $V_y = \dot{y}$, $V_z = \dot{z}$ – проекции вектора скорости точки на оси координат.

В естественной системе координат движение материальной точки описывается уравнениями в естественной форме:

$$m\frac{dV}{dt} = \sum F_{k\tau}\ ;\ \ m\frac{V^2}{\rho} = \sum F_{kn}\ ;\ 0 = \sum F_{kb}\ ,$$

где ρ – радиус кривизны траектории; τ, n, b – оси естественного трехгранника – касательная, нормаль и бинормаль.

В общем случае правые части дифференциальных уравнений зависят от времени, положения и скорости точки. Интегрирование дифференциальных

уравнений производится в зависимости от их вида методами, известными из курса математики.

Примеры решения задач на интегрирование уравнений движения

Задача 41. При обогащении по трению разделение частиц производится следующим образом. Барабанный питатель (рис. 4.1) сообщает частице в точке A сортировочного стола AB начальную скорость V_0, направленную вдоль поверхности стола, наклоненного под углом α к горизонту. Нижний край стола в точке B поднят на высоту h над уровнем пола. Частица скользит по столу, испытывая силу трения скольжения с коэффициентом трения f. Дойдя до края стола в точке B, частица отрывается от него и совершает свободное падение с высоты h. На каком расстоянии $CK = \ell$ на полу нужно установить стенку приёмного устройства, чтобы частицы с коэффициентом трения меньше заданного $f < f_1$ перелетали за точку C и попадали в приёмник, а с большим коэффициентом $f > f_1$ – не долетали до него.

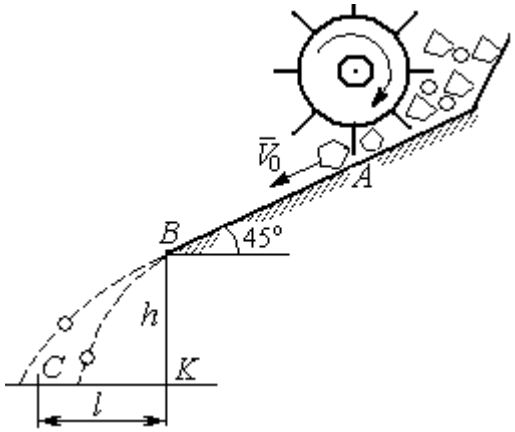


Рис. 4.1. Разделение частиц по трению

Начальная скорость частицы $V_0 = 1$ м/с, длина сортировочного стола $AB = S = 1{,}2$ м, угол наклона $\alpha = 45°$, высота точки отрыва $BK = h = 1{,}5$ м, заданный коэффициент трения для разделения частиц $f_1 = 0{,}4$.

Решение

Из условия задачи следует, что частица с коэффициентом трения, равным заданному, $f = f_1$ в конце своего движения (скольжение по столу + свободное падение) должна попасть ровно в точку C (см. рис. 4.1).

Рассмотрим первый участок движения такой частицы – прямолинейное движение по шероховатой поверхности наклонного стола. На частицу действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция опоры $\vec{N}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$. Выберем систему координат *xAy*, направив ось *x* вдоль линии движения, а ось *y* – перпендикулярно ей (рис. 4.2). Движение частицы описывается уравнениями:

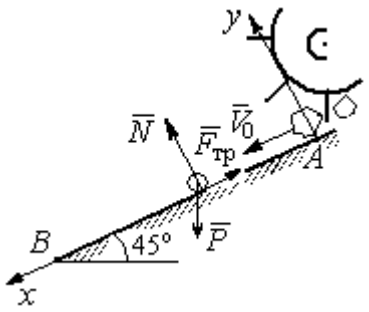


Рис. 4.2. Движение частицы по наклонной плоскости

$$m\ddot{x} = \sum F_{kx} = P\cos 45^\circ - F_{\text{тр}};$$

$$m\ddot{y} = \sum F_{ky} = -P\cos 45^\circ + N.$$

Поскольку вдоль оси *y* частица не перемещается, то $\ddot{y} = 0$. Тогда второе уравнение движения представляется в виде: $-P\cos 45^\circ + N = 0$, откуда реакция опоры частицы $N = mg\cos 45^\circ$. Сила трения, которую испытывает частица, двигаясь по сортировочному столу: $F_{\text{тр}} = fN = fmg\cos 45^\circ$, где f – коэффициент трения.

Подставляя в уравнение движения частицы, выражение силы трения и полагая ускорение $\ddot{x} = \dfrac{dV_x}{dt}$, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dV_x}{dt} = g(1-f)\cos 45^\circ \text{ или при } f = f_1 = 0{,}4: \ \frac{dV_x}{dt} = 4{,}18.$$

После интегрирования найдём скорость и закон движения частицы как функции времени: $V_x = 4{,}18t + C_1$; $x = 2{,}09t^2 + C_1 t + C_2$.

Константы интегрирования C_1, C_2 находятся из начальных условий движения. Подставляя начальные условия $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = V_x(0) = V_0$ в уравнение движения частицы, найдём $C_2 = 0$, $C_1 = V_0$.

Окончательно движение частицы на прямолинейном участке *AB* сортировочного стола описывается системой уравнений: $V_x = 4{,}18t + 1$; $x = 2{,}09t^2 + t$.

Допустим частица достигает края стола B в момент времени $t = t_B$. Её координата равна длине сортировочного стола: $x(t_B) = S$, а скорость равна скорости отрыва её от стола: $V_x(t_B) = V_B$. Подставим эти условия в уравнения движения, получим систему: $V_B = 4{,}18t_B + 1$, $S = 2{,}09t_B^2 + t_B$, откуда скорость частицы в точке отрыва её от стола $V_B = \sqrt{1 + 8{,}36S}$. При длине стола S = 1,2 м скорость отрыва V_B = 3,32 м/с.

Рассмотрим участок BC свободного падения частицы, брошенной с высоты h с начальной скоростью V_B, направленной под углом 45° к горизонту (рис. 4.3). В полёте на частицу действует только сила тяжести $\vec{P}$. Выберем прямоугольную систему координат xKy с началом координат в точке K (см. рис. 4.3). Дифференциальные уравнения движения точки

$$m\ddot{x} = 0;\ m\ddot{y} = -P = -mg \text{ или } \ddot{x} = 0,\ \ddot{y} = -g.$$

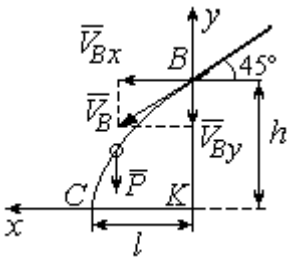


Рис. 4.3. Свободное падение частицы

Интегрируя первое уравнение, получим, что движение частицы вдоль оси x описывается уравнениями $\dot{x} = C_3;\ x = C_3t + C_4$. Константы интегрирования C_3 и C_4. определяются из начальных условий движения: при t = 0 , $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = V_{Bx}$, где V_{Bx} – проекция вектора скорости $\overline{V}_B$ на ось x, $V_{Bx} = V_B\cos45^\circ$ = 2,35 м/с. После подстановки начальных условий в уравнение движения частицы получим: C_4 = 0, C_3 = 2,35. В результате, движение частицы вдоль оси x при её свободном падении описывается уравнением $x = 2{,}35t$.

Проинтегрируем уравнение движения частицы в направлении оси y. Получим: $\dot{y} = -gt + C_5$ и $y = -g\dfrac{t^2}{2} + C_5t + C_6$. Начальные условия движения частицы вдоль оси y: при t = 0 , $y(0) = h$ = 1,5 м, $\dot{y}(0) = V_{By} = -V_B\cos45^\circ = -2{,}35$ м/с, где V_{By} – проекция вектора скорости $\overline{V}_B$ на ось y. Подставляя начальные

условия в уравнение движения, найдём: $C_6 = h$; $C_5 = V_{By} = -2{,}35$. Таким образом, движение частицы вдоль оси y при её свободном падении описывается уравнением $y = -4{,}91t^2 - 2{,}35t + 1{,}5$.

В момент $t = t_{\text{п}}$ падения частицы на пол её вертикальная координата обращается в нуль: $y = 0$, а горизонтальная – равна дальности полёта: $x = \ell$. Подставляя эти условия в уравнения движения частицы, получим систему:

$$\ell = 2{,}35t_{\text{п}},\ 0 = -4{,}91t_{\text{п}}^2 - 2{,}35t_{\text{п}} + 1{,}5.$$

Исключая в системе время $t_{\text{п}}$, выразим уравнение для определения дальности горизонтального полёта: $\ell^2 + 1{,}12\ell - 1{,}68 = 0$. Отсюда находим: $\ell = 0{,}85$ м.

Таким образом, частицы с коэффициентом трения $f = 0{,}4$ в конце своего движения падают на горизонтальную поверхность на расстоянии 0,85 м от края стола. Очевидно, именно здесь необходимо установить разделительную стенку приёмного устройства. Частицы с меньшим коэффициентом трения ($f < 0{,}4$) будут улетать за стенку, а при большем ($f > 0{,}4$) – недолетать. К примеру, длина горизонтального полёта частицы с коэффициентом трения $f = 0{,}3$ составляет 0,89 м, а при $f = 0{,}5$ равна 0,61 м.

Задача 42. Материальная точка массой $m = 1$ кг движется прямолинейно по горизонтальной поверхности под действием силы $F = 10 - kt$ Н, где k – коэффициент пропорциональности; $k = \text{const}$; t – время в секундах. Определить величину коэффициента k, при котором скорость точки за первую секунду от начала движения увеличится от начального значения $V_0 = 2$ м/с до величины $V_1 = 10$ м/с, а также путь, пройденный точкой до остановки.

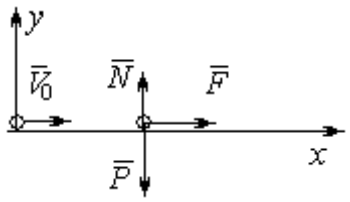


Рис. 4.4. Прямолинейное движение точки

Решение

Для описания движения точки выберем прямоугольную систему координат x, y с началом в том месте, откуда точка начала движение (рис. 4.4).

На точку действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция опоры $\vec{N}$ и заданная сила $\vec{F}$. Направление силы $\vec{F}$ на рис. 4.4 соответствует начальному этапу движения, когда проекция силы на ось *x* положительная. Движение точки описывается уравнением $m\ddot{x} = F_x = 10 - kt$.

Положим $\ddot{x} = \frac{dV}{dt}$. Здесь в силу того, что движение происходит только вдоль одной координаты, индекс *x* у скорости опущен. Учитывая массу точки, получим уравнение $\frac{dV}{dt} = 10 - kt$. Разделив переменные и проинтегрировав полученное уравнение, найдём закон изменения скорости точки $V = 10t - k\frac{t^2}{2} + C_1$. Выражая скорость через производную от координаты $V = \frac{dx}{dt}$, получим дифференциальное уравнение $\frac{dx}{dt} = 10t - k\frac{t^2}{2} + C_1$, интегрируя которое, найдём уравнение движения точки $x = 5t^2 - k\frac{t^3}{6} + C_1 t + C_2$.

Подставляя начальные условия (при $t = 0$, $V = V_0 = 2$ м/с, $x = 0$) в уравнения, получим: $C_1 = 2$, $C_2 = 0$. Окончательно движение точки описывается системой уравнений: $V = 10t - k\frac{t^2}{2} + 2$; $x = 5t^2 - k\frac{t^3}{6} + 2t$.

Известно, что через 1 с от начала движения точка приобрела скорость $V_1 = 10$ м/с. Подставляя это условие в первое уравнение, найдём $k = 4$.

В момент t_1 точка остановилась и её скорость обращается в нуль: $V(t_1) = 0$, а координата равна пройденному пути: $x(t_1) = S$. Подставляя эти условия в уравнения движения с учетом вычисленного значения коэффициента *k*, получим систему: $0 = 10t_1 - 2t_1^2 + 2$; $S = 5t_1^2 - \frac{2}{3}t_1^3 + 2t_1$, откуда находим путь, пройденный точкой до остановки: $S = 51{,}86$ м.

Задача 43. Материальная точка массой m = 1 кг, находясь на высоте h_1 = 2 м над уровнем Земли, подброшена вертикально вверх (ось x) с начальной скоростью V_0 = 4 м/с (рис. 4.5, *a*). При движении на точку действует сила сопротивления, пропорциональная квадрату скорости, так, что проекция её на вертикаль направлена в сторону, противоположную движению, $R_x = -0{,}5mV^2$ Н, где V – скорость точки. Определить, на какой высоте h_2 от уровня Земли скорость падающей обратно точки достигнет значения начальной стартовой скорости.

Решение

Решение задачи осуществляется в два этапа. На первом этапе рассматривается движение точки вверх с высоты h_1 с начальной скоростью V_0 и определение максимальной высоты полёта H, на втором этапе – падение точки вниз с высоты H без начальной скорости (рис. 4.5, *b*).

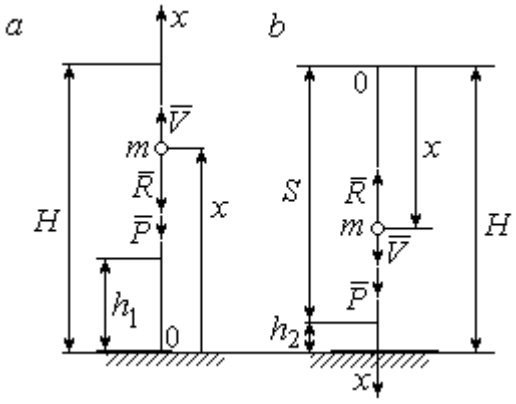


Рис. 4.5. Силы, действующие на точку в полёте:
a – движение точки вверх;
b – движение точки вниз

Рассмотрим первый этап движения и найдём максимальную высоту подъёма точки. На рис. 4.5, *a* показаны силы, действующие на точку в полёте: сила тяжести $\vec{P}$ и сила сопротивления $\vec{R}$. Ось x, вдоль которой происходит движение точки, выбрана по направлению движения, начало координат – на уровне Земли (см. рис. 4.5, *a*).

Дифференциальное уравнение движения точки в проекции на ось x: $m\ddot{x} = \sum F_x = P_x + R_x$, где проекции сил тяжести и сопротивления на ось x: $P_x = -P = -mg$; $R_x = -0{,}5mV^2$. Полагая $\ddot{x} = \dfrac{dV}{dt}$, получим уравнение движения точки в виде: $\dfrac{dV}{dt} = -(g + 0{,}5V^2)$.

Учитывая, что $\frac{dV}{dt}=\frac{dV}{dx}\frac{dx}{dt}=V\frac{dV}{dx}=\frac{dV^2}{2dx}$, исходное уравнение движения представляется в виде, удобном для интегрирования: $\frac{dV^2}{g+0{,}5V^2}=-2dx$.

Проинтегрировав это уравнение, находим: $\ln(g+0{,}5V^2)=-x+C$.

В начальном положении, т. е. при $t = 0$, точка находилась на высоте $x = h_1$, а скорость её $V = V_0$. Подставив эти значения в проинтегрированное уравнение, получим: $C=h_1+\ln(g+0{,}5V_0^2)$. Окончательно положение точки в полёте определяется выражением $x=h_1+\ln\left(\frac{g+0{,}5V_0^2}{g+0{,}5V^2}\right)$.

При максимальном подъёме точки, т. е. при $x=H$, её скорость обращается в нуль: $V = 0$. Подставляя H, получим: $H=h_1+\ln\left(1+\frac{V_0^2}{2g}\right)$. При начальной скорости $V_0 = 4$ м/с, с учётом высоты точки старта $h_1 = 2$ м, высота подъёма точки относительно уровня Земли $H = 2{,}6$ м.

Рассмотрим второй этап решения задачи – движение точки вниз с максимальной высоты H без начальной скорости. Выберем ось x по направлению движения и поместим начало координат в точке, откуда началось движение вниз (рис. 4.5, *b*). Дифференциальное уравнение движения падающей точки: $m\frac{dV}{dt}=P_x+R_x = mg-0{,}5mV^2$, которое, как и в предыдущем случае, приводится к виду: $\frac{dV^2}{g-0{,}5V^2}=2dx$.

Проинтегрировав это уравнение, находим: $\ln(g-0{,}5V^2)=-x+C_1$.

В начальном положении, т. е. при $t = 0$, координата точки и скорость равны нулю: $x = 0$, $V = 0$. Подставив эти значения, находим: $C_1=\ln g$.

Окончательно положение падающей точки определяется выражением $x = \ln\left(\frac{g}{g - 0{,}5V^2}\right)$.

Расстояние S, которое пролетела точка с высоты H, приобретя скорость, V_0: $S = \ln\left(\frac{g}{g - 0{,}5V_0^2}\right)$. Высота h_2 этого положения от уровня Земли: $h_2 = H - S$ (см. рис. 4.5, *b*). С учётом величины начальной скорости $V_0 = 4$ м/с, максимальной высоты подъёма точки $H = 2{,}6$ м высота $h_2 = 0{,}91$ м.

Задача 44. Точка 1 движется горизонтально с постоянной скоростью V_1 на высоте h. Точка 2 массой m_2 находится в начале координат (рис. 4.6).

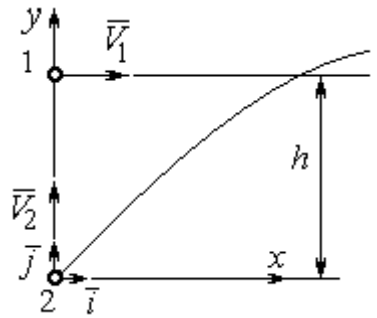


Рис. 4.6. Схема встречного движения точек

В момент, когда обе точки находились на одной вертикали y, точка 2 стартовала вертикально вверх со скоростью V_2. В полёте на точку 2 действует отклоняющая сила $\vec{F}_2$, которая представлена в виде разложения по единичным векторам $\vec{i}$, $\vec{j}$ системы координат xy: $\vec{F}_2 = p\vec{i} + q\vec{j}$, где p, q – const. С какой скоростью V_2 должна стартовать точка 2, чтобы обе точки встретились.

Решение

Рассмотрим движение точки 2. На точку действует сила тяжести $\vec{P}_2$ и сила $\vec{F}_2$, проекции которой на оси x, y: $F_{2x} = p$, $F_{2y} = q$ (рис. 4.7).

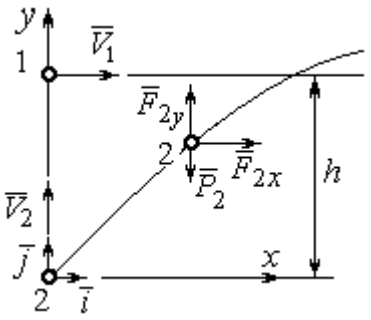


Рис. 4.7. Расчётная схема встречи точек

Уравнения движения точки в проекциях на оси xy имеют вид:

$$m_2\ddot{x} = p,\ m_2\ddot{y} = q - m_2 g.$$

Дважды интегрируя первое уравнение, полу-

чим: $\dot{x} = \frac{p}{m_2}t + C_1$; $x = \frac{p}{2m_2}t^2 + C_1 t + C_2$. Константы интегрирования найдём из условия, что в начальный момент вторая точка стартовала из начала координат вертикально, то есть при $t = 0$ $x = 0$ и $\dot{x} = V_{2x} = 0$. Подставляя начальные условия в уравнения движения, получим: $C_1 = 0$, $C_2 = 0$. Таким образом, движение точки 2 вдоль оси x описывается уравнением $x = \frac{p}{2m_2}t^2$.

Аналогично, дважды интегрируя второе уравнение движения, получим зависимость скорости движения точки 2 от времени и закон её движения вдоль оси y: $\dot{y} = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)t + C_3$; $y = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t^2}{2} + C_3 t + C_4$. Из начальных условий: при $t = 0$ $y = 0$, $\dot{y} = V_{2y} = V_2$ следует: $C_3 = V_2$, $C_4 = 0$.

В результате закон движения точки 2 вдоль оси y: $y = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t^2}{2} + V_2 t$.

Обозначим t_1 – время движения точек до встречи. В момент встречи высота точки 2 $y(t_1) = h$, а расстояние по горизонтали, которое прошла точка 2 до встречи, должно быть равно расстоянию, пройденному точкой 1 за это же время. Подставляя условия встречи в уравнения движения, получим систему:

$$V_1 t_1 = \frac{p}{2m_2}t_1^2; \qquad h = \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t_1^2}{2} + V_2 t_1,$$

откуда найдём: $V_2 = \frac{h}{t_1} - \left(\frac{q}{m_2} - g\right)\frac{t_1}{2}$, где $t_1 = \frac{2V_1 m_2}{p}$.

Упражнения

Упражнение 4.1. Тело массы m = 2 кг поднимается по прямой по шероховатой поверхности, составляющей угол 30° с горизонтом. Коэффициент трения f = 0,4. На тело действует сила $F = kt + 0{,}5P$, направленная в сторону движения, параллельно плоскости. Определить величину коэффициента k и начальную скорость тела, направленную вверх по наклонной плоскости, если за первую секунду тело прошло путь S = 2 м, а скорость увеличилась вдвое относительно начальной.

Упражнение 4.2. Материальную точку массы m = 1 кг, находящуюся на высоте H = 10 м над уровнем Земли, бросили под углом φ = 30° к горизонту с начальной скоростью V_0. Свободное движение точки происходит в вертикальной плоскости. Определить начальную скорость V_0 и горизонтальную дальность полета l при падении точки на Землю, если высоту h =7 м она пересекла через 1 с от начала движения.

4.2. Колебания материальной точки

Если материальная точка массой m движется вдоль оси Оx под действием линейной восстанавливающей силы, равной $F = cx$, где c – постоянный коэффициент, x – отклонение точки от положения равновесия, куда поместили начало координат, то дифференциальное уравнение свободных прямолинейных колебаний имеет вид:

$$m\ddot{x} + cx = 0, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,\ \omega^2 = \frac{c}{m},$$

где ω – угловая частота колебаний.

Решение дифференциального уравнения свободных колебаний представляется в виде $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$. Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных условий.

Если кроме восстанавливающей силы на материальную точку действует переменная возмущающая сила, колебания точки называются **вынужденными.** В случае гармонического возмущения $Q = H\sin pt$, где H, p – амплитуда и угловая частота возмущающей силы, дифференциальное уравнение вынужденных колебаний материальной точки относительно положения равновесия

$$m\ddot{x} + cx = H\sin pt, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt,\ \omega^2 = \frac{c}{m},\ h = \frac{H}{m}$$

где ω – угловая частота собственных колебаний; h – относительная амплитуда возмущающей силы.

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения вынужденных колебаний при отсутствии резонанса (частота собственных колебаний точки не совпадает с частотой возмущающей силы $p \neq \omega$) имеет вид:

$x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \dfrac{h}{\omega^2 - p^2}\sin pt$, а в случае возникновения резонанса ($p = \omega$) определяется формулой: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t - \dfrac{ht}{2p}\cos pt$. Значения произвольных постоянных C_1 и C_2 находятся с учётом начальных условий движения.

Колебания груза на двух параллельных пружинах с жесткостью c_1 и c_2 можно рассматривать как колебания груза на одной пружине с эквивалентной жесткостью $c_{экв} = c_1 + c_2$, где $c_{экв}$ – жесткость эквивалентной пружины. При последовательном соединении пружин коэффициент жесткости эквивалентной пружины $c_{экв} = \dfrac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$.

Примеры решения задач на колебания точки

Задача 45. Подъёмное устройство (рис. 4.8) опускает груз Q массой $m = 400$ кг в шахту при помощи упругого троса с коэффициентом жесткости $c = 8 \cdot 10^4$ Н/м с постоянной скоростью $V = 10$ м/с. В некоторый момент во время спуска трос защемило в блоке. Пренебрегая массой троса, определить дальнейшее движение груза и найти максимальную силу натяжения троса.

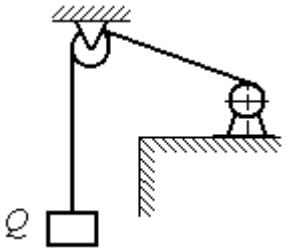


Рис. 4.8. Подъёмное устройство

Решение

После того как произошло защемление троса в обойме блока, вертикальную часть троса длиной ℓ_0 можно рассматривать как пружину с закреплённым верхним концом, а груз – материальной точкой.

Расчетная схема колебаний груза Q на пружине показана на рис. 4.9.

Ось *Ox*, вдоль которой происходят колебания груза, направлена вертикально вниз. Начало отсчёта координаты *x* (точка *O*) выбрано в положении нерастянутой пружины.

На рис. 4.9, *a* положение нерастянутой пружины соответствует положению груза на тросе в момент его защемления. В произвольном положении груза (рис. 4.9, *b*), обозначенном координатой *x*, к нему приложены две силы: сила тяжести $\vec{Q}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$. Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*: $F_{\text{упр}\,x} = -c\Delta\ell = -cx$, где $\Delta\ell$ – удлинение пружины. Дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox* имеет вид: $m\ddot{x} = Q - cx$. В результате получаем неоднородное дифференциальное уравнение колебаний:

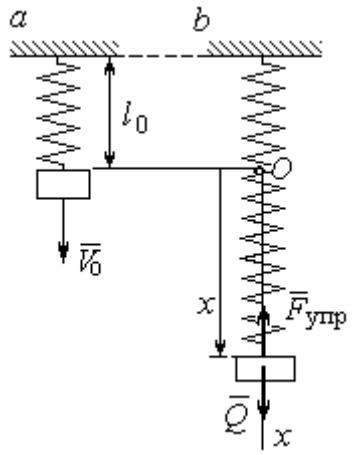


Рис. 4.9. Расчётная схема колебаний груза:
a – положение груза на начало колебаний; *b* – положение груза в произвольный момент времени

$$m\ddot{x} + cx = mg \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = g,$$

где ω – угловая частота собственных колебаний, $\omega = \sqrt{\dfrac{c}{m}} = 14{,}14$ рад/с.

Решение неоднородного дифференциального уравнения представляется в виде $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \dfrac{g}{\omega^2}$, где первые два слагаемых представляют общее решения однородного уравнения, последнее – частное решение неоднородного

Для определения произвольных постоянных C_1 и C_2 используем начальные условия движения: при $t = 0$ груз находился в положении $x = 0$, а его скорость равнялась скорости груза $\dot{x} = V_0 = 10$ м/с. Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения колебаний, полу-

чим: $C_1 = -\frac{g}{\omega^2} = -0{,}69$ м. Для определения второй константы вычислим скорость груза: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t$. Подставив начальное значение скорости груза при $t = 0$, получим: $C_2 = \frac{V_0}{\omega} = 0{,}71$ м. Окончательно, движение груза после защемления троса в обойме блока описывается уравнением

$$x = -0{,}69\cos 14{,}14t + 0{,}71\sin 14{,}14t + 0{,}69.$$

Представим уравнение колебаний в виде $x = A\sin(\omega t + \alpha) + \frac{g}{\omega^2}$, где A – амплитуда собственных колебаний груза $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$, α – фаза колебаний; $\operatorname{tg}\alpha = \frac{C_1}{C_2}$. Максимальное растяжение троса равно максимальному значению координаты груза: $x_{\max} = \max[A\sin(\omega t + \alpha) + \frac{g}{\omega^2}] = A + \frac{g}{\omega^2} = 1{,}68$ м. Соответственно, максимальное усилие в тросе равно значению силы упругости при максимальном растяжении: $F_{\text{упр max}} = cx_{\max} = 134{,}4$ кН.

Задача 46. Рабочий орган вибрационной машины представляет собой массивное тело, расположенное на гладкой наклонной плоскости между двумя пружинами (см. рис. 4.10). Угол наклона плоскости к горизонту 60º. Масса груза $m = 9$ кг. Пружины, зажимающие груз, имеют коэффициенты жесткости $c_1 = 300$ Н/м и $c_2 = 600$ Н/м.

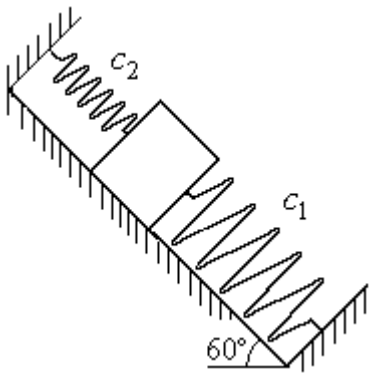


Рис. 4.10. Колебания груза на наклонной плоскости

В начальный момент груз, когда пружины не деформированы, груз оттягивают вниз по наклонной плоскости на расстояние $\Delta\ell = 0{,}12$ м и отпускают без начальной скорости.

Найти период колебаний, амплитуду и уравнение движения груза.

Решение

Колебания груза, зажатого между двумя пружинами, представим как колебания груза, прикреплённого к одной пружине эквивалентной жёсткости: $c_э = c_1 + c_2$ = 900 Н/м (рис. 4.11). Ось, вдоль которой происходят колебания, направим вниз по наклонной плоскости. Начало отсчёта координаты груза x выберем в положении его статического равновесия (точка O) (см. рис. 4.11).

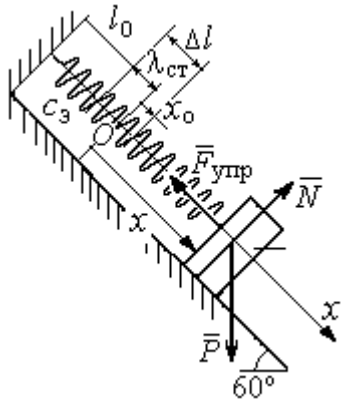


Рис. 4.11. Схема колебаний груза на эквивалентной пружине

Дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось Ox: $m\ddot{x} = P_x - F_{упр\,x}$. Проекция силы упругости пружины на ось Ox: $F_{упр\,x} = -c_э \Delta\ell$, где $\Delta\ell = (x + \lambda_{ст})$ – удлинение пружины, включающее её растяжение $\lambda_{ст}$ относительно положения нерастянутой пружины и растяжение x относительно начала координат.

Удлинение пружины $\lambda_{ст}$ определяется из условия равновесия груза на наклонной плоскости в положении статического равновесия:

$$P\cos 30^\circ - F_{упр} = 0{,}87mg - c_э\lambda_{ст} = 0.$$

Находим $\lambda_{ст} = \dfrac{0{,}87mg}{c_э} = 0{,}085$ м.

Подставляя выражение силы упругости, с учётом условия статического равновесия груза ($0{,}87mg = c_э\lambda_{ст}$), получим дифференциальное уравнение колебаний: $m\ddot{x} = -c_э x$ или $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$, где ω – угловая частота собственных колебаний груза, $\omega = \sqrt{\dfrac{c_э}{m}} = 10$ рад/с.

Общее решение уравнения колебаний $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$.

Для определения произвольных постоянных C_1 и C_2 вычислим начальные условия движения груза.

Координата начального положения груза на оси Ox (см. рис. 4.11) $x_0 = \Delta\ell - \lambda_{ст} = 0{,}035$ м. Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения колебаний при $t = 0$, получим: $C_1 = x_0 = 0{,}035$ м. Для определения второй константы вычислим скорость груза: $\dot{x} = -C_1\omega_2 \sin\omega_2 t + C_2\omega_2 \cos\omega_2 t$. Подставив начальное значение скорости груза: при $t = 0$ $\dot{x} = V_0 = 0$, получим $C_2 = 0$. Окончательно уравнение движения груза относительно его положения статического равновесия $x(t) = 0{,}035\cos 10t$ м. Амплитуда колебаний $A = 0{,}035$ м. Период колебаний $T = \dfrac{2\pi}{\omega} = 0{,}63$ с.

Задача 47. Пружинный амортизатор состоит из двух одинаковых вертикально стоящих пружин, к верхним концам которых прикреплена невесомая горизонтальная площадка (рис. 4.12). Жёсткость каждой пружины c = 350 Н/м. Груз массой m = 5 кг падает с высоты h = 0,3 м.

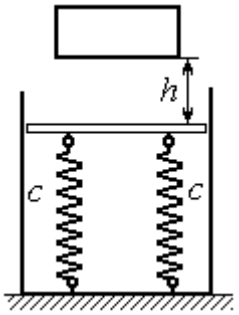


Рис. 4.12. Пружинный амортизатор

Коснувшись площадки, груз начинает двигаться вместе с ней. Определить максимальную осадку амортизатора и уравнение движения груза.

Решение

Заменим две пружины амортизатора одной с жесткостью, эквивалентной двум пружинам: $c_э = 2c$ = 700 Н/м. Расчётная схема колебаний груза показана на рис. 4.13. Начало координат оси x (точка O), вдоль которой происходят колебания, выбрано на уровне статического равновесия груза.

При движении (на рис. 4.13, *c* предполагается движение груза вниз) на груз действуют сила упругости $\vec{F}_{упр}$ и сила тяжести $\vec{P}$. Уравнение движения груза в проекции на ось x: $m\ddot{x} = P - F_{упр} = P - c_э\Delta\ell$, где $\Delta\ell$ – удлинение (или сжатие) пружины относительно недеформированного состояния.

В произвольном положении груза, обозначенном координатой x (см. рис. 4.13, *c*), сжатие пружины относительно её недеформированного состояния (см. рис. 4.13, *a*) составляет величину: $\Delta\ell = x + \lambda_{ст}$. Величина $\lambda_{ст}$ находится из условия статического равновесия груза, которое выражается равенством (рис. 4.13, *b*): $P - F_{упр\,ст} = P - c_э\lambda_{ст} = 0$.

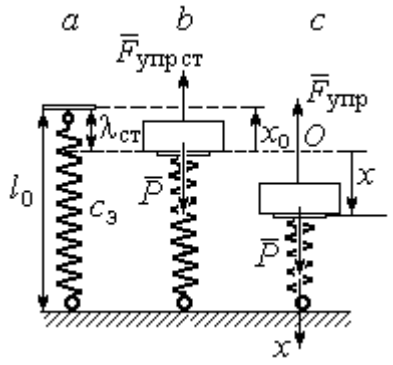


Рис. 4.13. Расчётная схема колебаний на эквивалентной пружине:
a – недеформированная пружина;
b – положение статического равновесия груза; *c* – произвольное положение

Подставляя это условие в уравнение движения груза, получим дифференциальное уравнение колебаний: $m\ddot{x} + c_э x = 0$ или $m\ddot{x} + \omega^2 x = 0$, где $\omega = \sqrt{\dfrac{c_э}{m}}$ = 11,83 рад/с – угловая частота колебаний.

Общее решение однородного уравнения колебаний представляется в виде $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$, где C_1 и C_2 – произвольные постоянные, вычисляемые по начальным условиям движения груза.

По условию задачи груз падает на площадку, установленную на недеформированных пружинах. Это означает, что начальная координата груза при его движении на пружинах соответствует положению недеформированной пружины: $x_0 = -\lambda_{ст} = -\dfrac{mg}{c_э} = -0{,}07$ м.

Начальная скорость колебаний груза равна скорости груза при падении его с высоты 1 м. Интегрируя уравнение движения груза во время падения $m\ddot{s} = mg$, где s – путь, пройденный телом, получим зависимость скорости от пройденного пути: $V^2 = 2gs$. Полагая s = 0,3, найдём скорость груза при его встрече с площадкой: V = 2,43 м/с. Проекция начальной скорости колебаний груза на ось x положительна: $V_{0x} = V$ = 2,43 м/с.

Подставив начальные условия в общее решение уравнения колебаний, получим: $C_1 = x_0 = -0{,}07$ м; $C_2 = \frac{V_{0x}}{\omega} = 0{,}2$ м. Окончательно уравнение колебаний груза на амортизаторе $x = -0{,}07\cos 11{,}83t + 0{,}2\sin 11{,}83t$. Амплитуда колебаний $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = 0{,}21$ м. Проседание амортизатора H отсчитывается от положения нерастянутых пружин: $H = A + \lambda_{ст} = 0{,}28$ м.

Задача 48. Для регистрации (записи) вертикальных колебаний тяжёлых платформ используется пружинный виброграф (рис. 4.14). Схема действия прибора состоит в следующем. Массивная платформа A совершает вертикальные гармонические колебания по закону $\xi = \xi(t)$. На платформе установлена вертикальная стойка с горизонтальной перекладиной, к которой прикреплена пружина жесткостью c. К нижнему концу пружины подвешен груз P массой m с индикаторной стрелкой B (см. рис. 4.14). Вертикальная шкала индикаторной стрелки закреплена на платформе A. В начальный момент груз на пружине находился в покое в положении статического равновесия. Определить закон колебаний стрелки B вдоль шкалы, если масса груза m = 1 кг, жесткость пружины c = 10 Н/м, платформа совершает вертикальные колебания по закону $\xi = a\sin pt$ см, где амплитуда a = 0,02 м, частота колебаний платформы p = 7 рад/с.

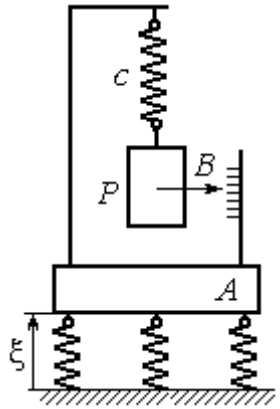


Рис.4.14. Регистратор вертикальных колебаний

Решение

Выберем неподвижную ось x, связанную, например, с неподвижной поверхностью, на которой стоит платформа. Начало координат – точку O выберем на уровне статического равновесия груза на пружине при неподвижной платформе. Произвольное положение груза отмечено координатой x (рис. 4.15).

Растяжение пружины при неподвижной платформе составляет величину $x+\lambda_{ст}$, где $\lambda_{ст}$ – удлинение пружины в положении статического равновесия груза, определяемое из условия $P-c\lambda_{ст}=0$. Вместе с тем колебание платформы вызывает аналогичное смещение точки подвеса пружины. В результате растяжение пружины при произвольном положении груза равно сумме: $\Delta\ell=(x+\lambda_{ст}+\xi)$.

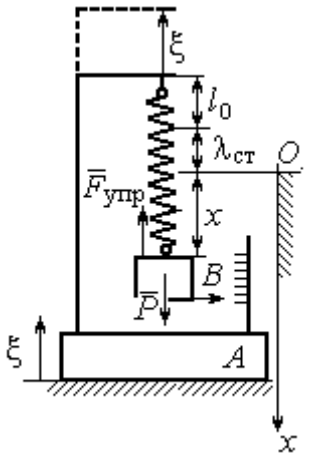


Рис. 4.15. Расчётная схема колебаний груза

На груз действуют сила тяжести $\vec{P}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{упр}$. Дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*: $m\ddot{x}=P_x+F_{упр\,x}$, где проекции $P_x=P$, $F_{упр\,x}=-c\Delta\ell=-c(x+\lambda_{ст}+\xi)$. Расчётная схема колебаний груза показана на рис. 4.15.

С учётом условия статического равновесия груза $P-c\lambda_{ст}=0$ получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний груза в виде:

$$\ddot{x}+\omega^2x=-h\sin pt,$$

где ω – угловая частота собственных колебаний груза, $\omega=\sqrt{\dfrac{c}{m}}=3{,}16$ рад/с;

h – относительная амплитуда вынужденных колебаний, $h=\dfrac{ca}{m}$ = 0,2 м/с^2;

p – угловая частота вынужденных колебаний, p = 7 рад/с.

Решение уравнения вынужденных колебаний представляется суммой $x=x_1+x_2$, где x_1 является общим решением однородного уравнения $\ddot{x}_1+\omega^2x_1=0$, а x_2 – частное решение уравнения вынужденных колебаний: $\ddot{x}_2+\omega^2x_2=-h\sin pt$.

Решив однородное уравнение, находим: $x_1=C_1\cos\omega t+C_2\sin\omega t$.

При отсутствии резонанса (а в данном случае частота вынужденных колебаний груза не совпадает с частотой собственных $\omega \neq p$) частное решение уравнения вынужденных колебаний ищем в виде $x_2 = b\sin pt$. Подставляя частное решение в уравнение вынужденных колебаний, получим уравнение $-bp^2\sin pt + \omega^2 b\sin pt = -h\sin pt$, откуда находим коэффициент: $b = \dfrac{h}{p^2 - \omega^2}$.

В результате общее решение уравнения колебаний принимает вид:

$$x = x_1 + x_2 = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \frac{h}{p^2 - \omega^2}\sin pt,$$

где константы C_1 и C_2 подлежат определению.

В начальный момент груз находился на пружине в положении статического равновесия, и потому его начальная координата и скорость равны нулю Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения вынужденных колебаний при t = 0, получим C_1= 0. Для определения второй константы вычислим скорость груза в произвольный момент времени: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t + \dfrac{hp}{p^2 - \omega^2}\cos pt$. Подставив начальное значение скорости груза, найдём $C_2 = -\dfrac{hp}{\omega(p^2 - \omega^2)} = -0{,}01$ м.

Таким образом, колебания груза относительно неподвижной системы координат описываются уравнением $x = -0{,}01\sin 3{,}16t + 0{,}05\sin 7t$ и представляют абсолютное движение груза. Для того чтобы найти закон движения груза относительно платформы – относительное движение, нужно из его абсолютного движения исключить переносное – колебания платформы. Поскольку стрелка прибора закреплена на грузе, а шкала – на платформе, то закон движения стрелки относительно шкалы:

$$x_r = x - \xi = -0{,}01\sin 3{,}16t + 0{,}05\sin 7t - 0{,}02\sin 7t = -0{,}01\sin 3{,}16t + 0{,}03\sin 7t.$$

Упражнения

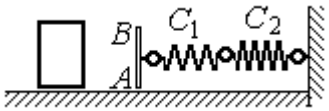


Рис. 4.16. Схема движения груза

Упражнение 4.3. Груз массы m = 0,5 кг, получив начальную скорость V_0 = 6 м/с, движется по горизонтальной поверхности, испытывая силу сопротивления, равную по величине $F = kV$ и направленную в сторону, противоположную движению. Через 1 с груз соединяется с невесомой вертикальной площадкой AB и продолжает движение вместе с ней, уже без сопротивления. К площадке прикреплены две горизонтальные последовательно соединённые пружины жёсткостью C_1 = 120 и C_2 = 40 Н/м (рис. 4.16).

Найти величину максимального сжатия пружины, если k = 0,5 Н/м/с. Определить закон движения груза.

Упражнение 4.4. Груз массы m =1 кг прикреплен к конструкции, состоящей из трёх вертикальных пружин одинаковой жёсткости C = 160 Н/м (рис. 4.17), и находится в равновесии. В некоторый момент времени грузу сообщают скорость V = 4 м/с, направленную вверх.

Найти амплитуду и частоту колебаний груза.

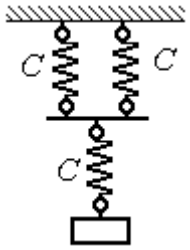


Рис. 4.17. Схема крепления груза на пружинах

4.3. Теорема об изменении кинетической энергии точки

Работой постоянной по величине и направлению силы $\vec{F}$ на прямолинейном перемещении точки приложения силы M (рис. 4.18) называется скалярная величина $A(\vec{F}) = FS\cos\alpha$, где F – модуль силы; S – конечное перемещение точки приложения силы; α – угол между направлением вектора силы и направлением перемещения точки приложения силы.

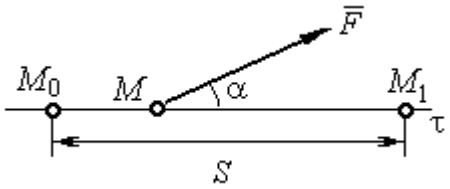


Рис. 4.18. Работа постоянной силы на прямолинейном участке

Работа силы тяжести материальной точки при перемещении её из положения M_0 в положение M_1 равна произведению $A_{(M_0M_1)} = \pm Ph$, где P – величина силы тяжести точки; h – вертикальное перемещение точки (рис. 4.19).

Работа силы тяжести положительна, если начальная точка движения выше конечной (см. рис. 4.19, *a*), и отрицательна, если начальная точка ниже конечной (см. рис. 4.19, *b*).

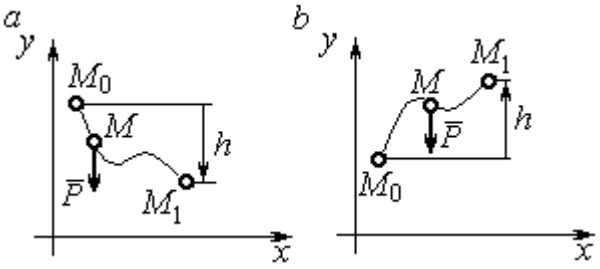


Рис. 4.19. Работа силы тяжести:
a – перемещение точки сверху вниз;
b – перемещение точки снизу вверх

Работа силы упругости пружины при перемещении вдоль линии действия силы из положения недеформированной пружины на расстояние *h* определяется формулой $A(\vec{F}_{\text{упр}}) = -\frac{ch^2}{2}$, где c – коэффициент жесткости (или жёсткость) пружины.

Кинетической энергией материальной точки называется скалярная величина $T = \frac{1}{2}mV^2$, где *m* – масса точки; *V* – её скорость.

Теорема об изменении кинетической энергии точки. Изменение кинетической энергии материальной точки при переходе её из начального положения в текущее равно алгебраической сумме работ всех действующих на неё сил: $\frac{mV_1^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = \sum A_{(M_0M_1)}$, где V_0, V_1 – скорость точки в начальном положении M_0 и в положении M_1; $\sum A_{(M_0M_1)}$ – сумма работ всех сил, действующих на точку, при перемещении её из положения M_0 в положение M_1. При несвободном движении точки в сумму работ сил войдёт и работа реакций связи.

Для определения реакций связи при несвободном движении точки используются уравнения движения в проекциях на оси естественной системы координат – касательную и нормальную: $m\frac{dV}{dt} = \sum F_\tau$, $m\frac{V^2}{\rho} = \sum F_n$, где $\sum F_\tau$, $\sum F_n$ – суммы проекций сил на касательную и нормальную оси естественной системы координат, ρ – радиус кривизны траектории точки.

Примеры решения задач с использованием теоремы об изменении кинетической энергии точки

Задача 49. Подъёмное устройство в шахте опускает груз массой 500 кг с постоянной скоростью V_0 = 6 м/с. После обрыва каната подъёмника срабатывает предохранительное устройство, которое создаёт силу трения между лифтом подъёмного устройства и стенками шахты. Какую силу трения, считая её постоянной, должно создать предохранительное устройство, чтобы остановить лифт на протяжении пути 10 м.

Решение

Рассмотрим падение груза после обрыва каната подъёмника. На груз действуют сила тяжести $\vec{P}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$, направленная в сторону, противоположную движению. Считая груз материальной точкой, составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки. Получим выражение $\frac{mV^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = Ps - F_{\text{тр}}s$, где V_0, V – скорость груза в начале движения (сразу после обрыва каната) и в конце; s – путь, проходимый грузом за время движения. В конце движения груз должен остановиться, то есть V = 0. Тогда уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки принимает вид: $-\frac{mV_0^2}{2} = \left(P - F_{\text{тр}}\right)s$, откуда находим требуемую для остановки груза силу трения: $F_{\text{тр}} = P + \frac{mV_0^2}{2s}$. Подставляя условия задачи, получим: $F_{\text{тр}}$ = 5,81 кН

Задача 50. Тонкий стержень, расположенный в вертикальной плоскости, состоит из двух дуг сопряженных окружностей радиусов R = 1 м и r = 0,5 м (рис. 4.20). Линия OO_1, соединяющая центры окружностей, составляет с горизонтом угол 30°. На стержень надет шарик весом P = 10 Н. В точке A, положение которой на дуге радиуса R определяется углом α = 60°, шарику сообщают начальную скорость V_0, после чего он скользит по стержню без трения. Опре-

делить значение начальной скорости, при которой шарик достигнет наивысшей точки B со скоростью, равной половине начальной. При найденном значении начальной скорости рассчитать давление шарика на стержень в точке C, положение которой на дуге радиуса r определяется углом $\beta = 90°$ относительно линии центров.

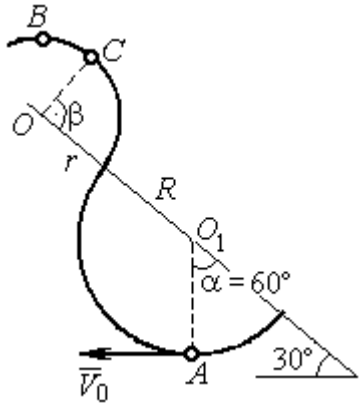


Рис. 4.20. Движение шарика по изогнутому стержню

Решение

При движении шарика по стержню без трения на него действуют сила тяжести $\vec{P}$ и реакция опоры $\vec{N}$. При этом работу совершает только сила тяжести шарика. Реакция гладкой поверхности стержня в любой момент времени перпендикулярна поверхности стержня и потому её работа равна нулю.

По теореме об изменении кинетической энергии точки при движении её из начального положения A в положение B имеем равенство:

$$\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_A^2}{2} = A(P) = -Ph_{(AB)},$$

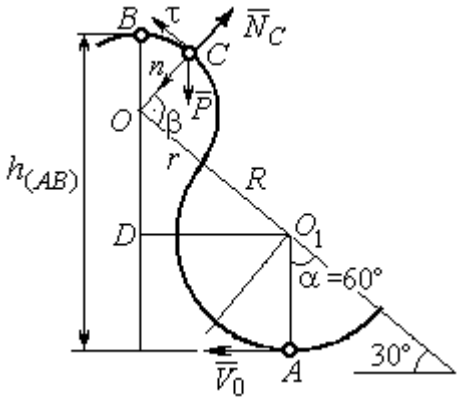


Рис. 4.21. Расчётная схема движения шарика

где $h_{(AB)}$ – перепад высот точек B и A, $h_{(AB)} = R + DO + r = \frac{3}{2}(R + r)$ (см. рис. 4.21); V_A, V_B – скорость шарика в точках A и B, причём $V_A = V_0$, $V_B = 0{,}5V_0$.

В результате уравнение, составленное на основании теоремы об изменении кинетической энергии, принимает вид: $\frac{3V_0^2}{8} = g\frac{3}{2}(R + r)$, откуда $V_0 = 2\sqrt{(R + r)g} = 7{,}67$ м/с.

На рис. 4.21 показаны силы, приложенные к шарику, в момент, когда он находится в точке *C*. Проведём в точке *C* оси естественной системы координат – касательную $C\tau$ и нормаль Cn. Уравнение движения шарика в проекции на нормальную ось имеет вид: $m\dfrac{V_C^2}{r} = P\cos 30^\circ - N_C$, откуда найдём реакцию N_C.

Для определения скорости шарика в точке *C* воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из положения *C* в положение *B*. Получим равенство $\dfrac{mV_B^2}{2} - \dfrac{mV_C^2}{2} = -Ph_{(CB)}$, где $h_{(CB)}$ – перепад высот при движении шарика из начального положения *C* в положение *B*. С учётом известных значений $V_B = 0{,}5V_0 =$ 3,84 м/с и $h_{(CB)} = r\cos 30^\circ =$ 0,43 м получим: $V_C = \sqrt{V_B^2 + 2gh_{(CB)}} =$ 4,82 м/с.

Из уравнения движения шарика находим реакцию опоры $N_C = P\cos 30^\circ - m\dfrac{V_C^2}{r} =$ – 38,7 Н.

Отрицательное значение реакции опоры шарика показывает, что фактическое направление реакции противоположно тому, как показано на рис. 4.21. Искомое давление шарика на трубку равно модулю реакции опоры.

Задача 51. Желоб состоит из шероховатой наклонной прямой *AB* и гладкой дуги окружности радиуса *r* = 0,8 м, сопряжённых в точке *B* так, что прямая *AB* является касательной к окружности в точке *B* (рис. 4.22). Положение точки *B* на дуге задаётся углом 30º относительно вертикального диаметра окружности. Тяжёлый шарик массой *m* = 0,5 кг начинает движение из точки *A* со скоростью $V_0 = 0{,}2$ м/с.

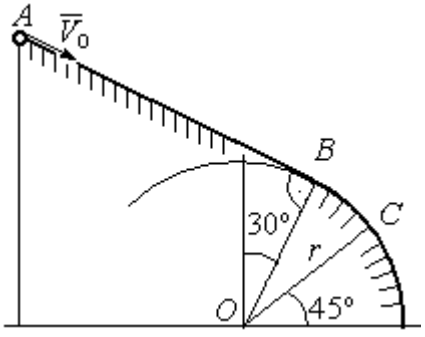


Рис. 4.22. Движение точки по составному желобу

Какой длины *S* должен быть желоб *AB*,

чтобы шарик оторвался от окружности в точке C, определяемой углом 45º относительно горизонтального диаметра, если при движении по прямой AB шарик испытывает сопротивление скольжения с коэффициентом трения $f = 0{,}4$.

Решение

Рассмотрим движение шарика по дуге окружности. Проведём в точке C оси естественной системы координат – касательную $C\tau$ и нормаль Cn (рис. 4.23). На шарик действуют сила тяжести $\vec{P}$, реакция $\vec{N}_C$ опоры в точке C. Уравнение движения шарика в проекции на ось Cn имеет вид: $m\dfrac{V_C^2}{r} = P\cos 45^\circ - N_C$, где V_C – скорость шарика в точке C. Реакция опоры $N_C = P\cos 45^\circ - m\dfrac{V_C^2}{r}$.

В момент отрыва шарика в точке C реакция опоры обращается в ноль: $N_C = 0$. В результате получаем уравнение $V_C^2 = rg\cos 45^\circ$, из которого находим скорость шарика в момент его отрыва от опоры: $V_C = 2{,}36$ м/с.

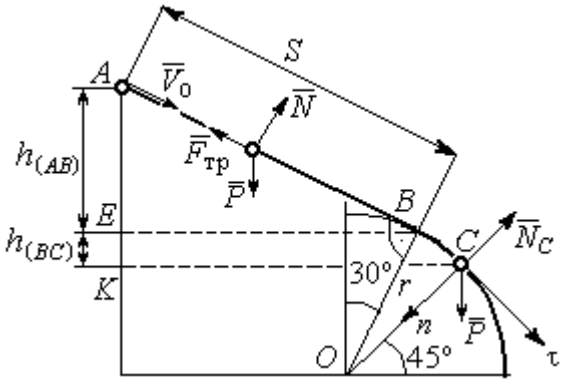


Рис. 4.23. Расчётная схема движения точки

Рассмотрим движение шарика из начального положения A в положение C. На шарик действуют сила тяжести $\vec{P}$, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и, при движении по наклонной прямой AB, сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (см. рис. 4.23). Работу совершают сила тяжести шарика и сила трения. Реакция опоры $\vec{N}$ и в том и другом случае перпендикулярна траектории движения, и её работа равна нулю.

Составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки $\dfrac{mV_C^2}{2} - \dfrac{mV_A^2}{2} = Ph_{(AC)} - F_{\text{тр}}S$, где S – длина участка AB; $h_{(AC)}$ – перепад высот на участке AC (см. рис. 4.23); $h_{(AC)} = h_{(AB)} + h_{(BC)} = S\sin 30^\circ + r\left(\cos 30^\circ - \cos 45^\circ\right)$.

Модуль силы трения: $F_{\text{тр}} = fN$. Для того чтобы найти реакцию N опоры шарика на наклонную поверхность желоба AB, составим проекцию уравнения движения шарика на ось y, перпендикулярную AB (на рис. 4.23 не показана). Получим: $m\ddot{y} = N - P\cos 30^\circ = 0$. Отсюда $N = P\cos 30^\circ$ и сила трения $F_{\text{тр}} = fP\cos 30^\circ$.

Из уравнения теоремы об изменении кинетической энергии точки найдём выражение для определения длины S участка AB:

$$\frac{V_C^2 - V_A^2}{2g} = S\sin 30^\circ + r\left(\cos 30^\circ - \cos 45^\circ\right) - fPS\cos 30^\circ,$$

откуда получим $S = 1$ м.

Задача 52. Груз подвешен на нити длиной $l = 1$ м, закреплённой в неподвижной точке O (рис. 4.24). В начальный момент груз находился в положении A, при котором линия OA составляет с вертикалью угол $60°$. В этом положении грузу сообщают начальную скорость $\vec{V}_0$, перпендикулярно нити. Достигнув горизонтального положения, нить, натянутая грузом, встречает препятствие в виде тонкой проволоки в точке O_1, расположенной на середине длины нити, и дальше навивается на неё.

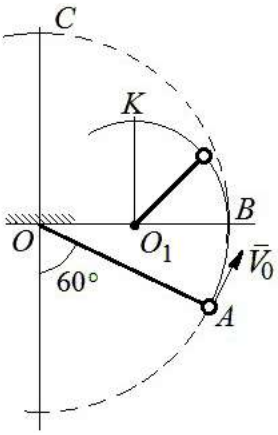


Рис. 4.24. Схема движения груза на нити

Какую минимальную начальную скорость нужно сообщить грузу в точке A, чтобы после встречи нити с проволокой в O_1 груз проскочил верхнюю точку траектории K. На какую максимальную высоту (относительно горизонтального диаметра OB) поднимется груз, двигаясь из той же точки A и с той же начальной скоростью, если нить будет двигаться беспрепятственно. Определить скачок натяжения нити в точке B при переходе груза с одной траектории на другую.

Решение

Построим оси естественной системы координат $n K \tau$ в точке K траектории – окружности радиуса $0{,}5l$ с центром O_1 (рис. 4.25, *a*). Во время движения на груз действуют сила тяжести и реакция нити. Уравнение движения груза в проекции на ось Kn имеет вид: $m\dfrac{V_K^2}{r} = P + N_K$, где V_K – скорость

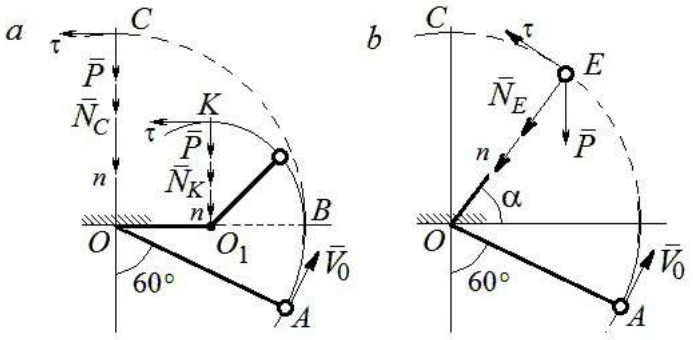


Рис. 4.25. Расчётная схема движения груза:
a – нить навивается на препятствие;
b – свободное движение

груза в точке K; N_K – реакция нити; r – радиус окружности движения груза; $r = 0{,}5l$. Из уравнения движения находим реакцию нити: $N_K = m\dfrac{2V_K^2}{l} - P$.

Так как нить представляет собой гибкую связь, то условием достижимости грузом точки K является требование, что при движении нить должна быть натянута, иначе говоря, всюду во время движения должно выполняться неравенство $N_K \geq 0$. С учётом уравнения движения груза это приводит к неравенству, выражающему требование к скорости в конечной точке: $V_K^2 \geq \dfrac{1}{2}gl$.

Скорость груза в точке K найдём на основании теоремы об изменении кинетической энергии точки при движении груза из положения A в положение K. Имеем равенство $\dfrac{mV_K^2}{2} - \dfrac{mV_0^2}{2} = -Ph_{(AK)}$, где $h_{(AK)}$ – перепад высот точек A и K; $h_{(AK)} = l$ (см. рис. 4.25, *a*). Решая полученное уравнение, найдём зависимость скорости груза в точке K от начальной: $V_K^2 = V_0^2 - 2gl$. С учётом выполнения неравенства натяжения нити получим: $V_0 \geq \sqrt{\dfrac{5}{2}gl}$.

При минимальной начальной скорости $V_0 = \sqrt{\frac{5}{2}gl}$ груз достигает верхней точки *K*. Однако, натяжение нити в точке *K* обращается в нуль: $N_K = 0$ и нить в этом месте перестаёт быть натянутой. Груз продолжает движение, но уже в виде свободного падения с начальной скоростью $V_K = \sqrt{\frac{1}{2}gl}$.

Определим, на какую высоту поднимется груз из положения *A* с минимальной начальной скоростью $V_0 = \sqrt{\frac{5}{2}gl}$, если нить движется беспрепятственно (см. рис. 4.25, *b*). Построим в точке *E* оси естественной системы координат $nE\tau$ аналогично тому, как это было сделано в точке *K*. Уравнение движения груза в проекции на ось *En* имеет вид: $m\frac{V_E^2}{l} = P\sin\alpha + N_E$, где V_E – скорость груза в точке *E*; N_E – проекция реакции нити на нормальную ось.

Для определения скорости груза в точке *E* составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки при движении груза из начального положения *A* в положение *E*. Получим: $\frac{mV_E^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = -Ph_{(AE)}$, где $h_{(AE)}$ – перепад высот точек *A* и *E*; $h_{(AE)} = \frac{l}{2} + l\sin\alpha$ (см. рис. 4.25, *b*). Решая полученное уравнение относительно скорости V_E при заданной начальной скорости $V_0 = \sqrt{\frac{5}{2}gl}$, найдём: $mV_E^2 = \frac{3}{2}mgl - 2mgl\sin\alpha$. С другой стороны, из уравнения движения груза (учитывая, что в точке *E* натяжение нити равно нулю: $N_E = 0$) получим: $mV_E^2 = Pl\sin\alpha$. Приравнивая выражения, получим $\sin\alpha = \frac{1}{2}$. Высота подъёма относительно горизонтального радиуса составляет $\frac{1}{2}l$.

Для определения скачка натяжения нити при переходе груза в точке B с окружности радиуса l на окружность радиуса $\frac{1}{2}l$, т. е. в момент, когда нить начинает навиваться на проволоку, напишем проекции уравнения движения груза на нормальную ось в точке B. Получим для малой окружности $\frac{2mV_B^2}{l} = N_B$ и для большой $\frac{mV_B^2}{l} = N'_B$, где N_B и N'_B – проекции реакции нити в точке B при движении груза по окружности радиусов $\frac{1}{2}l$ и l. Из уравнений видно, что переход груза с большой окружности на малую вызывает двукратное увеличение натяжения нити: $N'_B = \frac{3}{2}mg$, $N_B = 3mg$.

Задача 53. Шарик массой m = 0,5 кг движется в вертикальной плоскости из положения A внутри трубки, которая состоит из полуокружности AB радиуса R = 0,6 м и прямолинейного участка BD, сопряжённого в точке B с окружностью (рис. 4.26). Диаметр полуокружности AB составляет с горизонталью угол 60°. Начальная скорость шарика V_0 = 5 м/с. В конце кругового участка в точке B шарик упирается в недеформированную пружину жесткостью c = 100 Н/м. Найти величину S максимального сжатия пружины.

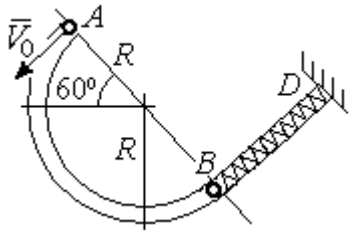


Рис. 4.26. Схема движения шарика

Решение

Найдём скорость шарика в точке B. Для этого составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из начального положения A в положение B. Получим: $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_A^2}{2} = A(P) = Ph_{(AB)}$, где $h_{(AB)}$ – перепад высот точек A и B, $h_{(AB)} = 2R\sin 60^\circ = 1{,}04$ м (рис. 4.27).

Решая уравнение, найдём скорость шарика в точке B: $V_B = \sqrt{V_A^2 + 2gh_{(AB)}} = 6{,}74$ м/с.

Для того, чтобы найти величину максимального сжатия пружины, рассмотрим движение шарика на прямолинейном отрезке трубки BD. На этом отрезке работу совершают сила тяжести шарика и сила упругости пружины, приложенные к шарику (см. рис. 4.27).

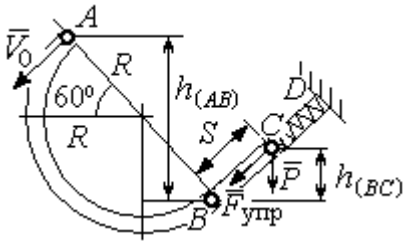


Рис. 4.27. Расчетная схема движения шарика

Обозначим S – максимальное сжатие пружины, равное BC. На основании теоремы об изменении кинетической энергии точки, применённой к движению шарика на отрезке BC, имеем уравнение $\frac{mV_C^2}{2} - \frac{mV_B^2}{2} = A(P) + A(F_{упр}) = -Ph_{(BC)} - \frac{cS^2}{2}$,

где $h_{(BC)}$ – перепад высот точек B и C; $h_{(BC)} = S\sin 30^\circ = 0{,}5S$ (см. рис. 4.27).

В точке C максимального сжатия пружины скорость шарика обращается в нуль: $V_C = 0$. Подставляя это условие, с учётом $V_B = 6{,}74$ м/с, получим уравнение для определения величины максимального сжатия пружины: $S^2 + 0{,}05S - 0{,}23 = 0$.

Выбирая положительный корень уравнения, находим: $S = 0{,}45$ м.

Упражнения

Упражнение 4.5. Лётчик в самолёте пикирует из точки A по прямой, составляющей с горизонтом угол φ, с начальной скоростью V_0. Пройдя расстояние $AB = l$, самолёт продолжает движение по дуге окружности радиуса R, сопряженной с прямой AB в точке B (рис. 4.28).

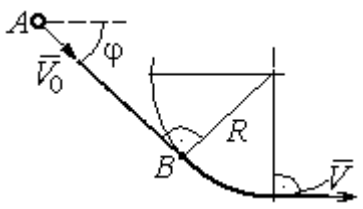


Рис. 4.28. Схема движения самолёта

Каким должен быть радиус окружности, чтобы в точке C – выхода самолёта на горизонтальный полёт - сила давления человека на корпус самолёта не превосходила его тройной вес.

Упражнение 4.6. Пружина жесткостью C = 100 Н/м, сжатая из недеформированного состояния на расстояние $KA = a = 0{,}3$ м, выталкивает шарик массой $m = 0{,}5$ кг, который отделяется от неё в точке K и продолжает движение в трубке по дуге KCB, окружности радиуса R = 1 м, затем – по горизонтальному участку BD. Определить давление шарика на трубку в точке C. Какой путь пройдёт шарик до остановки по прямой BD, если здесь на него действует сила трения с коэффициентом $f = 0{,}4$.

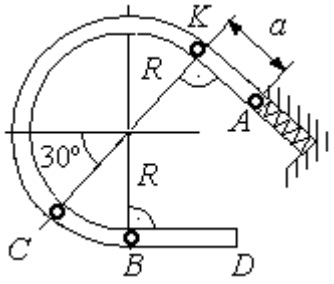


Рис. 4.29. Схема движения шарика в трубке

5. ОБЩИЕ ТЕОРЕМЫ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ

5.1. Теорема о движении центра масс системы

Центром масс системы материальных точек называют точку C, координаты которой x_C, y_C, z_C удовлетворяют равенствам:

$$mx_C = \sum m_k x_k \ , \quad my_C = \sum m_k y_k \ , \ mz_C = \sum m_k z_k \ ,$$

где m – масса системы: $m = \sum m_k$; m_k, x_k, y_k, z_k – массы и координаты материальных точек системы.

Теорема о движении центра масс системы. Центр масс механической системы движется как материальная точка с массой, равной массе системы, и к которой приложены внешние силы, действующие на систему: $m\vec{a}_C = \sum \vec{F}_k^e$, где $\vec{a}_C$ – вектор ускорения центра масс системы; $\sum \vec{F}_k^e$ – сумма всех внешних сил, действующих на систему.

Пример решения задач на применение теоремы о движении центра масс

Задача 54. Груз 1, находящийся на верхнем основании прямоугольной пирамиды *ABCD*, соединен с грузом 2 нерастяжимой нитью, перекинутой через блок C (рис. 5.1). Определить перемещение пирамиды, если груз 2 опустился на высоту 1 м. Масса груза 1 m_1 = 15 кг, груза 2 m_2 = 20 кг, пирамиды m = 50 кг. Трение при движении груза 1 по пирамиде и пирамиды по горизонтальной поверхности не учитывать.

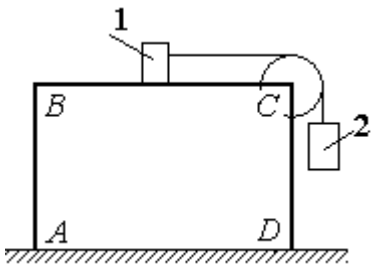


Рис. 5.1. Пирамида с системой подвижных грузов

Решение

Рассматриваем механическую систему, состоящую из двух грузов, соединённых нерастяжимой нитью, блока *C* и пирамиды *ABCD*.

Внешние силы, приложенные к системе: силы тяжести грузов и пирамиды – $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}$ и нормальная реакция $\vec{N}$ опоры поверхности, на которой стоит пирамида. Направления векторов внешних сил показаны на рис. 5.2.

Выберем неподвижную систему координат *Axy*, как показано на рис. 5.2. Все внешние силы, действующие на механическую систему, вертикальны, поэтому дифференциальное уравнение, составленное на основании теоремы о движении центра масс механической системы в проекции на ось *Ax,* имеет вид:

$$(m + m_1 + m_2)\ddot{x}_C = P_{1x} + P_{2x} + P_x + N_x = 0$$

$$\text{или} \quad \ddot{x}_C = 0,$$

где x_C – координата центра масс системы.

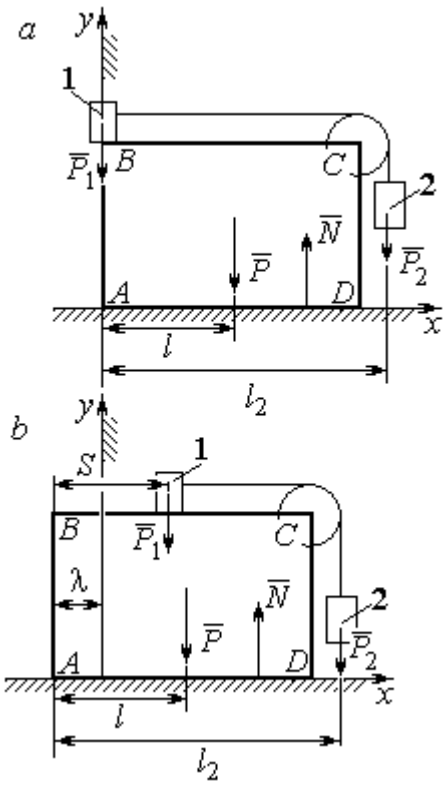


Рис. 5.2. Расчётная схема перемещения пирамиды: *a* – начальное положение; *b* – положение пирамиды при перемещении грузов на расстояние *S*

Проинтегрировав его дважды, получим закон движения центра масс системы: $x_C = C_1 t + C_2$, где константы интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных условий. Предположим, в начальный момент движение в механической системе отсутствовало и координата центра масс системы была равна x_{C0} (на рис. 5.2, *a* не показана), то есть при $t = 0$ $x_C(0) = x_{C0}$ и $\dot{x}_C(0) = 0$. Подставляя начальные условия, получим: $C_1 = 0$, $C_2 = x_{C0}$. В результате закон движения центра масс системы имеет вид: $x_C = x_{C0}$. Последнее означает, что при любом перемещении тел в системе координата центра масс системы на оси *Ax* остаётся постоянной, равной своему начальному значению.

Предположим, в начальный момент времени груз 1 находился у левого края призмы, как показано на рис. 5.2, *a*.

Начальная координата x_{C0} центра масс системы находится из равенства $(m_1 + m_2 + m)x_{C0} = \sum m_k x_k = m_1 \cdot 0 + m_2 l_2 + ml$, где l_2 – расстояние от начала координат до линии действия силы тяжести груза 2 (координата центра масс гру-

за 2 на оси Ax); l – аналогичное расстояние до линии действия силы тяжести пирамиды (см. рис. 5.2, *a*). Тогда начальная координата центра масс системы: $x_{C0} = \dfrac{m_2 l_2 + ml}{(m_1 + m_2 + m)}$.

Положение грузов в системе, после того как груз 1 переместился на расстояние *S*, и положение призмы показано на рис. 5.2, *b*. На рисунке отмечено, что при перемещении груза 1 вправо на расстояние *S* призма *ABCD* сместилась влево на расстояние λ. Координата x_{C1} центра масс для нового положения системы определяется из равенства:

$$(m_1 + m_2 + m)x_{C1} = m_1(S - \lambda) + m_2(l_2 - \lambda) + m(l - \lambda).$$

Выражая отсюда координату x_{C1} и приравнивая её начальному значению координаты центра масс $x_{C0} = x_{C1}$, найдём перемещение пирамиды $\lambda = \dfrac{m_1 S}{(m_1 + m_2 + m)}$. Подставляя данные задачи, получим $\lambda = 0{,}18$ м.

5.2. Теорема об изменении кинетического момента системы относительно оси

Момент инерции однородного диска радиусом *R*, массой *m* относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска: $J_z = \dfrac{1}{2}mR^2$. **Для неоднородных тел момент инерции** относительно оси *z* вычисляется по формуле: $J_z = mi_z^2$, где i_z – радиус инерции тела.

Кинетическим моментом (моментом количества движения) системы относительно неподвижной оси *z* называется величина, равная сумме моментов количеств движения точек относительно этой оси $\vec{L}_z = \sum M_z(m_k \vec{V}_k)$.

Для твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси *z*, кинетический момент: $L_z = J_z\omega$, где J_z и ω – момент инерции и угловая скорость

тела. **Теорема об изменении кинетического момента системы относительно оси**. Производная по времени от кинетического момента системы относительно неподвижной оси z равна сумме моментов внешних сил относительно той же оси: $\frac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$.

Примеры решения задач на применение теоремы об изменении кинетического момента системы

Задача 55. Для подъёма груза используется лебёдка со ступенчатым барабаном и противовесом. Груз 1 массой m_1 поднимается на канате, навитом на барабан 2 массой m_2 радиуса R. Противовес 3 массой m_3 прикреплён к канату, который навит на малую ступень барабана радиуса r (рис. 5.3). Радиус инерции барабана относительно оси вращения i_z. На барабан действует постоянный момент сил сопротивления $M_c = 60$ Н·м. В начале движения к барабану лебёдки прикладывается вращающий момент, пропорциональный времени: $M_{вр} = 620 + 30t$ Н·м, который через 2 с отключается. Определить, на какую высоту поднимется груз, если движение началось из состояния покоя. Массы грузов и барабана: $m_1 = 100$ кг, $m_2 = 50$ кг, $m_3 = 20$ кг. Радиусы ступеней барабана и радиус инерции: $R = 0{,}6$ м; $r = 0{,}4$ м; $i_z = 0{,}5$ м.

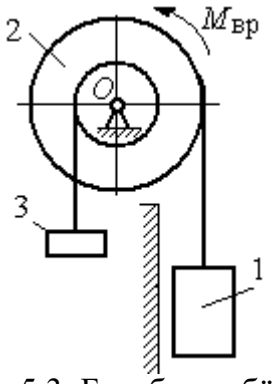


Рис. 5.3. Барабан лебёдки с грузом и противовесом

Решение

Решение следует рассматривать на двух этапах. На первом груз поднимается под действием вращающего момента, на втором – по инерции.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из груза 1, барабана 2 и противовеса 3. На систему действуют силы тяжести груза $\vec{P}_1$, барабана $\vec{P}_2$, противовеса $\vec{P}_3$, реакция шарнира $\vec{R}$, пара сил с моментом, равным моменту вра-

щения $M_{вр}$, и пара сил с моментом сопротивления M_c. Направления векторов сил и моментов показаны на рис. 5.4. Выберем начало оси *y*, вдоль которой поднимается груз на первом участке движения, в точке начала движения (см. рис. 5.4).

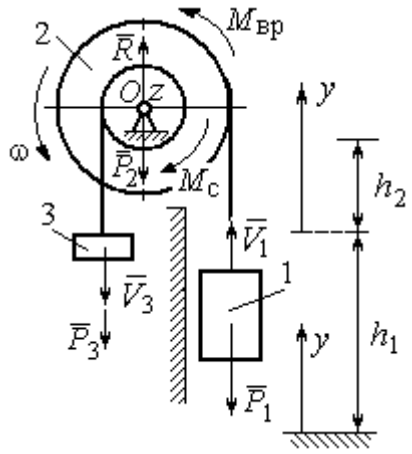


Рис. 5.4. Силы, действующие на систему во время движения

Воспользуемся теоремой об изменении кинетического момента системы относительно оси *z*, проходящей через центр *O*: $\frac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$. Кинетический момент системы относительно оси *z* равен сумме кинетических моментов барабана, груза и противовеса: $L_z = L_z^{бар} + L_z^{гр} + L_z^{пр}$. Кинетический момент барабана, вращающегося вокруг неподвижной оси *z*: $L_z^{бар} = J_z\omega$, где J_z – момент инерции барабана относительно оси *z*, $J_z = m_2 i_z^2$; ω – угловая скорость барабана. Рассматривая груз и противовес как материальные точки, найдём их кинетические моменты относительно оси *z*: $L_z^{гр} = M_z(m_1\vec{V}_1) = m_1V_1R$; $L_z^{пр} = M_z(m_3\vec{V}_3) = m_3V_3r$.

Суммарный кинетический момент системы:

$$L_z = L_z^{бар} + L_z^{гр} + L_z^{пр} = m_2 i_z^2\omega + m_1V_1R + m_3V_3r.$$

Выразим скорости груза 1 и противовеса 3 через угловую скорость барабана: $V_1 = \omega R$, $V_3 = \omega r$ - и подставим их в выражение кинетического момента. Получим $L_z = (m_2 i_z^2 + m_1R^2 + m_3r^2)\omega = (m_2 i_z^2 + m_1R^2 + m_3r^2)\frac{V_1}{R}$.

Суммарный момент внешних сил относительно оси *z*

$$\sum M_z(\vec{F}_k^e) = M_{вр} - M_c - P_1R + P_3r.$$

Дифференциальное уравнение движения груза:

$$(m_2 i_z^2 + m_1R^2 + m_3r^2)\frac{dV_1}{dt} = \left(M_{вр} - M_c - P_1R + P_3r\right)R,$$

или с учётом данных задачи $\frac{dV_1}{dt} = 0{,}58 + 0{,}35t$.

Дважды интегрируя это уравнение с нулевыми начальными условиями, найдём скорость груза V_1 и проходимый им путь y как функции времени:

$$V_1(t) = 0{,}58t + 0{,}175t^2;\quad y(t) = 0{,}29t^2 + 0{,}058t^3.$$

Из уравнений движения найдём: при $t = 2$ с (конец первого участка) груз поднялся на высоту $h_1 = y(2) = 1{,}62$ м и имел скорость $V_1 = V_1(2) = 1{,}86$ м/с.

На втором участке движения груз продолжает подниматься вверх. Уравнение движения груза здесь аналогично первому участку, за исключением вращающего момента (см. рис. 5.4):

$$(m_2 i_z^2 + m_1 R^2 + m_3 r^2)\frac{dV_1}{dt} = \left(-M_c - P_1 R + P_3 r\right)R, \text{ или } \frac{dV_1}{dt} = -6{,}61.$$

Представим ускорение груза в виде: $\frac{dV_1}{dt} = \frac{dV_1 dy}{dy dt} = V_1 \frac{dV_1}{dy}$. Теперь уравнение движения груза на втором участке имеет вид: $V_1 \frac{dV_1}{dy} = -6{,}61$. Интегрируя его, получим зависимость скорости груза от пройденного пути $\frac{V_1^2}{2} = -6{,}61y + C_3$. Выберем начало второго участка на высоте h_1. Из начальных условий движения груза: при $t = 0$, $y = 0$, $V_1 = 1{,}86$ м/с, получим: $C_3 = 1{,}73$.

Максимальную высоту h_2, на которую поднялся груз на втором участке, определим из условия, что в этой точке скорость груза обращается в нуль. Имеем $0 = -6{,}61h_2 + 1{,}73$, откуда $h_2 = 0{,}26$ м. Максимальная высота подъёма груза $H = h_1 + h_2 = 1{,}88$ м.

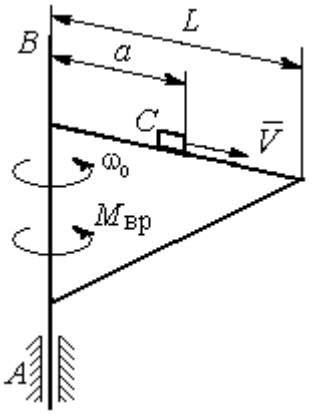


Рис. 5.5. Поворотный кран

Задача 56. Тележка C поворотного подъёмного крана (рис. 5.5) движется с постоянной относительно стрелы скоростью $V = 0{,}5$ м/с. Длина стрелы

L = 10 м, масса тележки с грузом m_1 = 100 кг, момент инерции крана относительно оси вращения AB без учёта тележки и груза J = 1800 кг·м^2. Двигатель крана создаёт постоянный вращающий момент $M_{вр}$ = 400 Н·м. Определить угловую скорость крана в момент, когда тележка достигнет края стрелы, если в начальный момент конструкция вращалась с угловой скоростью ω_0 = 2 рад/с, а тележка находилась на расстоянии a = 1 м от оси вращения.

Решение

На систему действуют внешние силы: $\vec{P}_1$ – сила тяжести тележки с грузом, $\vec{P}_2$ – сила тяжести поворотного крана (на рис. 5.6 показана в условном центре тяжести крана); $\vec{R}_x$, $\vec{R}_y$ – составляющие реакции подшипника A и пара сил с моментом, равным вращающему моменту $M_{вр}$ (см. рис. 5.6). Применим к описанию движения системы теорему об изменении кинетического момента системы относительно оси вращения z, направленной вдоль линии AB.

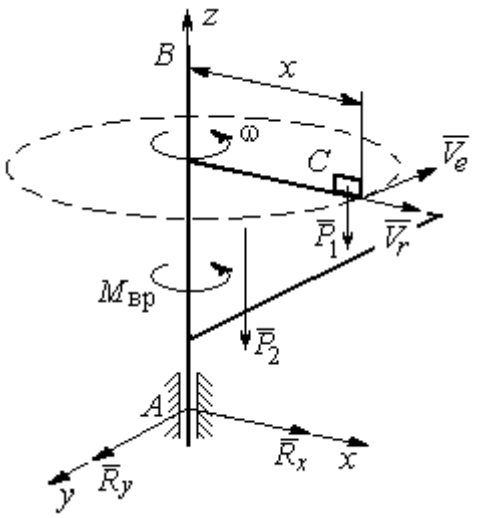


Рис. 5.6. Внешние силы, действующие на кран при его движении

Поскольку силы тяжести параллельны оси вращения крана, а составляющие реакции шарнира A пересекают её, то моменты этих сил относительно оси z равны нулю и теорема об изменении кинетического момента системы принимает вид: $\frac{dL_z}{dt} = M_{вр}$. Интегрируя это уравнение при постоянном вращающем моменте, получим равенство: $L_z - L_{z0} = M_{вр}t$, где L_z, L_{z0} – кинетический момент системы в текущий и начальный моменты времени.

Кинетический момент системы L_z равен сумме: $L_z = L_z^{кран} + L_z^{груз}$. Кинетический момент крана как твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной

оси: $L_z^{\text{кран}} = J\omega$. Полагая тележку с грузом материальной точкой, определим её кинетический момент $L_z^{\text{груз}}$, как момент вектора количества движения тележки относительно оси *z*. Тележка с грузом участвует в сложном движении. Вектор абсолютной скорости тележки $\vec{V}_{\text{абс}}$ равен сумме $\vec{V}_{\text{абс}} = \vec{V}_r + \vec{V}_e$, где $\vec{V}_r$ относительная скорость тележки (перемещение по стреле крана); $\vec{V}_e$ – переносная скорость (движение вместе с краном). Воспользовавшись теоремой Вариньона при вычислении момента количества движения тележки с грузом, получим:

$$L_z^{\text{груз}} = M_z(m_1\vec{V}_{\text{абс}}) = M_z(m_1\vec{V}_e + m_1\vec{V}_r) = M_z(m_1\vec{V}_e) = m_1V_ex = m_1\omega x^2.$$

В результате суммарный кинетический момент системы в текущий момент времени $L_z = L_z^{\text{кран}} + L_z^{\text{груз}} = \left(J + m_1x^2\right)\omega$. Тогда начальный кинетический момент систем: $L_{z0} = \left(J + m_1a^2\right)\omega_0$.

Подставляя выражения начального и текущего кинетического моментов в уравнение движения, получим: $\left(J + m_1x^2\right)\omega - \left(J + m_1a^2\right)\omega_0 = M_{\text{вр}}t$, откуда закон изменения угловой скорости крана $\omega = \dfrac{M_{\text{вр}}t + \left(J + m_1a^2\right)\omega_0}{\left(J + m_1x^2\right)}$. Момент времени $t_{\text{к}}$, когда тележка достигнет края стрелы ($x = L$), найдём из условия движения тележки по стреле с постоянной скоростью: $Vt_{\text{к}} = L - a$. С учётом данных задачи угловая скорость крана в этот момент $\omega(t_{\text{к}}) = 0{,}93$ рад/с.

5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы

Кинетическая энергия тела при поступательном движении $T = \dfrac{1}{2}mV_C^2$, где m – масса тела; V_C – скорость центра масс тела; **при вращательном движении** вокруг неподвижной оси z: $T = \dfrac{1}{2}J_z\omega^2$, где J_z – момент инерции тела относительно оси *z*; ω – угловая скорость тела; **при плоскопа-**

раллельном движении: $T = \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega^2$, где m – масса тела; V_C, ω – скорость центра масс и угловая скорость тела; J_{zC} – момент инерции тела относительно оси z, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

Работа постоянной силы F при прямолинейном перемещении точки приложения силы $A = FS\cos\alpha$, где S – перемещение точки; α – постоянный угол между перемещением и направлением силы. **Работа пары сил с постоянным моментом** M при повороте тела на конечный угол φ вычисляется по формуле: $A = \pm M\varphi$, где φ – угол поворота тела. Работа считается положительной, если пара сил стремится повернуть тело в направлении его вращения, и отрицательной – в противном случае.

Мощностью силы F называют величину, равную скалярному произведению силы на скорость точки её приложения: $N = \vec{F} \cdot \vec{V}$, где V – скорость точки приложения силы. При плоском движении тела мощность силы равна сумме скалярных произведений: $N = \vec{F} \cdot \vec{V}_O + \vec{M}_O \cdot \vec{\omega}$, где V_O – скорость точки, выбранной полюсом; ω – угловая скорость тела; $\vec{M}_O = M_O(\vec{F})$ – момент силы относительно полюса. Если в качестве полюса выбрать точку K – мгновенный центр скоростей, то мощность силы $N(\vec{F}) = \vec{M}_K(\vec{F}) \cdot \vec{\omega}$, где $M_K(\vec{F})$ – момент силы относительно мгновенного центра скоростей.

Теорема об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме. Производная по времени от кинетической энергии системы равна сумме мощностей внешних и внутренних сил $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e) + \sum N(\vec{F}_k^i)$.

Теорема об изменении кинетической энергии системы на конечном перемещении. Изменение кинетической энергии системы при перемещении её

из начального состояния в текущее равно сумме работ внешних и внутренних сил, действующих на систему: $T - T_0 = \sum A(\vec{F}_k^e) + \sum A(\vec{F}_k^i)$.

Механические системы, состоящие из абсолютно твердых тел, соединенных гибкими нерастяжимыми нитями, называются **неизменяемыми**. В неизменяемых системах сумма работ и сумма мощностей внутренних сил равны нулю: $\sum A(\vec{F}_k^i) = 0$.

Примеры решения задач на применение теоремы об изменении кинетической энергии системы

Задача 57. Планетарный механизм, позволяющий получать повышенные передаточные отношения угловых скоростей, состоит из трех одинаковых колёс, соединённых кривошипом *OA* (рис. 5.7). Колесо 1 неподвижно, кривошип *OA* вращается с угловой скоростью ω_{OA} и приводит в движение колёса 2 и 3. Полагая массы колёс и их радиусы одинаковыми, равными *m* и *r,* и пренебрегая массой кривошипа, найти кинетическую энергию механизма.

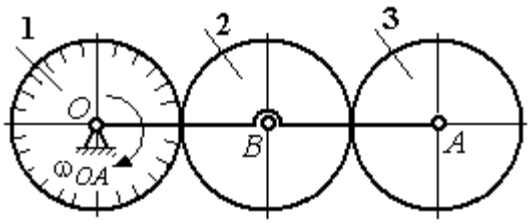


Рис. 5.7. Планетарный механизм

Решение

Кинетическая энергия механизма *T* равна сумме энергий колёс 2 и 3: $T = T_2 + T_3$. Энергия колеса 1 равна нулю потому, что оно неподвижно, а энергия кривошипа равна нулю, так как массой кривошипа пренебрегаем. При движении механизма колесо 2, увлекаемое кривошипом, катится по неподвижной поверхности первого колеса. Энергия колеса 2:

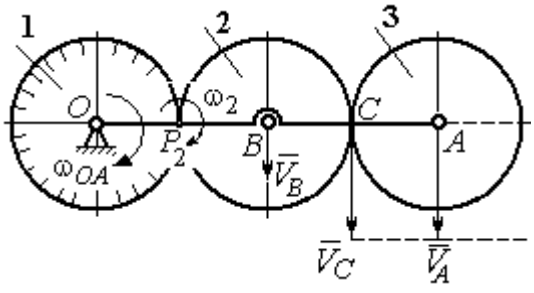


Рис. 5.8. Расчётная схема вычисления энергии механизма

$T_2 = \frac{mV_B^2}{2} + \frac{J_{2B}\omega_2^2}{2}$, где V_B – скорость центра масс колеса 2, J_{2B} – момент инерции колеса 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости колеса, $J_{2B} = \frac{mr^2}{2}$.

Выразим кинетическую энергию колеса 2 через угловую скорость ω_{OA} кривошипа OA.

Скорость точки B, лежащей на кривошипе OA: $V_B = \omega_{OA} \cdot OB = \omega_{OA} 2r$.

Так как точка P_2 касания колёс 1 и 2 является мгновенным центром скоростей колеса 2 (рис. 5.8), угловая скорость колеса 2 $\omega_2 = \frac{V_B}{BP_2}$. В результате получим: $\omega_2 = 2\omega_{OA}$. Подставив зависимости V_B и ω_2 в выражение кинетической энергии колеса 2, найдём:

$$T_2 = \frac{m(\omega_{OA} 2r)^2}{2} + \frac{mr^2}{2} \cdot \frac{(2\omega_{OA})^2}{2} = 3m\omega_{OA}^2 r^2.$$

Вычислим кинетическую энергию колеса 3. Найдём скорость точки C, считая, что она принадлежит колесу 2: $V_C = \omega_2 \cdot P_2C = 4\omega_{OA} r$. Скорость точки A – центра колеса 3 определим, полагая, что точка A лежит и на кривошипе: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 4\omega_{OA} r$. Скорости двух точек A и C колеса 3 равны и параллельны, причём линия AC перпендикулярна векторам скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$ (см. рис. 5.8). В этом случае мгновенный центр скоростей отсутствует и колесо 3 совершает мгновенно-поступательное движение. Энергия поступательного движения колеса 3: $T_3 = \frac{mV_A^2}{2} = \frac{m(4\omega_{OA} r)^2}{2} = 8m\omega_{OA}^2 r^2$.

Окончательно, энергия механизма: $T = T_2 + T_3 = 11m\omega_{OA}^2 r^2$.

Задача 58. Горизонтальный желоб DE опирается на блок 1 и на каток 3 одинакового радиуса r (рис. 5.9). Блок 1 весом P_1 вращается вокруг неподвиж-

ной оси O_1. Каток 3 катится по горизонтальному рельсу без проскальзывания. На одной оси с катком 3 жестко связано колесо 2 радиуса R. Их общий вес равен Q, а общий радиус инерции относительно оси z, проходящей через центр масс C перпендикулярно плоскости катка, равен i_z. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом M. Массой желоба пренебрегаем. Скольжение между желобом и блоком 1, а также катком 3 отсутствует. Определить ускорение центра масс колеса 2 и катка 3 и угловое ускорение блока 1, если: P_1 = 40 Н, Q = 60 Н, F = 50 Н, M = 45 Н·м, R = 0,8 м, r = 0,6 м, i_z = 0,4 м.

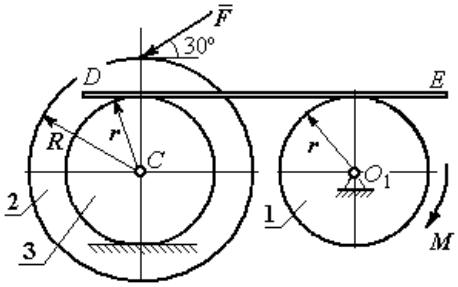


Рис. 5.9. Схема движения механической системы

Решение

Для решения задачи воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии для неизменяемых механических систем: $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e)$, где T – энергия системы в её текущем положении; $\sum N(\vec{F}_k^e)$ – суммарная мощность внешних сил.

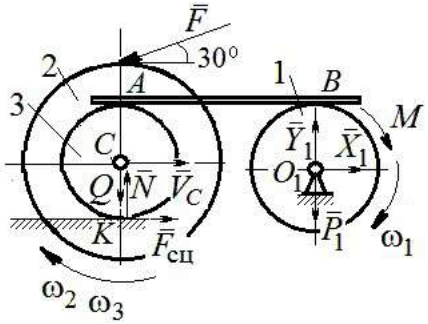


Рис. 5.10. Расчетная схема для исследования движения системы

Предположим, во время движения системы блок 1 вращается по ходу часовой стрелки.

Угловые скорости ω_1, ω_2 блока 1, катка 3 и скорость $\vec{V}_C$ центра масс катка 3 показаны на рис. 5.10. Угловая скорость колеса 2 и катка 3 равны: $\omega_3 = \omega_2$.

Кинетическая энергия вращательного движения блока 1 $T_1 = \frac{1}{2} J_{zO_1} \omega_1^2$,

где J_{zO_1} – осевой момент инерции блока, $J_{zO_1} = \frac{m_1 r^2}{2}$.

Фигура, состоящая из катка 3 и колеса 2, двигается плоскопараллельно. Кинетическая энергия фигуры определяется по формуле: $T_2 = \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_2^2$, где m – общая масса катка и колеса, $m = \frac{Q}{g}$, J_{zC} – момент инерции фигуры относительно оси z, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_{zC} = m i_z^2$,

У катка 3 мгновенный центр скоростей находится в точке касания его с неподвижной поверхностью (точка K на рис. 5.10). Тогда $\omega_3 = \frac{V_C}{r}$. Скорость точки A катка $V_A = \omega_3 2r = 2V_C$. Приравнивая скорость точки A на катке 2 к скорости точки B на блоке 1, получим $\omega_1 = \frac{2V_C}{r}$.

Найдём кинетическую энергию системы, выраженную через скорость центра масс катка 3:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{P_1}{g} V_C^2 + \frac{Q}{2g}\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right) V_C^2 = \frac{V_C^2}{2g}\left[2P_1 + Q\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right].$$

Найдем сумму мощностей внешних сил.

На блок 1 действуют: сила тяжести $\vec{P}_1$, пара сил с моментом M и реакция шарнира O_1, разложенная на составляющие $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$ (рис. 5.10). Мощности силы тяжести $\vec{P}_1$ и сил реакции $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$ подшипника O_1 равны нулю, так как нет перемещения точек приложения этих сил. Момент M направлен в сторону вращения блока 1, его мощность $N(M) = M\omega_1 = M\frac{2V_C}{r}$.

На каток 3 (вместе с жестко связанным с ним колесом 2) действуют: сила $\vec{F}$, сила тяжести $\vec{Q}$ катка и колеса, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила сцепления $\vec{F}_{\text{сц}}$ катка 3 с поверхностью.

Мощности сил $\vec{N}$ и $\vec{F}_{\text{сц}}$ равны нулю, так как точкой приложения этих сил является мгновенный центр скоростей катка 3, скорость которого равна нулю. Мощность силы тяжести $\vec{Q}$ равна нулю, так как угол между вектором силы и вектором скорости точки C равен 90°.

Для определения мощности силы $\vec{F}$, приложенной к колесу, выберем в качестве полюса точку K – мгновенный центр скоростей диска 2. С учётом того, что скорость $V_K = 0$, получим:

$$N(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{V}_K + \vec{M}_K(\vec{F}) \cdot \vec{\omega}_2 = \vec{M}_K(\vec{F})\vec{\omega}_2 =$$

$$= -F(r+R)\omega_2 \cos 30° = -FV_C\left(1+\frac{R}{r}\right)\cos 30°.$$

Поскольку вращение, создаваемое моментом силы $\vec{F}$ относительно центра K, противоположно выбранному направлению угловой скорости катка, мощность силы $\vec{F}$ отрицательная.

Суммарная мощность внешних сил:

$$\sum N(F^e) = -FV_C\left(1+\frac{R}{r}\right)\cos 30° + M\frac{2V_C}{r}.$$

Составляем уравнение теоремы об изменении кинетической энергии системы. Находим производную по времени от кинетической энергии системы $\frac{dT}{dt} = \frac{V_C}{g}a_C\left[2P_1 + Q\left(1+\frac{i_z^2}{r^2}\right)\right]$ и приравниваем суммарной мощности внешних сил. Получим:

$$\frac{1}{g}a_C\left[2P_1 + Q\left(1+\frac{i_z^2}{r^2}\right)\right] = -F\left(1+\frac{R}{r}\right)\cos 30° + \frac{2M}{r},$$

откуда с учётом исходных данных задачи ускорение центра масс диска 2 $a_C = 2{,}88$ м/с^2. Для определения углового ускорения блока 1 продифференцируем по времени равенство $\omega_1 = \dfrac{2V_C}{r}$. Получим: $\varepsilon_1 = \dfrac{2a_C}{r} = 9{,}6$ рад/с^2.

Задача 59. Каток радиуса *r*, весом *P* закатывают вверх по наклонной плоскости приложив в центре катка силу $\vec{F}$ под углом 30° к наклонной плоскости (рис. 5.11). Сама плоскость наклонена под углом 30° к горизонту. Величина силы *F* = 2*P*. В начальном положении центр катка имел скорость V_0.

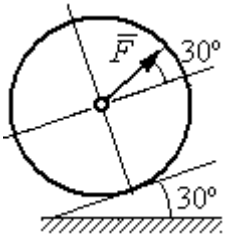


Рис. 5.11. Движение катка на наклонной плоскости

На какое расстояние *S* переместился центр катка, если в конце перемещения его скорость удвоилась.

Решение

Применим теорему об изменении кинетической энергии на конечном перемещении системы: $T - T_0 = \sum A(F_k)$. На каток действует сила тяжести $\vec{P}$, сила $\vec{F}$, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления диска с наклонной плоскостью (рис. 5.12). При перемещении центра катка на расстояние *S* вдоль наклонной плоскости работу совершают только сила $\vec{F}$: $A(\vec{F}) = F\cos 30° S$ и сила тяжести: $A(\vec{P}) = -Ph$, где *h* – перепад высот при перемещении центра масс катка. Работа реакции опоры и силы сцепления равна нулю.

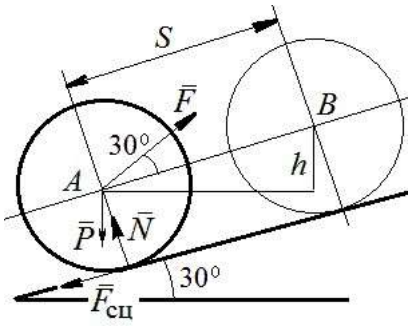


Рис. 5.12. Расчётная схема движения катка

Кинетическая энергия катка $T = \dfrac{1}{2}mV_A^2 + \dfrac{1}{2}J_{zA}\omega^2$, где J_{zA} – момент инерции фигуры относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_{zA} = \dfrac{mr^2}{2}$. Выражая угловую скорость катка через

скорость центра масс $\omega = \dfrac{V_A}{r}$, с учётом выражения момента инерции катка, получим энергию катка в виде: $T = \dfrac{3}{4} m V_A^2$.

Составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии при перемещении центра катка на расстояние S: $\dfrac{3}{4} m V_B^2 - \dfrac{3}{4} m V_A^2 = F\cos 30° S - Ph$, где $V_A = V_0$ $V_B = 2V_0$, $F = 2P$, $h = S\sin 30°$.

Найдём искомое перемещение: $S = \dfrac{9V_0^2}{4g\left(2\cos 30° - \sin 30°\right)}$.

Упражнения

Упражнение 5.1. Крановая тележка массы m_1 может перемещаться по горизонтальной балке без трения (рис. 5.13). В центре масс тележки закреплён трос длиной l, на другом конце которого привязан груз массы m_2. Трос может совершать колебательные движения в вертикальной плоскости. В начальный момент трос был в вертикальном положении. Определить горизонтальное перемещение тележки в зависимости от угла наклона троса. Весом троса пренебречь.

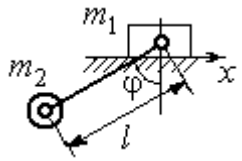


Рис. 5.13. Движение крановой тележки

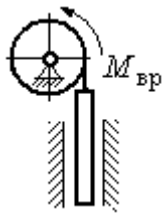


Рис. 5.14. Схема механизма лебёдки

Упражнение 5.2. К барабану лебёдки, поднимающей штангу, приложен вращающий момент, пропорциональный времени $M_{ВР} = kt$ (рис. 5.14). Штанга массы m_1 поднимается посредством каната, навитого на барабан массы m_2 и радиуса r. В начальный момент система находилась в покое. Определить угловую скорость барабана, считая его однородным диском.

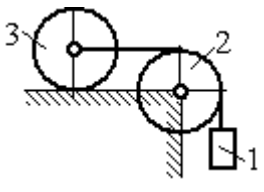


Рис. 5.15. Схема движения системы

Упражнение 5.3. Груз 1 массы m_1 подвешен на нерастяжимом тросе, другой конец которого переброшен через блок 2 и закреплён в центре масс катка 3 (рис. 5.15). Каток 3 катится по горизонтальной поверхности без проскальзывания. Блок 2 и каток 3 – однородные диски массы m_2 и m_3, радиуса r. В начальный момент система находилась в покое. Определить скорость груза, когда он опустится на высоту h, если к катку 3 приложен момент M.

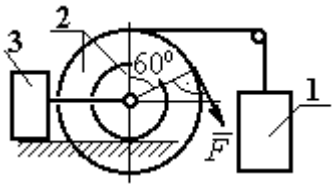


Рис. 5.16. Схема механизма катка

Упражнение 5.4. Механическая система включает два груза 1 и 3 одинакового веса P и каток 2 весом $2P$, радиусом $R = 2r$ с цилиндрическим выступом радиусом r (рис. 5.16). Каток катится выступом по неподвижной поверхности без проскальзывания. К катку по касательной к окружности приложена сила $F = 2P$. Найти ускорение центра масс катка, если его радиус инерции относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения: $i_{zC} = r\sqrt{2}$.

5.4. Применение общих теорем динамики системы к описанию движений твёрдого тела

Поступательное движение твердого тела описывается дифференциальными уравнениями: $m\ddot{x} = \sum F^e_{kx}$, $m\ddot{y} = \sum F^e_{ky}$, $m\ddot{z} = \sum F^e_{kz}$ - или в алгебраической форме $ma_{Cx} = \sum F^e_{kx}$, $ma_{Cy} = \sum F^e_{ky}$, $ma_{Cz} = \sum F^e_{kz}$, где m – масса тела; $\ddot{x} = a_{Cx}$, $\ddot{y} = a_{Cy}$, $\ddot{z} = a_{Cz}$ – проекции ускорения центра масс тела на координатные оси; F^e_{kx}, F^e_{ky}, F^e_{kz} – проекции внешних сил.

Вращательное движение твердого тела относительно неподвижной оси z описывается дифференциальным уравнением: $J_z \dfrac{d\omega}{dt} = \sum M_z(\vec{F}^e_k)$ или алгебраическим уравнением: $J_z\varepsilon = \sum M_z(\vec{F}^e_k)$, где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела; $\sum M_z(\vec{F}^e_k)$ – сумма моментов внешних сил относительно оси z; J_z – момент инерции тела относительно оси z.

Плоскопараллельное движение твердого тела описывается уравнениями движения центра масс и вращательного движения тела относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

В проекции на координатные оси уравнения плоскопараллельного движения тела имеют вид:

$$ma_{Cx} = \sum F_{kx}^e ;\ ma_{Cy} = \sum F_{ky}^e ;\ J_{zC}\varepsilon = \sum M_{zC}(\vec{F}_k^e),$$

где a_{Cx}, a_{Cy} – проекции ускорения центра масс тела; F_{kx}^e, F_{ky}^e – проекции на оси координат внешних сил, действующих на тело; J_{zC} – момент инерции тела относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения; ε – угловое ускорение тела; $M_{zC}(\vec{F}_k^e)$ – моменты внешних сил относительно оси, проходящей через центр масс.

Проводя динамический расчет механической системы, следует рассматривать движение каждого тела системы в отдельности, предварительно освободив его от связей и заменив их действие реакциями.

Примеры решения задач на составление уравнений движения твердых тел

Задача 59. Лебёдка поднимает груз 1 массы $m_1 = 50$ кг посредством троса, переброшенного через блок 3 и навитого на барабан 2 массы $m_2 = 20$ кг, радиуса $r = 0{,}8$ м (рис. 5.17). К барабану приложен постоянный вращающий момент $M_{вр} = 480$ Н·м. Определить ускорение груза, натяжение троса и реакцию шарнира барабана 2. Весом троса и массой блока 3 пренебречь, барабан считать сплошным цилиндром.

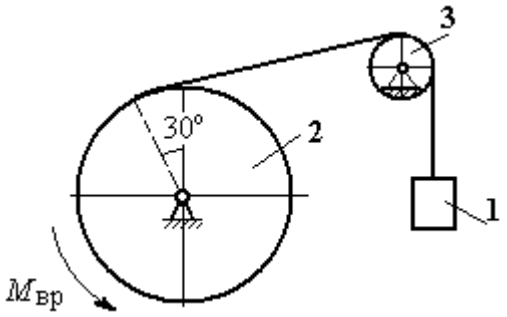


Рис. 5.17. Механизм лебёдки

Решение

Составим уравнение движения груза 1. Для этого освобождаем груз от связей, заменив действие троса реакцией. На груз действует сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция троса $\vec{H}_1$ (рис. 5.18). Выберем ось *x* по направлению движения груза. Уравнение движения груза в проекции на ось *x*: $m_1 a_1 = H_1 - P_1$.

Рассмотрим движение барабана 2. Освободим барабан от связей и заменим их действие реакциями.

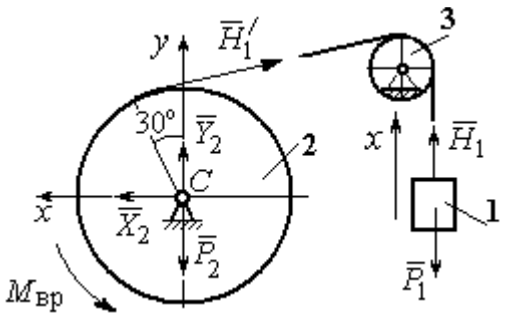


Рис. 5.18. Внешние силы и реакции, действующие на груз и барабан при движении системы

На барабан действует сила тяжести $\vec{P}_2$, пара сил с моментом вращения $M_{вр}$, реакция троса $\vec{H}_1'$ и реакция шарнира (на рис. 5.18 разложена на составляющие $\vec{X}_2$, $\vec{Y}_2$). Так как массой блока 3 пренебрегаем, то модули сил $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_1'$ равны. Направления действия сил и момента показаны на рис. 5.18.

Уравнение вращательного движения барабана относительно оси z: $J_z\varepsilon_2 = \sum M_z(F_k) = M_{вр} - H_1'r$, где момент инерции барабана $J_z = \dfrac{m_2 r^2}{2}$.

Продифференцируем по времени равенство $V_1 = \omega_2 r$ и выразим угловое ускорение барабана через ускорение груза 1. Получим $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{r}$. Подставляя выражение углового ускорения в уравнение вращательного движения барабана с учётом равенства модулей сил $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_1'$, напишем уравнения движения барабана и груза в виде системы уравнений:

$$m_1 a_1 = H_1 - P_1, \;\; m_2 a_1 = \frac{2M_{вр}}{r} - 2H_1,$$

откуда находим a_1= 1,82 м/с^2, H_1 = 581,8 Н. Натяжение троса численно равно реакции.

Для определения реакции шарнира составим (формально) уравнение движения центра масс блока 2 в проекциях на оси x, y (см. рис. 5.18):

$$m_2 a_{Cx} = X_2 - H_1'\cos 30^\circ = 0, \; m_2 a_{Cy} = Y_2 + H_1'\cos 60^\circ - P_2 = 0.$$

Отсюда $X_2 = 503{,}84$ Н, $Y_2 = -94{,}7$ Н, $R_2 = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2} = 512{,}66$ Н.

Задача 60. Барабан весом G, радиусом R имеет цилиндрический выступ радиусом r (рис. 5.19). Барабан скатывается по наклонной плоскости с углом наклона 30°, опираясь на неё поверхностью выступа. К барабану приложены постоянные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$. Сила $\vec{F}_1$ направлена по касательной к поверхности барабана. Сила $\vec{F}_2$ действует под углом 30° к диаметру барабана, перпендикулярному наклонной плоскости. В начальный момент времени барабан приведён в равновесие парой сил с моментом M.

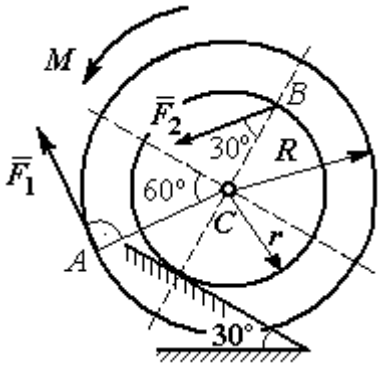


Рис. 5.19. Схема движения барабана по наклонной плоскости

Определить угловое ускорение барабана и закон движения центра масс, если в положении равновесия величину уравновешивающего момента увеличить в 1,2 раза. Исходные данные для решения задачи: R = 0,6 м, r = 0,2 м, G = 100 Н, F_1 = 60 Н, F_2 = 25 Н, радиус инерции барабана i_z = 0,4 м.

Решение

На барабан действуют силы $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, сила тяжести $\vec{G}$, пара сил с неизвестным моментом M, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила $\vec{F}_{сц}$ сцепления барабана с поверхностью. Сила сцепления приложена в точке K касания выступа барабана с наклонной плоскостью и направлена вдоль неё (рис. 5.20).

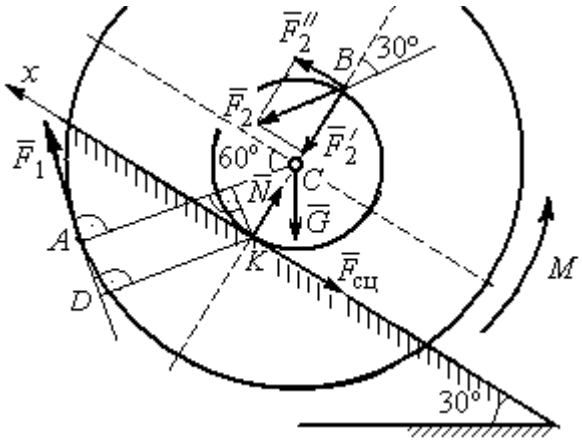


Рис. 5.20. Силы, действующие на барабан, во время движения

Для определения момента M, приводящего барабан в равновесие, запишем уравнение равно-

весия в виде равенства нулю моментов сил $\sum M_K(\vec{F}_k^e) = 0$ относительно точки *K*. Точка *K* выбрана с той целью, что в уравнение не будет входить момент неизвестной силы сцепления.

На рис. 5.20 показано разложение силы $\vec{F}_2$: $\vec{F}_2 = \vec{F}_2' + \vec{F}_2''$. Значения составляющих определяются как проекции: $F_2' = F_2\cos 30°$, $F_2'' = F_2\sin 30°$.

Применяя теорему Вариньона, вычислим момент силы $\vec{F}_2$ относительно точки *K*: $M_K(\vec{F}_2) = M_K(\vec{F}_2') + M_K(\vec{F}_2'') = F_2\sin 30° \cdot 2r$.

Момент силы $\vec{F}_1$ относительно точки *K*:

$$M_K(\vec{F}_1) = -F_1 \cdot KD = -F_1(R - r\cos 30°).$$

В результате уравнение моментов сил при равновесии барабана принимает вид

$$\sum M_K(\vec{F}_k^e) = -F_1(R - r\cos 30°) + F_2\sin 30° \cdot 2r - Gr\sin 30° + M = 0.$$

Подставляя сюда исходные данные задачи, находим величину уравновешивающего момента $M = 30{,}61$ Н·м. Направление момента показано дуговой стрелкой на рис. 5.20.

Увеличим значение момента *M*, удерживающего барабан в равновесии, в 1,2 раза: $M_1 = 1{,}2M$. Возникшее после этого качение барабана вверх по наклонной плоскости представляет собой плоскопараллельное движение, которое описывается с применением теорем о движении центра масс и об изменении кинетического момента.

Уравнение движения центра масс барабана в проекции на ось *x*, направленную вверх по наклонной плоскости, имеет вид:

$$m\ddot{x}_C = F_1\cos 30° + F_2\cos 60° - G\cos 60° - F_{\text{сц}},$$

где x_C – координата центра масс барабана.

Применив теорему об изменении кинетического момента барабана относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости

движения и считая моменты сил положительными, если они создают вращение в сторону движущегося вверх барабана, выразим уравнение вращательного движения барабана вокруг оси z в виде:

$$J_{zC}\ddot{\varphi} = -F_1 R + F_2 r\cos 60° + F_{\text{сц}} r + M_1,$$

где φ – угол поворота барабана; J_{zC} – момент инерции барабана, $J_{zC} = mi_z^2$; i_z – радиус инерции. С учётом соотношения $\ddot{\varphi} = \dfrac{\ddot{x}_C}{r}$ получим уравнение:

$$m\ddot{x}_C\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right) = -F_1\left(\frac{R}{r} - \cos 30°\right) + 2F_2\cos 60° - G\cos 60° + \frac{M_1}{r}.$$

После подстановки данных задачи находим дифференциальное уравнение движения центра масс: $\ddot{x}_C = 0{,}6$. Дважды интегрируя его с нулевыми начальными условиями (так как движение началось из состояния покоя), находим закон движения центра масс: $x_C = 0{,}3t^2$ м. Из уравнения следует, что барабан движется в сторону положительного направления оси x.

Угловое ускорение барабана $\varepsilon = \ddot{\varphi} = \dfrac{\ddot{x}_C}{r} = 3$ рад/с^2.

Задача 61. Механизм (рис. 5.21) включает в себя груз 1, каток 2 и ступенчатый барабан 3, соединённых нерастяжимыми нитями. Движение механизма происходит из состояния покоя в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы

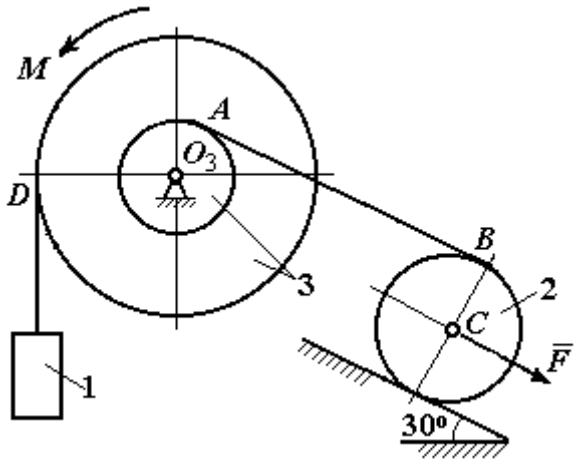


Рис. 5.21. Конструкция механической системы

$\vec{F}$, приложенной в центре масс катка 2, и пары сил с моментом M, приложенной к барабану 3. Качение катка 2 по наклонной плоскости с углом наклона к горизонту 30º происходит без проскальзывания.

Каток 2 считать однородным диском радиуса R_2. Радиусы ступеней барабана 3: R_3, r_3, радиус инерции барабана i_3.

Найти ускорение груза 1, силы натяжения нитей и динамическую реакцию шарнира барабана 3, если $P_1 = P_2 = 2P$; $P_3 = 3P$, $F = 3P$; $M = Pr$, $R_2 = 2r$; $R_3 = 3r$; $r_3 = r$; $i_3 = r\sqrt{3}$.

Решение

Рассмотрим движение каждого тела системы отдельно, предварительно освободив тела от связей и заменив их действие реакциями. На рис. 5.22 изображены силы, действующие на тела системы, после освобождения их от связей и направление движения каждого тела.

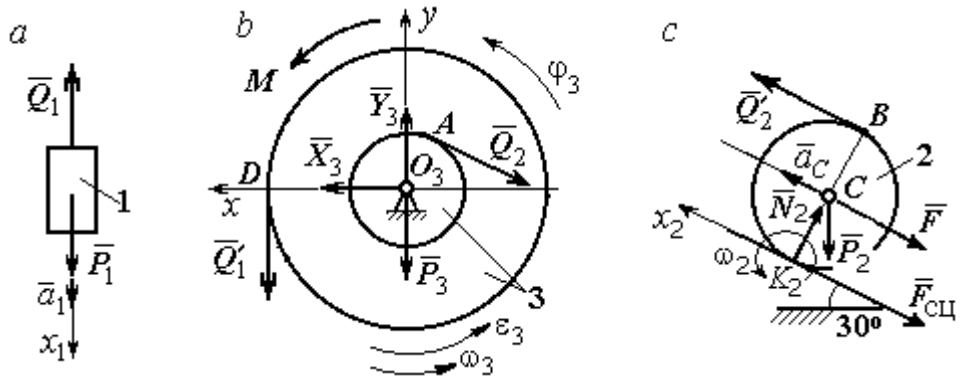


Рис. 5.22. Расчетные схемы для описания движения тел, входящих в систему

Допустим, груз движется вниз со скоростью V_1, ускорением a_1. К нему приложена сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция нити $\vec{Q}_1$ (рис. 5.22, *a*). Направим ось x_1 в сторону движения груза. Уравнение движения груза вдоль оси x_1 имеет вид:

$$m_1 a_1 = \sum F_{kx} = P_1 - Q_1 = 2P - Q_1 .$$

Барабан 3 вращается вокруг неподвижной оси z, проходящей через центр масс O_3. На диск 3 действует сила тяжести $\vec{P}_3$, реакция подшипника $\vec{R}_3$ (на

рис. 5.22, *b* показано разложение реакции на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$), пара сил с моментом *M* и реакции нитей $\vec{Q}_1'$ и $\vec{Q}_2$.

При составлении уравнения вращательного движения барабана моменты сил относительно оси считаем положительными, если они создают поворот в сторону вращения барабана. Уравнение вращения барабана 3 имеет вид:

$$J_{zO_3}\varepsilon_3 = \sum M_{zO_3}(F_k) = Q_1' R_3 + M - Q_2 r_3 = Q_1' 3r + Pr - Q_2 r,$$

Момент инерции барабана относительно оси *z*: $J_{zO_3} = m_3 i_3^2 = \dfrac{9Pr^2}{g}$;

Каток 2 совершает плоскопараллельное движение. К нему приложена сила тяжести $\vec{P}_2$, сила $\vec{F}$, реакция нити $\vec{Q}_2'$, нормальная реакция $\vec{N}_2$ наклонной плоскости и сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления диска с поверхностью (рис. 5.22, *c*).

Выберем ось x_2 по направлению движения центра масс катка 2. Плоскопараллельное движение катка описывается уравнениями движения его центра масс в проекции на ось x_2 и вращения вокруг оси, походящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска:

$$m_2 a_C = Q_2' - F - F_{\text{сц}} - P_2 \cos 60^\circ = Q_2' - 3P - F_{\text{сц}} - P;$$

$$J_C \varepsilon_2 = Q_2' R_2 + F_{\text{сц}} R_2 = Q_2' 2r + F_{\text{сц}} 2r, \quad J_C = \frac{m_2 R_2^2}{2}.$$

При составлении второго уравнения момент силы считается положительным, если он создаёт поворот в сторону вращения катка.

К системе четырех уравнений, описывающих движения тел в системе, необходимо добавить уравнения связей между ускорениями точек и угловыми ускорениями тел. Предположим, скорость центра масс катка 2 равна V_C (см. рис. 5.22, *c*). Угловая скорость катка $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK_2} = \dfrac{V_C}{R_2}$, где CK_2 – расстояние от

центра масс катка 2 до его мгновенного центра скоростей. Продифференцировав по времени последнее равенство, получим: $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \dfrac{\dot{V}_C}{R_2} = \dfrac{a_C}{2r}$.

Скорость точки B катка 2 $V_B = \omega_2 \cdot BK_2 = 2V_C$. Приравняв скорость точки A к скорости точки B (см. рис. 5.21), получим: $2V_C = V_B = V_A = \omega_3 r_3 = \omega_3 r$, откуда $\omega_3 = \dfrac{2V_C}{r}$. После дифференцирования найдём: $\varepsilon_3 = \dfrac{2a_C}{r}$.

Скорость груза 1 связана со скоростью центра масс катка 2 следующим образом: $V_1 = V_D = \omega_3 R_3 = \dfrac{2V_C}{r} 3r = 6V_C$. Тогда ускорение груза 1 $a_1 = 6a_C$.

После подстановки уравнений связи в уравнения движения с учётом равенства модулей сил $\vec{Q}_1'$ и $\vec{Q}_1$, а также $\vec{Q}_2$ и $\vec{Q}_2'$ получим систему:

$$\frac{12P}{g} a_C = 2P - Q_1; \quad \frac{18P}{g} a_C = 3Q_1 + P - Q_2,$$

$$\frac{2P}{g} a_C = Q_2 - 4P - F_{\text{сц}}; \quad \frac{P}{g} a_C = Q_2 + F_{\text{сц}},$$

откуда находим: $a_C = 0{,}09g$, $Q_1 = 0{,}92P$, $Q_2 = 2{,}14P$.

Динамические реакции $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, действующие на ось вращающегося барабана 3 (рис. 5.22, *b*), определяются из уравнений, которые можно получить, формально применив к барабану теорему о движении центра масс. Так как центр масс барабана 3 неподвижен, его ускорение равно нулю, $a_{O_3} = 0$. Тогда уравнения движения его центра масс в проекциях на оси x, y имеют вид:

$$m_3 a_{O_3 x} = X_3 - Q_2 \cos 30^\circ = 0;$$

$$m_3 a_{O_3 y} = Y_3 - Q_1 - P_3 - Q_2 \cos 60^\circ = 0.$$

Подставляя значения $Q_1 = 0{,}92P$ и $Q_2 = 2{,}14P$, находим составляющие реакции оси барабана 3: $X_3 = Q_2 \cos 30^\circ = 1{,}85P$, $Y_3 = Q_1 + P_3 + Q_2 \cos 60^\circ = 4{,}98P$.

Полная величина реакции оси барабана 3: $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} = 5{,}31P$.

Задача 62. Подъёмное устройство (рис. 5.23) состоит из однородного диска 1 массой m_1, радиусом r_1, ступенчатого диска 2 массой $m_2 = 3m_1$, радиусом $R_2 = 4r_1$ и радиусом ступеньки $r_2 = r_1$ и груза 3 массой $m_3 = 2m_1$. Система движется из состояния покоя в вертикальной плоскости под действием сил тяжести и пары сил с моментом $M = m_1 g r_1$, приложенной к диску 1. Определить ускорение груза 3 и натяжение нити груза 3, если радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, походящей через центр масс, перпендикулярно плоскости диска 2, $i_{2C} = 2r_1$.

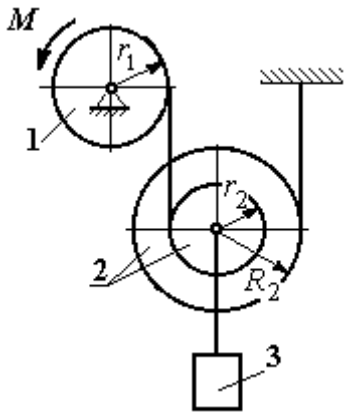


Рис. 5.23. Конструкция подъёмного устройства

Решение задачи осуществить с применением теоремы об изменении кинетической энергии системы и проверить его методом динамического расчёта, составляя уравнения движения тел, входящих в систему.

Решение

1. Для неизменяемой системы (состоящей из абсолютно твёрдых тел, соединённых нерастяжимыми нитями), движущейся из состояния покоя, теорема об изменении кинетической энергии на конечном перемещении имеет вид $T = \sum A(\vec{F}_k^e)$. Схема движения механизма в предположении, что груз 3 опускается, показана на рис. 5.24.

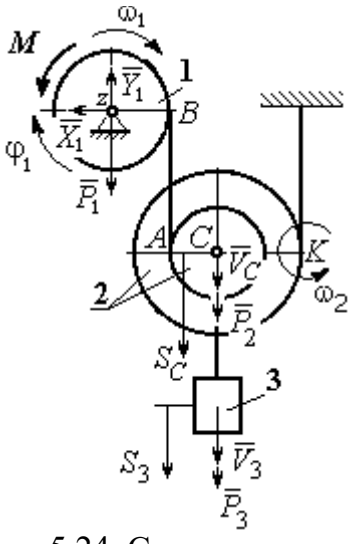


Рис. 5.24. Схема движения механизма

Диск 1 вращается вокруг неподвижной оси z. Кинетическая энергия диска 1: $T_1 = \dfrac{J_{1z}\omega_1^2}{2}$, где момент инерции диска $J_{1z} = \dfrac{m_1 r_1^2}{2}$.

У диска 2 плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия диска 2: $T_2 = \frac{m_2 V_C^2}{2} + \frac{J_{2C}\omega_2^2}{2}$, где V_C – скорость центра масс диска 2. Момент инерции диска 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно движению диска, $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$.

Кинетическая энергия груза 3: $T_3 = \frac{m_3 V_3^2}{2}$.

Энергия механизма равна сумме энергий тел, входящих в систему:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{J_{1z}\omega_1^2}{2} + \frac{m_2 V_C^2}{2} + \frac{J_{2C}\omega_2^2}{2} + \frac{m_3 V_3^2}{2}.$$

Выразим угловые скорости дисков 1 и 2 и скорость центра масс диска 2 через скорость груза 3.

Скорость центра масс диска 2 равна скорости груза 3, $V_C = V_3$. Угловая скорость диска 2 $\omega_2 = \frac{V_C}{CK} = \frac{V_3}{R_2}$, где CK – расстояние от центра диска 2 до его мгновенного центра скоростей.

Скорость точки B нити равна скорости точки A. Из равенства $\omega_1 r_1 = \omega_2 (R_2 + r_2)$ найдём: $\omega_1 = \frac{(r_2 + R_2)}{r_1}\omega_2 = \frac{(r_2 + R_2)}{r_1}\frac{V_3}{R_2}$.

Подставляя найденные зависимости в выражение энергии системы, получим кинетическую энергию механизма:

$$T = \frac{V_3^2}{2}\left[\frac{m_1}{2}\left(1 + \frac{r_2}{R_2}\right)^2 + m_2\left(1 + \frac{i_{2C}^2}{R_2^2}\right) + m_3\right] = \frac{209}{64} m_1 V_3^2.$$

Во время движения механизма работу совершают силы тяжести $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и пара сил с моментом M. Перемещения S_C и S_3 точек приложения сил $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и угол φ_1 поворота диска 1 показаны на рис. 5.24.

Сумма работ сил $\sum A(\vec{F}_k^e) = P_3S_3 + P_2S_C - M\varphi_1$. Работа момента отрицательная, так как заданное направление момента противоположно выбранному направлению вращения колеса 1.

Выразим перемещение центра масс диска 2 и угол поворота диска 1 через перемещение груза 3. Проинтегрировав равенство скоростей $V_3 = V_C$, получим равенство перемещений: $S_3 = S_C$. Аналогично, из равенства $\omega_1 = \frac{(r_2 + R_2)}{r_1}\frac{V_3}{R_2}$ следует соотношение $\varphi_1 = \frac{(r_2 + R_2)}{r_1}\frac{S_3}{R_2}$.

В итоге суммарная работа внешних сил в механизме:

$$\sum A(\vec{F}_k^e) = \left[P_3 + P_2 - M\frac{(r_2 + R_2)}{r_1 R_2} \right] S_3 = \frac{15}{4} m_1 g S_3 .$$

Составляя уравнение теоремы об изменении кинетической энергии системы, получим равенство:

$$\frac{209}{64} m_1 V_3^2 = \frac{15}{4} m_1 g S_3 \text{ или } V_3^2 = \frac{240}{209} g S_3 .$$

Продифференцируем последнее равенство. Получим: $2V_3\frac{dV_3}{dt} = \frac{240}{209} g \frac{dS_3}{dt}$.

Так как $\frac{dS_3}{dt} = V_3$, а $\frac{dV_3}{dt} = a_3$, находим ускорение груза 3: $a_3 = \frac{120}{209} g$ м/с^2.

Для того чтобы найти натяжение нити груза 3, необходимо написать уравнение его движения. Выделим груз 3 из системы, заменив действие нити её реакцией H_3. Выберем ось x по направлению движения груза. Применим к описанию движения груза теорему о движении центра масс, написав её проекцию на ось x: $m_3 a_3 = P_3 - H_3$, где H_3 –реакция нити. При известном ускорении a_3 находим реакцию нити $H_3 = \frac{178}{209} m_1 g$. Натяжение нити численно равно реакции, но направлено в противоположную сторону.

2. Для решения задачи вторым способом – путём составления уравнений движения тел, входящих в состав механизма, освободим тела от связей и заменим их реакциями. На рис. 5.25 изображены силы и реакции, действующие на каждое тело, после освобождения его от связей, а также направления угловых ускорений тел и ускорения центров масс.

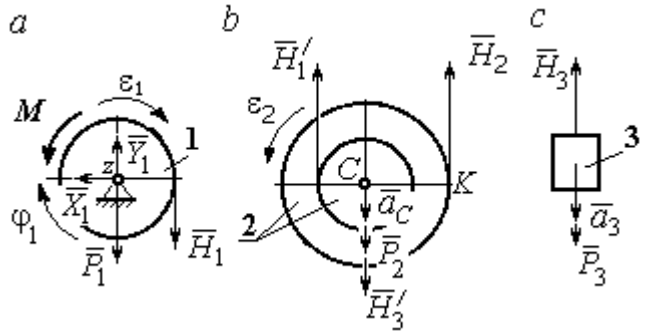


Рис. 5.25. Внешние силы и реакции связей, действующие на тела системы

Диск 1 вращается вокруг неподвижной оси *z*. На диск действует сила тяжести $\vec{P}_1$, реакция подшипника $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$, пара сил с моментом *M* и реакция нити $\vec{H}_1$. Вращение диска описывается уравнением: $J_{1z}\varepsilon_1 = \sum M_z(F_k) = H_1 r_1 - M$. Момент инерции диска 1 относительно оси *z*, $J_{1z} = \dfrac{m_1 r_1^2}{2}$.

Диск 2 (рис. 5.25, *b*) совершает плоскопараллельное движение. К нему приложена сила тяжести $\vec{P}_2$ и реакции нитей $\vec{H}_1'$, $\vec{H}_2$ и $\vec{H}_3'$. Плоскопараллельное движение диска 2 описывается уравнением движения его центра масс в проекции на вертикальную ось и уравнением вращения диска вокруг оси, походящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска:

$$m_2 a_C = P_2 - H_1' - H_2 + H_3'; \;\; J_{2C}\varepsilon_2 = H_2 R_2 - H_1' r_2 .$$

Момент инерции диска 2 $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$. При составлении уравнения вращательного движения диска 2 момент силы считается положительным, если он создаёт поворот в сторону вращения диска.

Груз 3 совершает поступательное движение. К нему приложены сила тяжести $\vec{P}_3$ и реакция нити $\vec{H}_3$ (рис. 5.25, *c*). Уравнение движения груза 3 в проекции на вертикальную ось, направленную в сторону его движения, имеет вид:

$$m_3 a_3 = P_3 - H_3 ,$$

Выразим угловые ускорения дисков 1 и 2 и ускорение центра масс диска 2 через ускорение груза 3. Для этого нужно продифференцировать соответствующие кинематические соотношения между скоростями. Так, из найденных ранее выражений: $V_3 = V_C$, $\omega_2 = \dfrac{V_3}{R_2}$, $\omega_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{V_3}{R_2}$ следует: $a_3 = a_C$, $\varepsilon_2 = \dfrac{a_3}{R_2}$, $\varepsilon_1 = \dfrac{(r_2 + R_2)}{r_1}\dfrac{a_3}{R_2}$.

Подставляя кинематические соотношения между ускорениями в уравнения движения тел с учётом равенства модулей сил $\vec{H}_1$ и $\vec{H}_1'$, а также $\vec{H}_3$ и $\vec{H}_3'$, получим систему уравнений, описывающих движение звеньев механизма:

$$\frac{5}{8}m_1 a_3 = H_1 - m_1 g;\ \ 3m_1 a_3 = 3m_1 g - H_1 - H_2 + H_3;$$

$$3m_1 a_3 = 4H_2 - H_1;\ \ 2m_1 a_3 = 2m_1 g - H_3.$$

Решая систему, найдём $a_3 = \dfrac{120}{209}g$ м/с^2, $H_3 = \dfrac{178}{209}m_1 g$. Выражения ускорения a_3 груза 3 и натяжения нити H_3 совпадают с аналогичными выражениями, полученными в пункте 1 при решении данной задачи с применением теоремы об изменении кинетической энергии.

Упражнения

Упражнение 5.5. Система состоит из двух катков 1 и 2, соединённых невесомым стержнем (рис. 5.26). Каток 1 весом P, радиуса r. Каток 2 весом $2P$, радиуса $3r$ имеет цилиндрический выступ радиуса r. Невесомый стержень, параллельный плоскости качения катков, закреплён в центре катка 1 и передаёт движение катка 1 катку 2 в верхней точке вертикального диаметра цилиндрического выступа без проскальзывания. Качение катков без скольжения. К катку 1 приложена пара сил с моментом $M = 4Pr$. В центре масс катка 2 приложена сила $F = 2P$. Радиус инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр катка перпендикулярно плоскости движения, $i_2 = r\sqrt{2}$. Найти ускорение центра масс катка 1 и реакцию стержня.

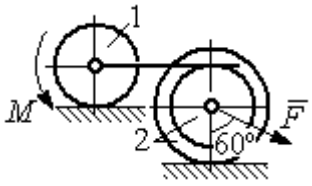


Рис. 5.26. Система катков

Упражнение 5.6. С помощью подъёмного устройства (рис. 5.27) производится подъём груза 1. Нить, закреплённая одним концом на неподвижной поверхности, спускается, охватывает снизу блок 2 массы $m_2 = m$, радиуса r, затем поднимается и проходит параллельно горизонтальной плоскости, где к концу её привязан груз 3 массы $m_3 = m$, передвигающийся по плоскости под действием силы $F = 2{,}5mg$. Нити, удерживающие блок 2, вертикальны. Груз 1 массы $m_1 = 3m$ прикреплён к оси блока 2. Найти ускорение груза 1 и натяжения нитей, удерживающих блок 2.

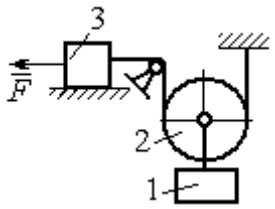


Рис. 5.27. Подъёмное устройство

Упражнение 5.7. Груз 1 массы $m_1 = m$, спускается вниз по наклонной плоскости без трения (рис. 5.28). Нить, прикреплённая к грузу 1, другим своим концом намотана на барабан катка 2 радиуса $R = 2r$ и при движении груза заставляет барабан катиться по горизонтальной поверхности цилиндрическим выступом радиуса r. Качение происходит без проскальзывания. К центру катка привязана другая нить, посредством которой каток тащит за собой груз 3 массы $m_3 = 2m$, скользящий по горизонтальной поверхности без трения. Масса катка $m_2 = 3m$, радиус инерции катка относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения $i_2 = r\sqrt{3}$. По касательной к ободу катка 2 приложена сила $F = mg$ (точка приложения силы см. рис. 5.28). Определить ускорение груза 1 и натяжения нитей.

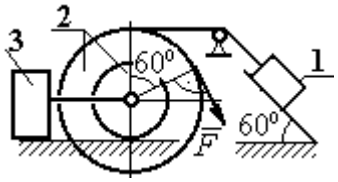


Рис. 5.28. Схема движения механической системы

6. ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ

6.1. Принцип Даламбера для системы

Силой инерции материальной точки называют векторную величину, модуль которой равен произведению массы точки на модуль её ускорения. Направлен вектор силы инерции точки в сторону, противоположную ускорению $\vec{R}^{\text{и}} = -m\vec{a}$, где m – масса точки; $\vec{a}$ – вектор ускорения точки.

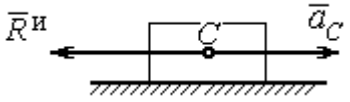


Рис. 6.1. Главный вектор сил инерции при поступательном движении твердого тела

При поступательном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ главный вектор сил инерции $\vec{R}^{\text{и}}$ по модулю $R^{\text{и}} = ma_C$, приложен в центре масс тела и направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$ (рис. 6.1).

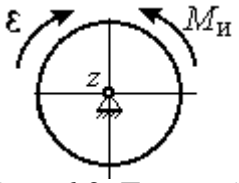


Рис. 6.2. Главный момент сил инерции при вращении тела вокруг оси, проходящей через центр масс

При вращении тела вокруг неподвижной оси z, проходящей через центр масс, главный вектор сил инерции обращается в нуль. Главный момент $\vec{M}^{\text{и}}$, сил инерции относительно оси вращения равен по величине $M^{\text{и}} = J_z\varepsilon$, где J_z – момент инерции тела относительно оси z; ε – угловое ускорение тела. Направлен главный момент сил инерции в сторону, противоположную угловому ускорению (рис. 6.2).

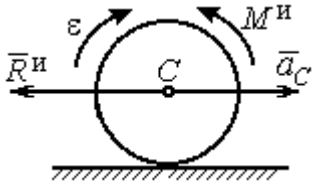


Рис. 6.3. Главный вектор и главный момент сил инерции при плоскопараллельном движении твердого тела

При плоскопараллельном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ и угловым ускорением ε главный вектор сил инерции $\vec{R}^{\text{и}}$ равен по модулю $R^{\text{и}} = ma_C$, приложен в центре масс тела и направлен в сторону, противоположную ускорению центра масс $\vec{a}_C$ (рис. 6.3). Главный момент сил инерции $\vec{M}^{\text{и}}$ относи-

тельно оси, проходящей через центр масс тела перпендикулярно плоскости движения: $M^{\text{и}} = J_C\varepsilon$, где J_C – момент инерции тела относительно оси вращения, и направлен в сторону, противоположную угловому ускорению.

Если в любой момент времени к каждой из точек системы кроме действующих на нее внешних сил присоединить соответствующие силы инерции, то полученная система сил будет уравновешенной.

Принцип Даламбера даёт возможность составлять уравнения движения механической системы в виде уравнений равновесия (метод кинетостатики):

$$\sum \vec{F}_k^e + \vec{R}^{\text{и}} = 0,\ \sum \vec{M}_O(\vec{F}_k^e) + \vec{M}_O^{\text{и}} = 0,$$

где $\vec{F}_k^e$ –внешние силы, действующие на систему; $\vec{R}^{\text{и}}$ – главный вектор сил инерции; $\vec{M}_O(\vec{F}_k^e)$, $\vec{M}_O^{\text{и}}$ – моменты внешних сил и главный момент сил инерции относительно произвольного центра *O*.

Примеры решения задач на применение принципа Даламбера

Задача 63. Груз 1 массы m_1 = 10 кг спускается вниз по наклонной грани клина, образующей угол 60º с горизонтом, и посредством нити, переброшенной через блок 2, укреплённый в верхней точке клина, приводит в движение груз 3 массы m_3 = 5 кг (рис. 6.4). Клин *ABC* массы m_4 = 15 кг стоит гранью *AC* на горизонтальной гладкой поверхности и упирается в выступ *E*.

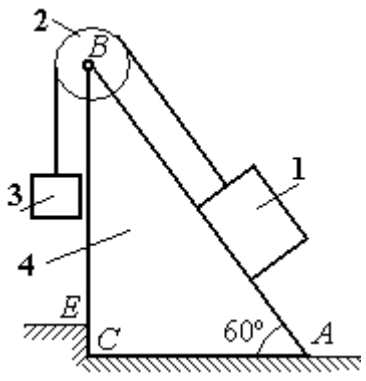


Рис. 6.4. Клин с грузами

Найти давление клина на выступ. Массой блока 2 и нити пренебречь.

Решение

Выберем систему, состоящую из клина *ABC*, блока 2, грузов 1 и 3 и нити, соединяющей грузы. Внешние силы, действующие на систему, – силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_3$ и $\vec{P}_4$ грузов 1, 3 и клина 4, горизонтальная реакция $\vec{R}_x$ упора клина в вы-

ступ и вертикальная реакция $\vec{R}_y$ опоры на горизонтальную поверхность. Реакция нити, реакция опоры груза 1 на наклонную поверхность клина и реакция шарнира *B* блока 2 для данной системы являются внутренними.

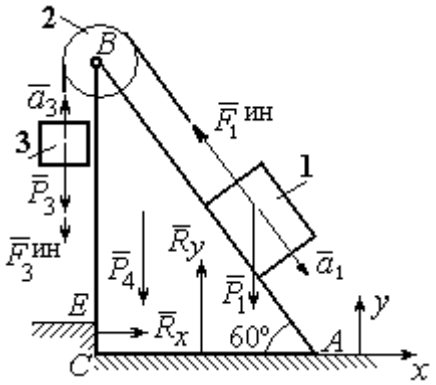


Рис. 6.5. Внешние силы и силы инерции, действующие на систему

Допустим, груз 1 движется вниз, груз 3 – вверх. Приложим силы инерции. Направления ускорений грузов и сил инерции показаны на рис. 6.5.

В соответствии с принципом Даламбера, полученная система сил находится в равновесии. Условие равновесия: $\sum \vec{F}_k^e + \vec{F}_1^{ин} + \vec{F}_3^{ин} = 0$.

Выберем оси *xy,* как показано на рис. 6.5, и спроектируем векторное равенство на ось *x*. Получим: $R_x - F_1^{ин}\cos 60^\circ = 0$, где модуль силы инерции $F_1^{ин} = m_1 a_1$.

Найдём ускорение груза 1. С этой целью рассмотрим отдельно движение грузов 1 и 3 (рис. 6.6 *a*, *b*).

Рассматривая груз 1 как отдельную систему, изобразим внешние силы: силу тяжести $\vec{P}_1$, реакцию нити $\vec{T}'$ и реакцию опоры $\vec{N}$ (см. рис. 6.6, *b*). Присоединим силу инерции $\vec{F}_1^{ин}$ и составим уравнение равновесия полученной системы сил в проекции на ось *x*, расположенную вдоль наклонной грани клина: $P_1 \sin 60^\circ - T' - F_1^{ин} = 0$, где $F_1^{ин} = m_1 a_1$.

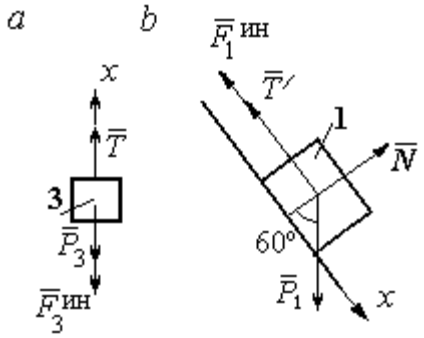


Рис. 6.6. Равновесие грузов

Для груза 3 внешними силами будут сила тяжести $\vec{P}_3$ и реакция нити $\vec{T}$. Присоединим к грузу 3 силу инерции $\vec{F}_3^{ин}$ (см. рис. 6.6, *a*) и составим уравне-

ние равновесия системы сил в проекции на ось *x*, выбранную по направлению движения груза 3: $T - P_3 - F_3^{\text{ин}} = 0$, где модуль силы инерции $F_3^{\text{ин}} = m_3 a_3$.

Решая полученную систему с учётом, что модули реакций нити и модули ускорений грузов равны: $T = T'$ и $a_1 = a_3$, находим ускорение грузов. Получим: $a_1 = a_3 = \dfrac{(m_1 \sin 60^\circ - m_3)g}{m_1 + m_3}$. Тогда давление клина на уступ:

$$R_x = F_1^{\text{ин}} \cos 60^\circ = m_1 g \frac{(m_1 \sin 60^\circ - m_3)}{(m_1 + m_3)} \cos 60^\circ .$$

Подставляя данные из условия задачи, найдём R_x = 11,97 Н.

Задача 64. Для подъёма грузов используется лебёдка со ступенчатым воротом, изображённая на рис. 6.7. Радиусы большой и малой ступенек барабана ворота r_1 и r_2, радиус инерции барабана относительно оси вращения i_3. Лебёдка установлена на горизонтальной балке *AB*, которая закреплена в точке *A* на неподвижном цилиндрическом шарнире и опирается на каток в точке *B*. Груз 1 поднимается на верёвке, навитой на большую ступеньку ворота. На малой ступеньке барабана ворота закреплена другая верёвка, удерживающая противовес 2. К барабану лебёдки приложен постоянный вращающий момент $M_{\text{вр}}$.

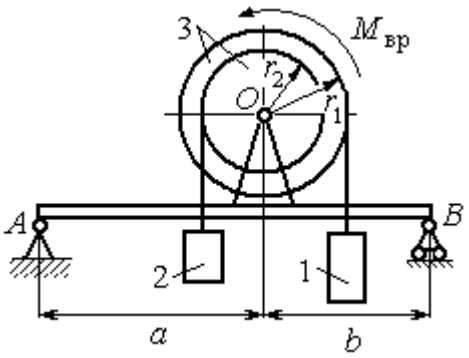


Рис. 6.7. Лебёдка на балке

Найти реакции опор балки во время движения груза, если радиусы ступенек барабана r_1 = 0,8 м, r_2 = 0,2 м, радиус инерции барабана относительно оси вращения i_3 =0,6 м, масса груза 1 m_1 = 100 кг, противовеса 2 m_2 =30 кг, масса барабана m_1 = 50 кг, величина вращающего момента $M_{\text{вр}}$ = 1050 Н·м, расстояния от крайних точек балки *A* и *B* до линии вертикального диаметра барабана *a* = 2 м, *b* = 1 м.

Решение

Выберем систему, включающую только барабан 3, грузы 1 и 2 и нити, связывающие грузы с барабаном (рис. 6.8). Внешние силы, действующие на эту систему, – пара сил, создающая вращающий момент $M_{\text{вр}}$, силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ грузов 1, 2 и барабана 3 и реакция $\vec{R}_O$ опоры барабана на шарнир в точке O. Натяжения нитей для данной системы являются внутренними и на рис. 6.8 не показаны.

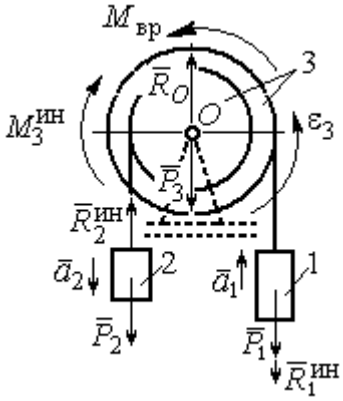


Рис. 6.8. Расчётная схема равновесия барабана

Приложим силы инерции. Направления главных векторов сил инерции $\vec{R}_1^{\text{ин}}$, $\vec{R}_2^{\text{ин}}$ и момента сил инерции $M_3^{\text{ин}}$ показаны на рис. 6.8.

Согласно принципу Даламбера, полученная система внешних сил и сил инерции является уравновешенной. Составим уравнения равновесия:

$$R_O + R_2^{\text{ин}} - P_2 - P_3 - P_1 - R_1^{\text{ин}} = 0;\ \ M_{\text{вр}} - M_3^{\text{ин}} - R_2^{\text{ин}} r_2 + P_2 r_2 - P_1 r_1 - R_1^{\text{ин}} r_1 = 0,$$

где $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$, $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$, $M_3^{\text{ин}} = J_{3O}\varepsilon_3$, $J_{3O} = m_3 i_3^2$.

Из второго уравнения с учётом кинематических соотношений: $\varepsilon_3 = \dfrac{a_1}{r_1}$ и $a_2 = \dfrac{r_2}{r_1} a_1$, найдём ускорение груза 1: $a_1 = \dfrac{r_1 (M_{\text{вр}} + P_2 r_2 - P_1 r_1)}{m_3 i_3^2 + m_2 r_2^2 + m_1 r_1^2}$. Подставляя данные задачи, получим a_1 = 3,49 м/с^2.

Вычислим модули сил инерции $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$=349 Н; $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$ = 26,17 Н.

Подставляя модули сил инерции в первое уравнение условий равновесия, найдём реакцию опоры барабана на шарнир O:

$$R_O = -R_2^{\text{ин}} + P_2 + P_3 + P_1 + R_1^{\text{ин}} = 2088{,}63 \text{ Н}.$$

Для определения реакций опор балки AB выберем объектом равновесия саму балку (рис. 6.9). На балку действуют сила $\vec{R}'_O$ давления со стороны шарнира O, реакция шарнира в точке A (на рис. 6.9 разложенная на составляющие $\vec{R}_{Ax}$, $\vec{R}_{Ay}$) и реакция $\vec{R}_{By}$ опоры балки на шарнир в точке B. Составим уравнения равновесия балки:

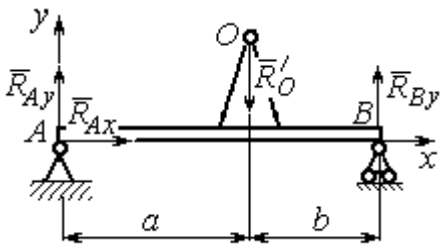


Рис. 6.9. Равновесие балки

$$\sum F_x = R_{Ax} = 0,\ \sum F_y = R_{Ay} - R'_O + R_{By} = 0,$$

$$\sum M_A(F) = R_{By}(a+b) - R'_O a = 0.$$

Решая систему с учётом того, что модули сил $\vec{R}'_O$ и $\vec{R}_O$ равны, найдём реакции опор балки: $R_{By} = R_O \dfrac{a}{a+b} = 1392{,}42$ Н; $R_{Ay} = R_O - R_{By} = 696{,}21$ Н.

Для сравнения реакции опор балки при неподвижном барабане $R_{By} = 1419{,}18$ Н, $R_{Ay} = 346{,}62$ Н.

Упражнение

Упражнение 6.1. Груз 1 соединён с грузом 2 нерастяжимой нитью, переброшенной через неподвижный блок (рис. 6.10). Опускаясь вниз, груз 2 перемещает груз 1 по горизонтальной поверхности призмы 3 без трения. Призма стоит на горизонтальной гладкой поверхности и упирается левым краем в выступ. Определить силу давления призмы на пол, если массы грузов 1, 2 и призмы 3 одинаковы и равны m. Массой нити и блока пренебречь.

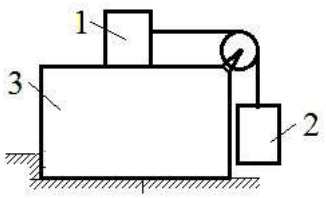


Рис. 6.10. Схема движения грузов в системе

6.2. Принцип возможных перемещений

Возможными перемещениями механической системы называют любую совокупность элементарных (бесконечно малых) перемещений точек системы из занимаемого в данный момент времени положения, которые допускаются всеми наложенными на систему связями.

Идеальными связями в механической системе называют такие связи, для которых сумма элементарных работ их реакций на любом возможном перемещении равна нулю.

Принцип возможных перемещений.

Если все приложенные к точкам системы внешние и внутренние силы разделить на **активные силы** и **реакции связей**, то для равновесия механической системы с идеальными связями необходимо и достаточно, чтобы сумма элементарных работ всех активных сил была равна нулю на любом возможном перемещении системы: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = 0$.

Примеры решения задач на применение принципа возможных перемещений

Задача 65. В талевом механизме барабан 1 состоит из двух соосных жестко связанных валов (рис. 6.11). При поднятии груза верхний трос барабана 1 наматывается на вал большего радиуса R_1, нижний – сматывается с вала меньшего радиуса r_1.

Какой вращающий момент M, постоянный по величине, нужно приложить к барабану, чтобы уравновесить груз весом P, прикреплённый в центре блока 4. Массами блоков и троса пренебречь.

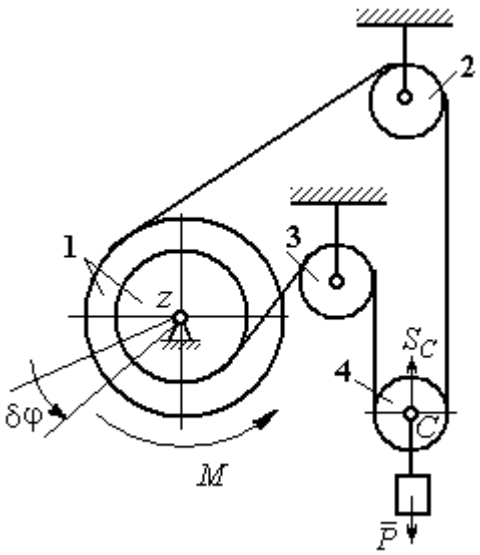


Рис. 6.11. Уравновешивание талевого механизма

Решение

Активными силами в системе являются сила тяжести груза $\vec{P}$ и уравновешивающий момент M. По принципу возможных перемещений для равновесия системы необходимо и достаточно выполнения условия:

$$\delta A(M) + \delta A(\vec{P}) = 0, \text{ или } M\delta\varphi_1 - P\delta S_C = 0.$$

где $\delta\varphi_1$ и δS_C – возможные перемещения барабана и груза.

Найдём связь между перемещениями $\delta\varphi_1$ и δS_C. Предположим, в механизме осуществляется подъём груза. На рис. 6.12 показано построение мгновенного центра скоростей блока 4 – точки *K*. Здесь скорость точки *A* блока 4 (рис. 6.12) равна скорости точек обода малого вала барабана 1, а скорость точки *B* – скорости точек обода большого вала. Составим пропорцию $\frac{V_B}{V_A}=\frac{BK}{AK}=\frac{r_4+CK}{r_4-CK}$, где r_4 – радиус блока 4 (см. рис.6.12). Подставляя выражения для скоростей точек *A* и *B* $V_A=\omega_1 r_1$, $V_B=\omega_1 R_1$, найдём расстояние: $CK=\frac{(R_1-r_1)r_4}{R_1+r_1}$.

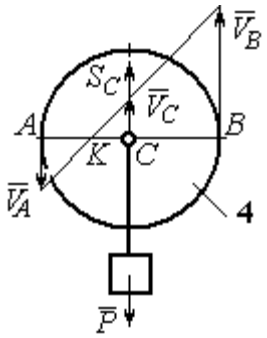


Рис. 6.12. Распределение скоростей точек блока 4

Угловая скорость блока 4 $\omega_4=\frac{V_B}{r_4+CK}=\frac{\omega_1(R_1+r_1)}{2r_4}$. Скорость его центра: $V_C=\omega_4\cdot CK=\frac{\omega_1(R_1-r_1)}{2}$. Выразим соотношение между скоростью точки *C* и угловой скоростью барабана 1 в дифференциальной форме: $dS_C=d\varphi_1\frac{(R_1-r_1)}{2}$. Поскольку действительное перемещение является одним из возможных (т. е. $ds=\delta s$, $d\varphi=\delta\varphi$), получим связь между возможными перемещениями барабана 1 и груза: $\delta S_C=\frac{\delta\varphi_1(R_1-r_1)}{2}$.

Подставляя найденное соотношение в уравнение принципа возможных перемещений, представим его в окончательном виде: $M\delta\varphi_1-P\frac{\delta\varphi_1(R_1-r_1)}{2}=0$, откуда найдём значение уравновешивающего момента: $M=\frac{P(R_1-r_1)}{2}$.

Задача 66. Брус 1 весом $P_1 = P$ лежит на цилиндрическом катке 2 и на блоке 3 одинаковых радиусов r, и одинакового веса $P_2 = P_3 = 2P$ (рис. 6.13). Каток 2 катится без проскальзывания по наклонной плоскости с углом наклона 30º к горизонту. Блок 3 вращается вокруг неподвижной оси z и к нему приложена пара сил с моментом $M = Pr$. Каток и блок расположены так, что брус 1 параллелен наклонной плоскости.

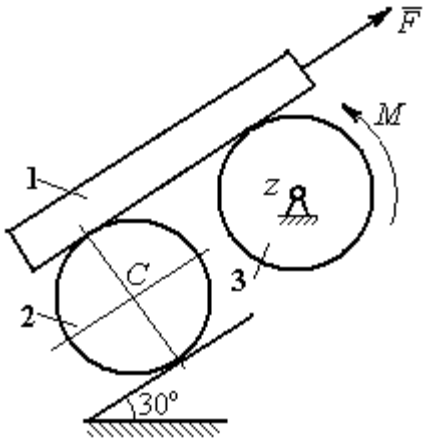


Рис. 6.13. Равновесие механической системы

Какую силу F, параллельную наклонной плоскости, нужно приложить к брусу 1, чтобы удержать его в равновесии. Скольжение между брусом и катком, брусом и блоком отсутствует.

Решение

Рассмотрим механизм, состоящий из бруса 1, катка 2 и блока 3. Активными силами, действующими на механизм, являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$ бруса, катка и блока, пара сил с моментом M, приложенная к блоку 3, и сила $\vec{F}$, приложенная к брусу. Связи в механизме идеальные, так как работа реакции $\vec{N}_2$ опоры катка 2 на плоскость, работа силы $\vec{F}_{сц}$ сцепления катка с плоскостью и работа реакции шарнира блока 3 при любом перемещении системы равны нулю. Направления векторов сил в системе показаны на рис. 6.14.

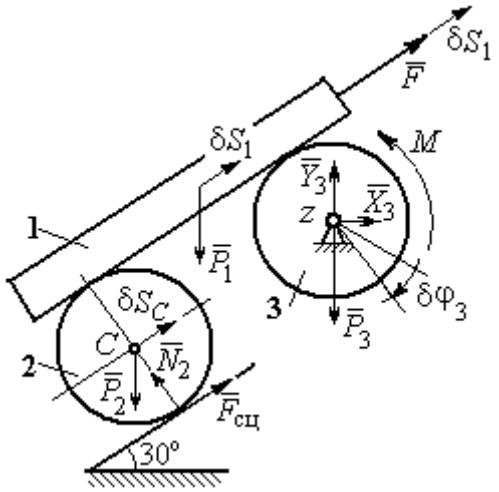


Рис. 6.14. Расчётная схема применения принципа возможных перемещений

Придадим системе возможное перемещение, сдвинув брус 1 на расстояние δS_1 вдоль линии действия силы $\vec{F}$, вверх по наклонной плоскости. Тогда

центр катка 2 переместится на расстояние δS_C, а блок 3 повернётся на элементарный угол $\delta\varphi_3$ (см. рис. 6.14).

Для определения условий равновесия применим к системе принцип возможных перемещений. Получим уравнение:

$$-P_1\delta S_1\cos 60^\circ - P_2\delta S_C\cos 60^\circ - M\delta\varphi_3 + F\delta S_1 = 0.$$

Выразим все перемещения через перемещение бруса δS_1. Допустим, скорость бруса равна V_1. Тогда $V_C = \dfrac{V_1}{2}$, и, следовательно, $\delta S_C = \dfrac{\delta S_1}{2}$.

Угловая скорость блока 3 $\omega_3 = \dfrac{V_1}{r}$, отсюда $\delta\varphi_3 = \dfrac{\delta S_1}{r}$.

Подставляя найденные соотношения в уравнение принципа возможных перемещений с учётом данных задачи, находим $F = 2P$.

Задача 67. Уравновешивание роликового катка 3 с противовесом 1 осуществляется с помощью пары сил с моментом *M*, приложенных к блоку 2. Каток состоит из двух соосных жестко связанных дисков (рис. 6.15) радиусов *r* и *R* = 2*r* с общей массой 3*m*. Масса груза 1 равна *m*. При движении каток катится без скольжения по вертикальной поверхности, касаясь её диском меньшего радиуса. Вертикальная пружина с закреплённым верхним концом своим нижним концом удерживает каток за центр масс. Жесткость пружины $c = mg / r$.

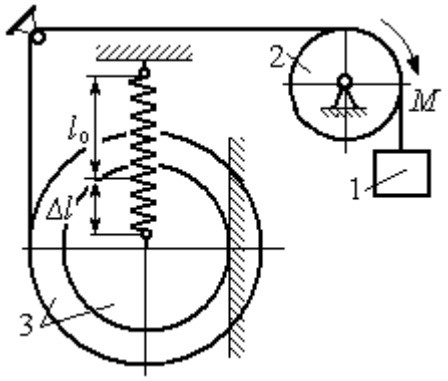


Рис. 6.15. Уравновешивание роликового катка

Какой величины уравновешивающий момент *M* приложен к блоку 2, если при равновесии катка пружина растянулась относительно недеформированного состояния на величину $\Delta l = r$.

Решение

Рассмотрим механическую систему, состоящую из груза 1, блока 2 и катка 3. Активными силами, действующими на механизм, являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$ – груза, блока и катка, пара сил с моментом M, приложенная к блоку 2, и сила $\vec{F}_{\text{упр}}$ упругости пружины, приложенная к центру катка. Реакциями связей в механизме являются: сила $\vec{F}_{\text{сц}}$ сцепления катка с плоскостью и реакция $\vec{R}_2$ шарнира блока 2. Реакция $\vec{N}_2$ опоры катка 2 на вертикальную плоскость равна нулю (на рис. 6.16 не показана).

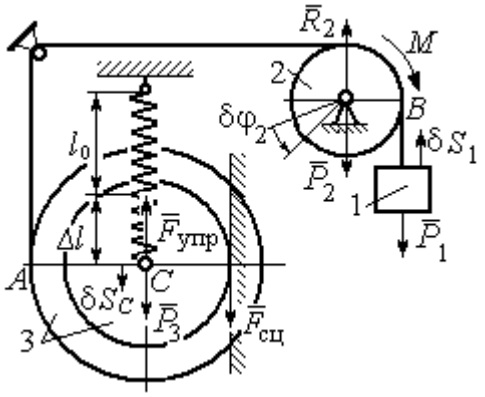


Рис. 6.16. Расчётная схема уравновешивания ролика

Допустим, система находится в равновесии. Дадим центру катка возможное перемещение δS_C, направленное вертикально вниз. При этом блок 2 повернётся на угол $\delta\varphi_2$, а груз 1 получит бесконечно малое перемещение δS_1. Направления возможных перемещений показаны на рис. 6.16.

Составим уравнение принципа возможных перемещений:

$$P_3\delta S_C - F_{\text{упр}}\delta S_C + M\delta\varphi_2 - P_1\delta S_1 = 0,$$

где сила упругости в положении равновесия системы $F_{\text{упр}} = c\Delta l$.

Выразим перемещения $\delta\varphi_2$, δS_1 блока 2 и груза 1 через перемещение центра катка δS_C. Предположим, при возможном перемещении скорость центра масс катка равна V_C. Скорость груза 1 равна скорости точки A на ободе большого диска катка: $V_1 = V_A = \dfrac{R+r}{r}V_C$. Здесь учтено, что точка касания катка

с вертикальной поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Угловая скорость блока 2 $\omega_2 = \dfrac{V_A}{r} = \dfrac{R+r}{r^2} V_C$.

Представляя кинематические соотношения в дифференциальном виде, получим необходимые связи между возможными перемещениями:

$$\delta S_1 = \frac{R+r}{r}\delta S_C = 3\delta S_C; \quad \delta\varphi_2 = \frac{R+r}{r^2}\delta S_C = \frac{3\delta S_C}{r}.$$

Окончательно уравнение принципа возможных перемещений выражается в виде: $P_3\delta S_C - c\Delta l\delta S_C + M\dfrac{3\delta S_C}{r} - P_1 3\delta S_C = 0$. Величина уравновешивающего момента $M = \dfrac{1}{3}mgr$.

Упражнения

Упражнение 6.2. Штамповка деталей осуществляется при помощи рычажного пресса (рис. 6.17). Найти соотношение между силой F, приложенной к внешнему рычагу, и силой Q, сжимающей деталь A вдоль центральной оси.

Длины рычагов a, b, c, d показаны на рис. 6.17.

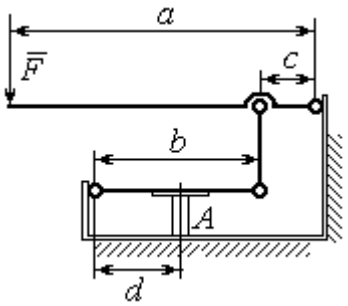


Рис. 6.17. Рычажный пресс

Упражнение 6.3. Конструкция состоит из двух валов, находящихся во внешнем зацеплении, и двух грузов, удерживающихся нитями, намотанными валы (рис. 6.18).

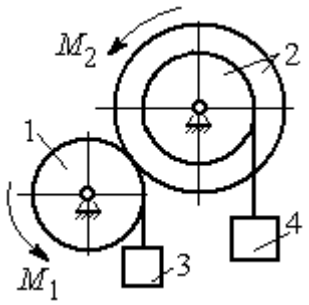


Рис. 6.18. Схема уравновешивания валов

Радиус вала 1 $R_1 = r$. Вал 2 состоит из двух барабанов, жестко скреплённых на одной оси. Радиусы барабанов: $R_2 = 3r$, $r_2 = r$.

Найти величину уравновешивающего момента M_2, приложенного к валу 2, если к валу 1 приложена пара сил с моментом $M_1 = 2Pr$, а грузы 3 и 4 одинакового веса P.

6.3. Общее уравнение динамики

При движении механической системы с идеальными связями в каждый момент времени сумма элементарных работ активных сил и сил инерции на любом возможном перемещении равна нулю:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0,$$

где $\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}})$, $\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}})$ – элементарные работы активных сил и сил инерции, приложенных к точкам системы на её возможном перемещении.

При вычислении элементарных работ активных сил и сил инерции используют обычные формулы для вычисления работы сил на элементарном перемещении точек их приложения.

Примеры решения задач на применение общего уравнения динамики

Задача 68. Механическая система включает груз 1, ступенчатый диск 2 (каток), катящийся ступенькой по неподвижному рельсу, и однородный диск 3 (блок), вращающийся вокруг неподвижной оси, соединённых нерастяжимыми нитями (рис. 6.19). Качение ступенчатого диска происходит без скольжения. К грузу 1 приложена сила $\vec{F}$ под углом 30° к горизонтальному направлению движения груза. К блоку 3 приложена пара сил с моментом M. Найти закон движения центра масс катка 2 и реакцию шарнира блока 3 в момент времени t = 1 с, если P_1 = 10 Н; P_2 = 20 Н; P_3 = 15 Н; $F = 5(t+1)$ Н; $M = 3(1+2t)$ Н·м; R_2 = 0,8 м; r_2 = 0,2 м; R_3 = 0,4 м; момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, i_{2C} = 0,6 м.

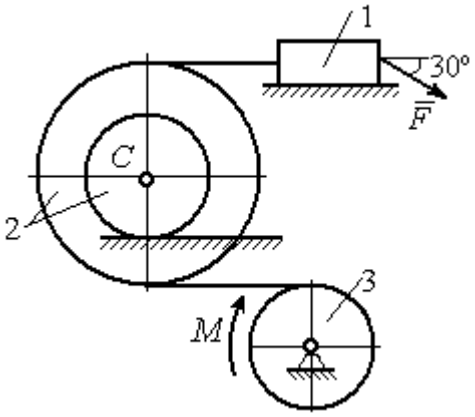


Рис. 6.19. Схема движения механической системы

Решение

В рассматриваемой механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, сила $\vec{F}$ и пара сил с моментом M (рис. 6.20).

Реакциями связей являются нормальные реакции опор: $\vec{N}_1$, $\vec{N}_2$, сила сцепления катка 2 с неподвижной поверхностью $\vec{F}_{сц}$ и реакция шарнира O блока 3 (на рис. 6.20 реакция показана в виде разложения на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$). Связи идеальные, так как скольжение груза 1 происходит по гладкой поверхности, качение диска 2 без проскальзывания, а ось вращения блока 3 неподвижна.

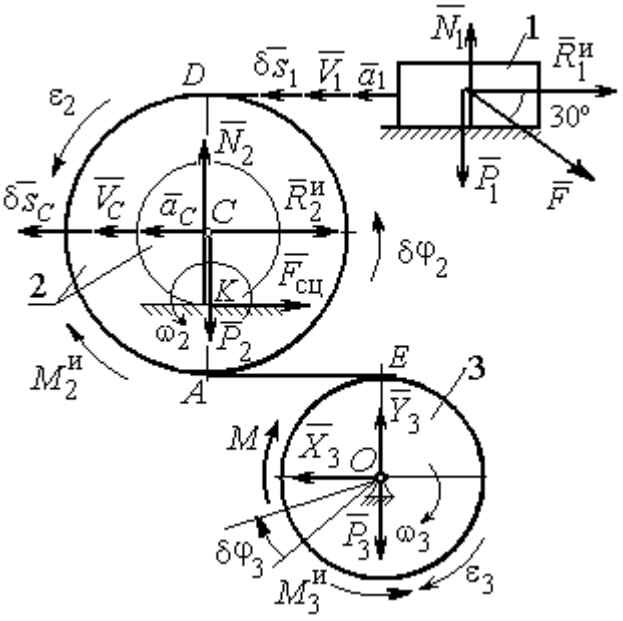


Рис. 6.20. Расчётная схема исследования движения механической системы

Предположим, система движется так, что блок 3 вращается с угловой скоростью ω_3 и угловым ускорением ε_3 в направлении поворота, создаваемого моментом M. Соответствующие направления скорости $\vec{V}_C$ и ускорения $\vec{a}_C$ центра масс катка 2, его угловой скорости ω_2 и ускорения ε_2, а также направление скорости $\vec{V}_1$ и ускорения $\vec{a}_1$ груза 1 показаны на рис. 6.20.

Присоединим к телам системы силы инерции. Главные векторы $\vec{R}_1^{и}$, $\vec{R}_2^{и}$ сил инерции груза 1 и катка 2 приложены в центрах масс груза и катка и направлены в сторону, противоположную ускорениям $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_C$. Главные моменты $\vec{M}_2^{и}$, $\vec{M}_3^{и}$ сил инерции катка 2 и блока 3 направлены в сторону, противоположную угловым ускорениям ε_2 и ε_3.

Главные векторы и главные моменты сил инерции показаны на рис. 6.20.

Для механической системы с идеальными связями общее уравнение динамики имеет вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0 .$$

Угловая скорость катка 2 $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK} = \dfrac{V_C}{r_2}$. Здесь учтено, что в точке K находится мгновенный центр скоростей катка (см. рис. 6.20). Скорость точки E блока 3 равна скорости точки A катка 2 (см. рис. 6.20):

$$V_E = V_A = \omega_2 \cdot AK = \omega_2 (R_2 - r_2) = V_C \frac{R_2 - r_2}{r_2} .$$

Угловая скорость блока 3 $\omega_3 = \dfrac{V_E}{R_3} = V_C \dfrac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}$.

Скорость груза 1 равна скорости точки D катка 2:

$$V_1 = V_D = \omega_2 \cdot DK = \omega_2 (R_2 + r_2) = V_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2} .$$

Соотношения между ускорениями определяются путем дифференцирования установленных кинематических равенств:

$$a_1 = a_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{a_C}{r_2}, \quad \varepsilon_3 = a_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} .$$

Если выразить скоростные кинематические соотношения в дифференциальном виде, то, полагая действительное перемещение возможным (т. е. $ds = \delta s$, $d\varphi = \delta\varphi$), получим соотношения между перемещениями:

$$\delta s_1 = \delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \ \delta\varphi_2 = \frac{\delta s_C}{r_2}, \ \delta\varphi_3 = \delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} .$$

Найдем элементарные работы активных сил.

Работы сил тяжести груза 1 и катка 2 равны нулю, так как перемещения точек приложения сил перпендикулярны векторам сил.

Работа силы тяжести блока 3 также равна нулю, поскольку точка прило-

жения силы тяжести блока 3 не перемещается:

$$\delta A(\vec{P}_1) = P_1 \delta s_1 \cos 90^\circ = 0;\ \ \delta A(\vec{P}_2) = P_2 \delta s_C \cos 90^\circ = 0;\ \delta A(\vec{P}_3) = 0.$$

Работу совершают только пара сил с моментом M и сила $\vec{F}$:

$$\delta A(\vec{M}) = M\delta\varphi_3 = M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2};$$

$$\delta A(\vec{F}) = F\delta s_1 \cos 150^\circ = -F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}\cos 30^\circ.$$

В результате сумма элементарных работ активных сил:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = \delta A(\vec{M}) + \delta A(\vec{F}) =$$

$$= M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} - F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}\cos 30^\circ = (0{,}85 + 23{,}35t)\delta s_C.$$

Определим модули главных векторов и главных моментов сил инерции:

$$R_1^{\text{и}} = m_1 a_1 = \frac{P_1}{g}\frac{(R_2 + r_2)}{r_2} a_C,\ \ R_2^{\text{и}} = m_2 a_C = \frac{P_2 a_C}{g};$$

$$M_2^{\text{и}} = J_{2C}\varepsilon_2 = \frac{P_2}{g} i_{2C}^2 \frac{a_C}{r_2};$$

$$M_3^{\text{и}} = J_{3O}\varepsilon_3 = \frac{P_3 R_3}{2g}\frac{(R_2 - r_2)}{r_2} a_C,$$

где J_{2C} – момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$; i_{2C} – радиус инерции катка; J_{3O} – осевой момент инерции блока 3, $J_{3O} = \frac{m_3 R_3^2}{2}$.

Найдем элементарные работы сил инерции:

$$\delta A(\vec{R}_1^{\text{и}}) = -R_1^{\text{и}}\delta s_1 = -\frac{P_1 (R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2}\delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{R}_2^{\text{и}}) = -R_2^{\text{и}}\delta s_C = -\frac{P_2 a_C}{g}\delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{M}_2^{\text{и}}) = -M_2^{\text{и}}\delta\varphi_2 = -\frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2}\delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{M}_3^{\text{и}}) = -M_3^{\text{и}}\delta\varphi_3 = -\frac{P_3(R_2 - r_2)^2 a_C}{2 g r_2^2}\delta s_C.$$

Сумма элементарных работ сил инерции:

$$\sum\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = -\frac{P_1(R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2}\delta s_C - \frac{P_2 a_C}{g}\delta s_C - \frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2}\delta s_C -$$

$$-\frac{P_3(R_2 - r_2)^2 a_C}{2 g r_2^2}\delta s_C = -52{,}75\, a_C \delta s_C, \text{ где } g = 9{,}81 \text{ м/с}^2.$$

С учетом проделанных вычислений общее уравнение динамики принимает вид: $\sum\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = (0{,}85 + 23{,}35t)\delta s_C - 52{,}75\, a_C \delta s_C = 0$, откуда найдём ускорение центра масс катка 2 как функцию времени:

$$a_C(t) = 0{,}02 + 0{,}45t.$$

Представляя ускорение a_C в виде второй производной координаты движения центра масс $a_C = \ddot{s}_C$, получим дифференциальное уравнение $\ddot{s}_C = 0{,}02 + 0{,}45t$. Дважды проинтегрировав это уравнение с нулевыми начальными условиями, найдём закон движения центра масс:

$$s_C = 0{,}01t^2 + 0{,}075t^3.$$

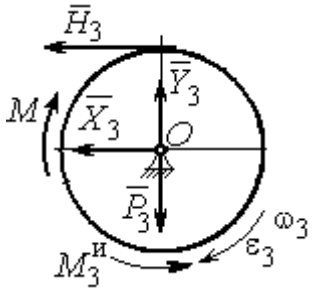


Рис. 6.21. Вращение блока 3

Рассмотрим вращательное движение блока 3, освободив его от связей. На блок действуют сила тяжести $\vec{P}_3$, реакция подшипника, разложенная на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, пара сил с моментом M и реакция нити $\vec{H}_3$ (рис. 6.21). Присоединим к блоку 3 силы инерции. При вращательном движении блока вокруг оси, проходящей через центр масс, главный вектор сил инерции равен ну-

лю. Главный момент сил инерции $M_3^{\text{и}}$ направлен в сторону, противоположную угловому ускорению блока 3.

По принципу Даламбера система сил, приложенных к блоку 3, включая силы инерции, находится в равновесии. Составим уравнение равновесия в виде равенства нулю суммарного момента всех сил относительно оси вращения: $M - H_3 R_3 - M_3^{\text{и}} = 0$, откуда найдём реакцию нити: $H_3 = \dfrac{M}{R_3} - \dfrac{M_3^{\text{и}}}{R_3}$. Подставляя в уравнение величину модуля главного момента сил инерции блока 3 $M_3^{\text{и}}(1) = 0{,}7$ Н·м и значение момента, приложенного к блоку 3, в момент времени $t = 1$ с, $M(1) = 9$ Н·м найдём реакцию нити $H_3(1) = 20{,}75$ Н.

Уравнения равновесия, составленные в виде проекций сил на вертикальную и горизонтальную оси (см. рис. 6.21), имеют вид:

$$X_3 + H_3 = 0,\ Y_3 - P_3 = 0.$$

Составляющие реакции шарнира блока 3 в момент времени $t = 1$ с: $X_3 = -20{,}75$ Н, $Y_3 = 15$ Н. Полная реакция шарнира $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} = 25{,}6$ Н.

Задача 69. Груз 2 весом P_2, поднимаемый лебёдкой (рис. 6 22), подвешен в центре подвижного блока 3 весом P_3. Нерастяжимая нить одним концом прицеплена к грузу 1 весом P_1, лежащему на наклонной плоскости. Другой конец, переброшенный через невесомый блок B, охватывает снизу подвижный блок 3 радиуса r и закреплён в вертикальном положении. К грузу 1 приложена сила $\vec{F}$, направленная вдоль наклонной плоскости.

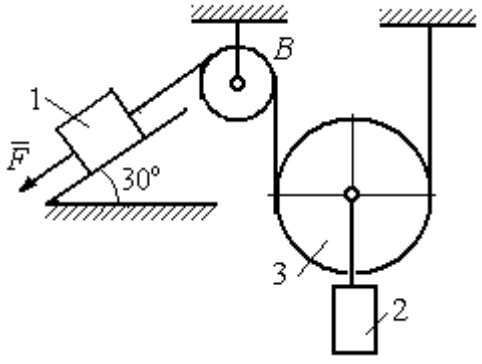


Рис. 6.22. Схема подъёмного устройства

Найти закон движения поднимаемого груза, если $P_1 = P_3 = P$, $P_2 = 3P$, $F = 2P$ и движение началось из состояния покоя.

Решение

Применим к решению задачи общее уравнение динамики. В данной механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и сила $\vec{F}$ (рис. 6.23). Реакциями связей являются реакция шарнира блока *B* и реакция опоры груза 1 (на рис. 6.23 не показаны). Связи идеальные, так как работа реакций связей равна нулю.

Предположим, груз 1 спускается вниз по наклонной плоскости с ускорением a_1. Приложим к телам системы силы инерции. Главные вектора сил инерции $\vec{R}_1^{\text{ин}}$ и $\vec{R}_2^{\text{ин}}$ грузов 1 и 2, движущихся поступательно, приложены в центрах масс грузов и направлены противоположно векторам ускорений тел. Главный вектор $\vec{R}_3^{\text{ин}}$ сил инерции блока 3 приложен в центре масс блока 3 и направлен противоположно вектору ускорения его центра масс. Главный момент сил инерции $M_3^{\text{ин}}$ относительно оси, проходящей через центр масс блока 3 перпендикулярно плоскости движения, направлен в сторону, противоположную направлению углового ускорения блока 3, совпадающего с направлением углового движения. Направления главных векторов и главного момента сил инерции тел показаны на рис. 6.23.

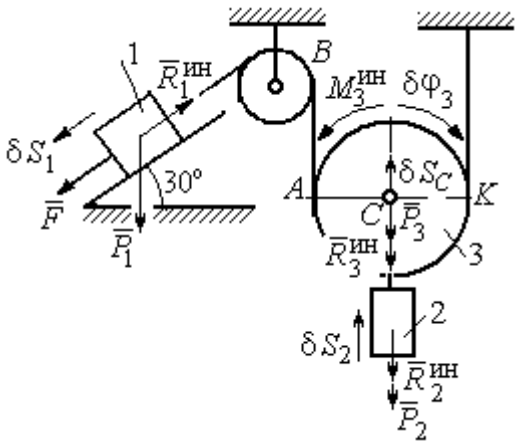


Рис.6.23. Активные силы и силы инерции, приложенные к системе

Дадим системе возможное перемещение, при котором груз 1 спустился вниз по наклонной плоскости на расстояние δS_1. В соответствии с приложенными в системе связями центр масс подвижного блока 2 и груз 2 переместились вверх на высоту δS_C, а сам блок повернулся на угол $\delta\varphi_3$ (см. рис. 6.23).

Составим общее уравнение динамики $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0$. Получим

$$F\delta S_1 + P_1 \delta S_1 \cos 60° - P_2 \delta S_2 - P_3 \delta S_C -$$

$$- R_1^{\text{ин}} \delta S_1 - R_2^{\text{ин}} \delta S_C - R_3^{\text{ин}} \delta S_C - M_3^{\text{ин}} \delta \varphi_3 = 0,$$

где модули сил инерции $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$, $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$, $R_3^{\text{ин}} = m_3 a_C$, $M_3^{\text{ин}} = \dfrac{m_3 r^2}{2} \varepsilon_3$.

Выразим перемещение δS_2 и ускорение a_2 груза 2, а также поворот $\delta \varphi_3$ и угловое ускорение ε_3 подвижного блока 3 через перемещение δS_1 и ускорение a_1 груза 1.

Угловая скорость блока 3 $\omega_3 = \dfrac{V_A}{AK} = \dfrac{V_1}{2r}$. Здесь учтено, что точка K блока 3 является его мгновенным центром скоростей. Тогда, элементарный поворот блока $\delta \varphi_3 = \dfrac{\delta S_1}{2r}$, а его угловое ускорение $\varepsilon_3 = \dfrac{a_1}{2r}$.

Скорость центра масс блока 3 и скорость груза 2: $V_2 = V_C = \dfrac{V_1}{2}$. Из этого равенства следует, что: $\delta S_2 = \delta S_C = \dfrac{\delta S_1}{2}$, $a_2 = a_C = \dfrac{a_1}{2}$.

Подставляя найденные соотношения в общее уравнение динамики с учётом данных задачи, окончательно получим уравнение: $\dfrac{1}{2} P \delta S_1 = \dfrac{17}{8g} P a_1 \delta S_1$. Отсюда $a_1 = \dfrac{4}{17} g = 0{,}23g$. Ускорение груза 2, $a_2 = \dfrac{a_1}{2} = 0{,}12g$.

Представим ускорение груза 2 в виде второй производной координаты его движения. Получим дифференциальное уравнение: $\ddot{S}_2 = 0{,}12g$. Дважды проинтегрировав его с нулевыми начальными условиями, найдём закон движения груза: $S_2 = 0{,}06gt^2$.

Задача 70. Грузы 1 и 2 весом $P_1 = 20$ Н и $P_2 = 30$ Н привязаны к нерастяжимой нити. Нить переброшена через неподвижные блоки B и D и охватывает снизу подвижный блок 3 весом $P_3 = 40$ Н (рис. 6.24). Определить ускорения грузов 1 и 2 и центра масс блока 3. Весом неподвижных блоков B и D пренебречь.

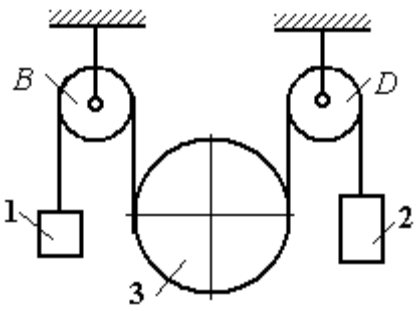


Рис. 6.24. Механическая система с двумя степенями свободы

Решение

В данной механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ (рис. 6.25), а реакциями связей – реакции шарниров блоков B и D. Связи идеальные, так как оси вращения блоков B и D неподвижны.

Применим к решению задачи общее уравнение динамики. Система имеет две степени свободы. В этом случае общее уравнение динамики необходимо составлять для каждого из независимых перемещений.

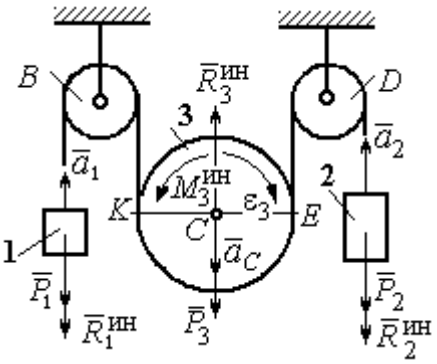


Рис.6.25. Активные силы и силы инерции, приложенные к системе

Предположим, система движется так, что оба груза 1 и 2 равноускоренно перемещаются вверх. Скорости грузов $\vec{V}_1$, $\vec{V}_2$, ускорения – $\vec{a}_1$ и $\vec{a}_2$. Блок 3 опускается вниз с ускорением центра $\vec{a}_C$, вращается и имеет угловое ускорение ε_3, направленное по ходу часовой стрелки (см. рис. 6.25).

Приложим к телам системы силы инерции (см. рис. 6.25). Модули сил инерции: $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$, $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$, $R_3^{\text{ин}} = m_3 a_C$. Главный момент сил инерции блока 3 $M_3^{\text{ин}} = J_{3C}\varepsilon_3$, где осевой момент инерции $J_{3C} = \dfrac{m_3 r^2}{2}$. Направления векторов сил и моментов сил инерции показаны на рис. 6.25.

Для вычисления углового ускорения блока 3 воспользуемся векторным представлением ускорения точки при плоскопараллельном движении тела. Выберем точку K за полюс. Ускорение точки E определяется равенством $\vec{a}_E = \vec{a}_K + \vec{a}^{\,n}_{EK} + \vec{a}^{\,\tau}_{EK}$, где $\vec{a}_K$ – ускорение полюса K; $\vec{a}^{\,n}_{EK}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{EK}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки E при вращении блока 3 вокруг полюса K (рис. 6.26). Спроектируем векторное равенство на вертикальную ось $E\tau$. Получим: $a_{E\tau} = a_{K\tau} + a^{\tau}_{EK}$, где $a_{E\tau}$ и $a_{K\tau}$ – проекции ускорений точек E и K на вертикальную ось.

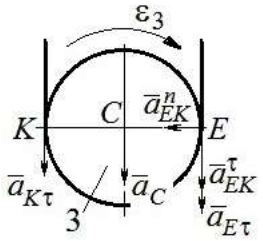


Рис. 6.26. Схема вычисления углового ускорения блока 3

Поскольку модуль ускорения точки K нити равен модулю ускорения груза 1, то $a_{K\tau} = a_1$. Модуль ускорения точки E нити равен модулю ускорения груза 2 и $a_{E\tau} = a_2$. Так как $a^{\tau}_{EK} = \varepsilon_3 AK = \varepsilon_3 2r$, то $\varepsilon_3 = \dfrac{a_{E\tau} - a_{K\tau}}{2r} = \dfrac{a_2 - a_1}{2r}$.

Составляя такое же векторное уравнение для определения ускорения центра масс блока 3 (точки C) и проектируя его на вертикальную ось, найдём:

$$a_C = a_{K\tau} + a^{\tau}_{CK} = a_1 + \varepsilon_3 r = \frac{a_2 + a_1}{2}.$$

Выберем в качестве независимых координат s_1, s_2 – положения грузов 1 и 2, отсчитываемые от неподвижных осей вращения блоков B и D. Возможные перемещения грузов обозначим δs_1 и δs_2.

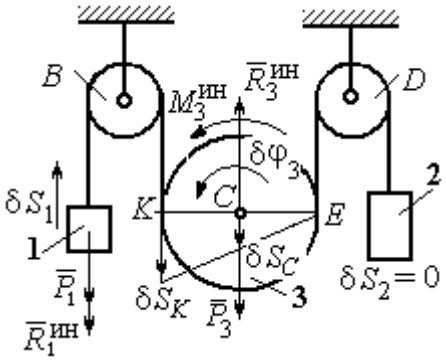


Рис.6.27. Движение системы при перемещении груза 1.

Дадим системе возможное перемещение, при котором груз 1 поднимается вверх на расстояние δs_1, а груз 2 – неподвижен. При таком движении нить, соединяющая груз 2 с блоком 3, неподвижна вплоть до точки E (рис. 6.27).

Вращение блока 3 происходит против направления хода часовой стрелки. Точка E является мгновенным центром скоростей блока 3, и угловая скорость блока $\omega_3 = \dfrac{V_K}{2r} = \dfrac{V_1}{2r}$. Скорость центра масс блока $V_C = \dfrac{1}{2}V_1$. Тогда элементарный поворот блока 3 $\delta\varphi_3 = \dfrac{\delta s_1}{2r}$ и элементарное перемещения центра масс $\delta s_C = \dfrac{1}{2}\delta s_1$.

На данном возможном перемещении работу совершают как активные силы – силы тяжести $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_3$ груза 1 и блока 3, так и силы инерции – $\vec{R}_1^{\text{ин}}$, $\vec{R}_3^{\text{ин}}$ и пара сил инерции с моментом $M_3^{\text{ин}}$.

Составим общее уравнение динамики:

$$\sum \delta A\left(\vec{F}_k^{\text{акт}}\right) + \sum \delta A\left(\vec{R}_k^{\text{ин}}\right) = -P_1\delta s_1 + P_3\delta s_C - R_1^{\text{ин}}\delta s_1 - R_3^{\text{ин}}\delta s_C + M_3^{\text{ин}}\delta\varphi_3 = 0.$$

Здесь работа сил инерции

$$R_1^{\text{ин}}\delta s_1 = m_1 a_1 \delta s_1, \quad R_3^{\text{ин}}\delta s_C = m_3 a_C \delta s_C = \frac{P_3}{g}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)\cdot\frac{1}{2}\delta s_1;$$

$$M_3^{\text{ин}}\delta\varphi_3 = J_{3C}\varepsilon_3\delta\varphi_3 = \frac{P_3 r^2}{2g}\cdot\frac{a_2 - a_1}{2r}\cdot\frac{\delta s_1}{2r}.$$

В результате общее уравнение динамики представляется выражением

$$-P_1\delta s_1 + \frac{1}{2}P_3\delta s_1 - \frac{P_1}{g}a_1\delta s_1 - \frac{P_3}{g}\left(\frac{a_1 + a_2}{2}\right)\cdot\frac{1}{2}\delta s_1 + \frac{P_3 r^2}{2g}\cdot\frac{a_2 - a_1}{2r}\cdot\frac{\delta s_1}{2r} = 0,$$

которое преобразуется к виду:

$$(3P_3 + 8P_1)a_1 + P_3 a_2 = (4P_3 - 8P_1)g.$$

Дадим системе другое независимое возможное перемещение, при котором груз 2 движется вверх ($\delta s_2 \neq 0$), а груз 1 неподвижен ($\delta s_1 = 0$).

При этом перемещении нить, соединяющая груз 1 и блок 3 неподвижна вплоть до точки K (рис. 6.28). Вращение блока 3 происходит по направлению хода часовой стрелки. Точка K является мгновенным центром скоростей бло-

ка 3. Тогда $\omega_3 = \frac{V_E}{2r} = \frac{V_2}{2r}$ и скорость центра масс блока $V_C = \frac{1}{2}V_2$. Элементарный поворот блока 3 $\delta\varphi_3 = \frac{\delta s_2}{2r}$ и перемещение центра масс $\delta s_C = \delta s_E = \frac{1}{2}\delta s_2$.

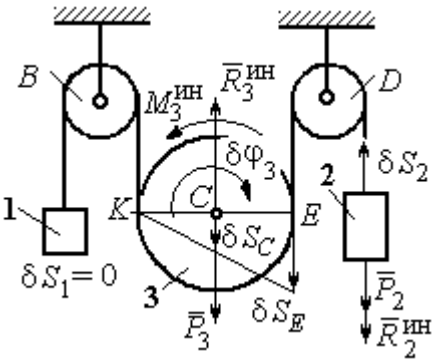


Рис. 6.28. Движение системы при перемещении груза 2

При таком движении работу совершают силы тяжести $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$, силы инерции $\vec{R}_2^{ин}$, $\vec{R}_3^{ин}$ и пара сил с моментом $M_3^{ин}$.

Составим общее уравнение динамики на возможном перемещении δs_2 (см. рис. 6.28):

$$-P_2\delta s_2 - R_2^{ин}\delta s_2 + P_3\delta s_C - R_3^{ин}\delta s_C - M_3^{ин}\delta\varphi_3 = 0,$$

которое преобразуется к виду

$$-P_2\delta s_2 - \frac{P_2}{g}a_2\delta s_2 + \frac{1}{2}P_3\delta s_2 - \frac{P_3}{g}\left(\frac{a_1+a_2}{2}\right)\frac{1}{2}\delta s_2 - \frac{P_3 r^2}{2g}\left(\frac{a_2-a_1}{2r}\right)\frac{\delta s_2}{2r} = 0$$

или к виду

$$(8P_2 + 3P_3)a_2 + P_3 a_1 = (4P_3 - 8P_2)g.$$

Подставляя данные задачи в оба уравнения динамики, соответствующие независимым перемещениям δs_1 и δs_2, получим систему уравнений:

$$7a_1 + a_2 = 0, \quad 2g + 9a_2 + a_1 = 0.$$

Решение системы: $a_1 = \frac{1}{31}g$, $a_2 = -\frac{7}{31}g$ представляет ускорения грузов 1 и 2. Ускорение центра масс блока 3 находится по формуле $a_C = \frac{a_1 + a_2}{2} = -\frac{3}{31}g$.

Знаки ускорений определяют направления движений тел: груз 1 движется в выбранном направлении – вверх, груз 2 – вниз, центр блока 3 – вверх.

Упражнения

Упражнение 6.4. В механической системе (рис. 6.29) блок 1 радиуса r и каток 2 соединены горизонтальным невесомым стержнем. Скольжение между стержнем и катками отсутствует. Каток 2 состоит из двух шкивов радиусов r и $R = 2r$, скреплённых на одной оси. Каток катится, опираясь малым шкивом на горизонтальную поверхность, без проскальзывания. Груз 3 представляет собой поршень, двигающийся по горизонтальной поверхности без трения и прикреплённый к центру масс катка 2. К блоку 1 приложена пара сил с переменным моментом $M_{\text{вр}} = mgr\sin\omega t$.

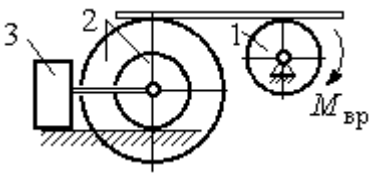


Рис. 6.29. Схема движения механической системы

Найти закон движения поршня 3, если массы грузов $m_1 = m_3 = m$, общая масса катка 2 $m_2 = 2m$, момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, $i_2 = 1{,}5r$. Движение началось из состояния покоя.

Упражнение 6.5. Груз 1, двигаясь горизонтально, приводит в движение ступенчатый барабан 2 посредством нерастяжимой нити, намотанной на его малую ступень (рис. 6.30). К барабану на нитях, намотанных на большую и малую ступеньки, подвешены два груза 3 и 4. На груз 1 действует сила $F = P(t+1)$. Определить закон движения груза 3, если веса грузов одинаковы и равны P, вес барабана 2 равен $2P$, радиусы ступенек барабана r и $2r$, радиус инерции барабана $i_2 = r\sqrt{2}$, и движение началось из состояния покоя.

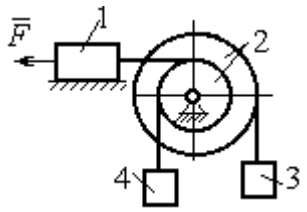


Рис. 6.30. Схема подъёмника

6.4. Уравнения Лагранжа II рода

Обобщенными координатами называется совокупность любых s независимых параметров $q_1, q_2, \ldots, q_S$, однозначно определяющих положение системы в любой момент времени.

Если системе сообщить возможное перемещение, при котором все обобщенные координаты изменятся на элементарные (бесконечно малые) величины $\delta q_1, \delta q_2, \ldots, \delta q_S$, называемые **вариациями обобщенных координат**, то все действующие активные силы совершат элементарную работу, которая может быть представлена в виде: $\delta A = Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \ldots + Q_s \cdot \delta q_s$.

Величина Q_k, $k = 1, 2, \ldots, s$, равная коэффициенту при вариации δq_k обобщенной координаты, называется **обобщенной силой**, соответствующей данной обобщенной координате. Расчет обобщенных сил осуществляется путем последовательного придания системе возможных перемещений, при которых варьируется только одна из обобщенных координат, а вариации остальных координат равны нулю.

Для материальной системы с идеальными связями дифференциальные уравнения движения в обобщенных координатах – **уравнения Лагранжа II рода** – имеют вид: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k$, $k = 1,2,...,s$, где s – число степеней свободы системы; T – кинетическая энергия системы; $q_1, q_2, \ldots, q_s$ – обобщенные координаты; $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \ldots, \dot{q}_s$ – обобщенные скорости.

Примеры решения задач на составление уравнений Лагранжа

Задача 71. В механизме домкрата (рис. 6.31) движение зубчатого колеса 1 передаётся шестерне 2, к которой соосно прикреплено зубчатое колесо 3, имеющее зацепление с зубчатой рейкой 4, на которой поднимается груз 5 массы m_5 = 50 кг.

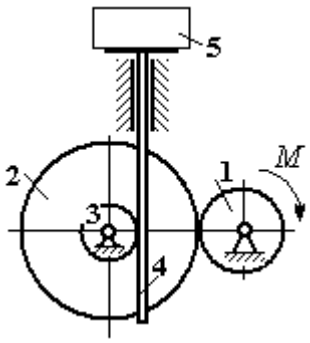


Рис. 6.31. Схема механизма домкрата

Радиусы зубчатых колёс r_1 = 5 см, r_2 = 12 см, r_3 = 6 см. Зубчатые колёса считать сплошными однородными дисками. Массы колёс m_1 = 0,8 кг, m_2 = 1,6 кг, m_3 = 0,6 кг, масса зубчатой рейки m_4 = 1 кг.

Какой величины постоянный вращающий момент нужно приложить к колесу 1 для того, чтобы в момент времени $t = 2$ с груз 5 имел скорость V_5 = 1 м/с, если движение системы начинается из состояния покоя.

Решение

Домкрат является механической системой с одной степенью свободы. Выберем в качестве обобщённой координаты координату *x*, отмечающую положение груза 5 (рис. 6.32).

Уравнение Лагранжа для обобщённой координаты *x* имеет вид: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right)-\frac{\partial T}{\partial x}=Q_x$, где T – кинетическая энергия системы; $\dot{x}$ – обобщённая скорость; Q_x – обобщённая сила.

Кинетическая энергия колеса 1: $T_1=\frac{J_1\omega_1^2}{2}$, где ω_1 – угловая скорость колеса 1; J_1 – момент инерции колеса, $J_1=\frac{m_1 r_1^2}{2}$.

Кинетические энергии шестерни 2 и зубчатого колеса 3, у которых угловые скорости одинаковы, соответственно: $T_2=\frac{J_2\omega_2^2}{2}$, $T_3=\frac{J_3\omega_2^2}{2}$, где ω_2 – угловая скорость шестерни 2; J_2, J_3 – моменты инерции шестерни 2 и зубчатого колеса 3 относительно оси, проходящей через общий центр масс, $J_2=\frac{m_2 r_2^2}{2}$, $J_3=\frac{m_3 r_3^2}{2}$. Скорость груза 5 равна скорости зубчатой линейки $V_5=V_4$. Кинетическая энергия зубчатой линейки 4 и груза 5: $T_4=\frac{m_4 V_4^2}{2}$, $T_5=\frac{m_5 V_4^2}{2}$.

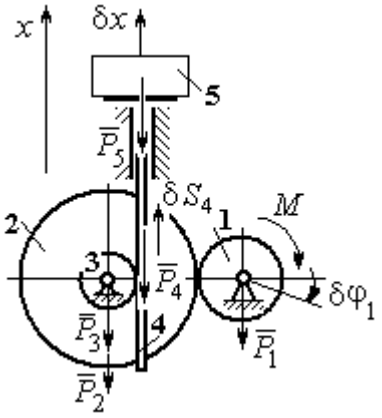


Рис. 6.32. Возможные перемещения звеньев механизма

Выразим угловые скорости колёс через скорость груза (зубчатой линейки).

Имеем: $\omega_2 = \omega_3 = \dfrac{V_4}{r_3}$ (см. рис. 6.32). Кроме того, из равенства $\omega_2 r_2 = \omega_1 r_1$ следует $\omega_1 = \dfrac{\omega_2 r_2}{r_1} = \dfrac{V_4 r_2}{r_1 r_3}$.

Подставляя полученные соотношения в выражения кинетических энергий тел и с учётом данных задачи, получим кинетическую энергию системы:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 =$$

$$= \frac{m_1 r_1^2}{4}\left(\frac{V_4 r_2}{r_1 r_3}\right)^2 + \frac{m_2 r_2^2}{4}\left(\frac{V_4}{r_3}\right)^2 + \frac{m_3 r_3^2}{4}\left(\frac{V_4}{r_3}\right)^2 + \frac{m_4 V_4^2}{2} + \frac{m_5 V_4^2}{2} =$$

$$= \left[\frac{m_1 + m_2}{2}\left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{m_3}{2} + m_4 + m_5\right]\frac{V_4^2}{2} = 28{,}05\, V_4^2 = 28{,}05\, \dot{x}^2 .$$

Вычислим обобщённую силу.

Дадим возможное перемещение δx грузу 5. При этом линейка 4 переместится на расстояние δs_4, а зубчатое колесо 1 повернётся на угол $\delta\varphi_1$. Найдём сумму работ всех сил, приложенных к системе, на этом возможном перемещении. Получим: $\delta A = -P_5 \delta x - P_4 \delta s_4 + M \delta\varphi_1$. Работа сил тяжести зубчатых колёс $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$ и $\vec{P}_3$ равна нулю, так как точки приложения этих сил неподвижны.

Из ранее полученных скоростных соотношений следуют равенства перемещений: $\delta s_4 = \delta x$, $\delta\varphi_1 = \dfrac{r_2}{r_1 r_3}\delta x$. В результате сумма работ сил на возможном перемещении системы выражается в виде $\delta A = \left(-m_5 g - m_4 g + M\dfrac{r_2}{r_1 r_3}\right)\delta x$. Отсюда обобщённая сила Q_x, соответствующая координате x: $Q_x = -(m_5 + m_4)g + M\dfrac{r_2}{r_1 r_3} = -500{,}31 + 40M$.

Составим уравнение Лагранжа.

С учётом, что $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = 56{,}1\,\ddot{x}$ и $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, дифференциальное уравнение движения имеет вид: $56{,}1\,\ddot{x} = -500{,}31+40M$ или $\ddot{x} = -8{,}92+0{,}71M$.

Интегрируя это уравнение с нулевыми начальными условиями, получим закон изменения скорости груза 5: $V_5 = \dot{x} = (-8{,}92+0{,}71M)t$.

По условию задачи при $t = 2$ с $V_5 = 1$ м/с. Подставляя эти данные в уравнение, получим: $M = 13{,}27$ Н·м.

Задача 72. Механическая система состоит из ступенчатого блока 2, катка 3, соединённых невесомым брусом 1, и невесомой пружины жесткостью c. Радиусы ступеней блока r и $R = 1{,}5r$, радиус катка 3 равен r. Брус, лежащий на катке 3 и блоке 2, во время движения остаётся параллельным линии качения катка 3 (рис. 6.33). В центре катка 3 приложена сила $\vec{F}$, направленная вверх параллельно наклонной плоскости, а к блоку 2 – пара сил с моментом M. Качение катка по неподвижной поверхности без скольжения. Проскальзывание между брусом 1 и дисками отсутствует. Передача движения пружины блоку 2 производится посредством невесомого жесткого вертикального стержня, прижатого к малой ступеньке блока без скольжения. Радиус инерции блока 2 относительно оси вращения $i_z = r\sqrt{2}$. Веса тел: $P_3 = P$, $P_2 = 2P$, приложенная сила $F = 2P$, момент $M = Pr$, жесткость пружины $c = P/r$.

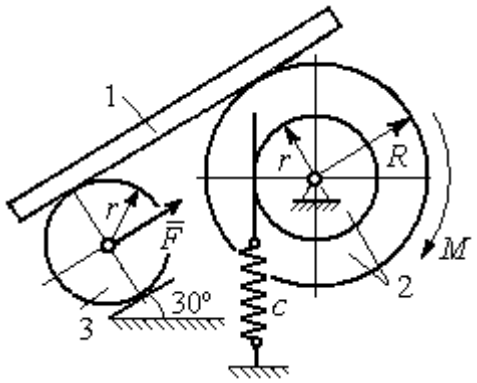


Рис. 6.33. Механическая система с одной степенью свободы

Определить закон угловых колебаний блока 2 при $P = 10$ Н, $r = 0{,}2$ м, если в начальный момент пружина находилась в нерастянутом состоянии, а блоку 2 придали угловую скорость $\omega_0 = 0{,}5$ рад/с в сторону вращения, создаваемого заданным моментом.

Решение

Рассматриваемая механическая система (рис. 6.34) имеет одну степень свободы. В качестве обобщённой координаты q выберем перемещение x верхнего края пружины, отсчитываемого от уровня недеформируемой пружины (см. рис. 6.34). Обобщённая скорость $\dot{q} = \dot{x}$.

Уравнение Лагранжа II рода, описывающее движение системы, имеет вид $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x$, где T – кинетическая энергия системы; Q_x – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате x.

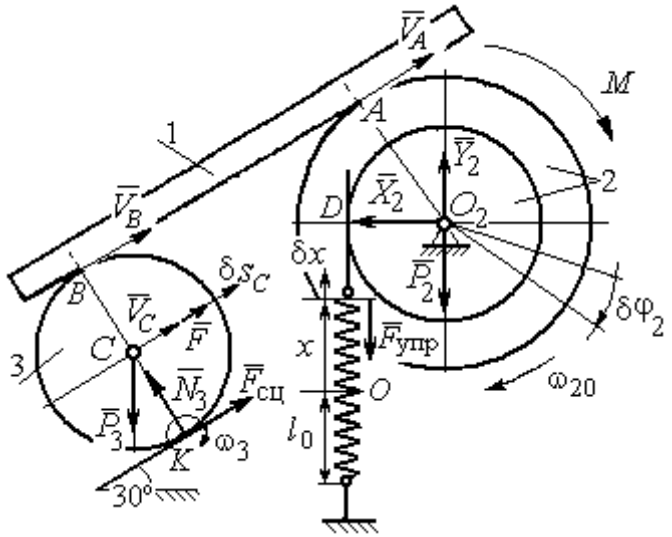


Рис. 6.34 Расчётная схема колебаний механической системы с одной степенью свободы

Вычислим кинетическую энергию системы. Энергия вращательного движения блока 2: $T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2$, где ω_2 – угловая скорость блока; J_{2z} – момент инерции блока 2 относительно оси z, $J_{2z} = m_2 i_z^2$. Каток 3 совершает плоскопараллельное движение. Его кинетическая энергия $T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2$, где V_C, ω_3 – скорость центра масс катка 3 и его угловая скорость; J_{zC} – момент инерции катка относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{zC} = \frac{1}{2} m_3 r^2$; r – радиус катка.

Выразим угловые скорости ω_2, ω_3, а также скорость V_C через обобщённую скорость $\dot{x}$.

Заметим, что скорость точки D блока 2 равна скорости движения верхнего края пружины: $V_D = \dot{x}$ (см. рис. 6.34). Угловая скорость блока 2: $\omega_2 = \dfrac{V_D}{r} = \dfrac{\dot{x}}{r}$. Скорость точки A блока 2: $V_A = \omega_2 R = \dfrac{\dot{x}R}{r}$.

Так как брус совершает поступательное движение, то скорости точек A и B равны: $V_B = V_A$. Угловая скорость катка 3 (точка K касания катка 3 с неподвижной поверхностью является его мгновенным центром скоростей): $\omega_3 = \dfrac{V_B}{2r} = \dfrac{V_A}{2r} = \dfrac{\dot{x}R}{2r^2}$. Скорость центра катка 3: $V_C = \dfrac{V_B}{2} = \dfrac{\dot{x}R}{2r}$.

Подставляя найденные кинематические соотношения с учётом исходных данных задачи, получим кинетическую энергию тел системы:

$$T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2P}{g} \left(r\sqrt{2}\right)^2 \left(\frac{\dot{x}}{r}\right)^2 = \frac{2P}{g} \dot{x}^2;$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2 = \frac{1}{2} \frac{P}{g} \left(\frac{\dot{x}R}{2r}\right)^2 + \frac{1}{2} \frac{Pr^2}{2g} \left(\frac{\dot{x}R}{2r^2}\right)^2 = \frac{3P}{4g} \left(\frac{R}{2r}\right)^2 \dot{x}^2.$$

Полная кинетическая энергия системы:

$$T = T_2 + T_3 = \frac{P}{g} \left(2 + \frac{3}{4} \left(\frac{R}{2r}\right)^2\right) \dot{x}^2.$$

Найдём обобщённую силу. Произвольное положение системы определяется обобщённой координатой x, показывающей растяжение пружины. Дадим пружине в произвольном положении возможное (бесконечно малое) перемещение δx в положительном направлении оси x (см. рис. 6.34). При этом блок 2 повернётся на угол $\delta\varphi_2 = \dfrac{\delta x}{r}$, центр масс катка 3 сдвинется на расстояние $\delta s_C = \dfrac{R}{2r} \delta x$. На заданном перемещении системы работу совершают сила тяжести катка 3, пара сил с моментом M, сила $\vec{F}$ и сила упругости пружины.

Элементарная работа вращающего момента M: $\delta A(M) = M\delta\varphi_2 = M\dfrac{\delta x}{r}$.

Работа силы тяжести катка 3: $\delta A(\vec{P}_3) = P_3\delta s_C\cos 120^\circ = -P_3\dfrac{R}{4r}\delta x$.

Работа силы F: $\delta A(\vec{F}) = F\delta s_C = F\dfrac{R}{2r}\delta x$.

Модуль силы упругости пружины, растянутой из недеформированного положения на расстояние x: $F_{\text{упр}} = cx$. Сила упругости направлена в сторону, противоположную растяжению (см. рис. 6.34). Её работа при перемещении δx вычисляется по формуле $\delta A(\vec{F}_{\text{упр}}) = F_{\text{упр}}\delta x\cos 180° = -cx\delta x$.

Сумма работ сил на рассматриваемом возможном перемещении системы с учётом данных задачи:

$$\delta A = M\frac{\delta x}{r} - P_3\frac{R}{4r}\delta x + F\frac{R}{2r}\delta x - cx\delta x = P\left(\frac{17}{8} - \frac{x}{r}\right)\delta x,$$

откуда обобщённая сила $Q_x = P\left(\dfrac{17}{8} - \dfrac{x}{r}\right)$.

Вычислим необходимые производные кинетической энергии: $\dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = \dfrac{2P}{g}\left(2 + \dfrac{3}{4}\left(\dfrac{R}{2r}\right)^2\right)\ddot{x}$, $\dfrac{\partial T}{\partial x} = 0$ и, подставляя их в общий вид уравнений Лагранжа, получим дифференциальное уравнение колебаний верхнего края пружины:

$$\frac{2P}{g}\left(2 + \frac{3}{4}\left(\frac{R}{2r}\right)^2\right)\ddot{x} = P\left(\frac{17}{8} - \frac{x}{r}\right), \text{ или } \ddot{x} + 10{,}2x = 4{,}34 \text{ (здесь } g = 9{,}81 \text{ м/с}^2\text{)}.$$

Решение дифференциального уравнения представляется в виде суммы: $x = x_{\text{одн}} + x_{\text{частн}}$. Общее решение однородного уравнения имеет вид $x_{\text{одн}} = C_1\sin kt + C_2\cos kt$, где C_1, C_2 – произвольные постоянные; k – круговая частота собственных колебаний пружины, $k = \sqrt{10{,}2}$ = 3,19 рад/с. Частное ре-

шение неоднородного уравнения ищется в виде константы $x_{\text{част}} = b$. Подставив его в уравнение колебаний, получим: $b = 0{,}42$. Таким образом, общее решение неоднородного уравнения имеет вид $x(t) = C_1 \sin 3{,}19t + C_2 \cos 3{,}19t + 0{,}42$.

Произвольные постоянные C_1, C_2 находятся из начальных условий. По условию задачи в начальный момент пружина была в нерастянутом состоянии. Тогда начальная координата пружины (её верхнего края) $x(0) = 0$. Подставляя значение начальной координаты в общее решение неоднородного уравнения при $t = 0$, получим $C_2 = -0{,}42$. Скорость верхнего края пружины в начальный момент времени $\dot{x}(0)$ равна начальной скорости $V_D(0)$ точки D блока 2. Поскольку в начальный момент времени блоку 2 сообщили угловую скорость $\omega_{20} = 0{,}5$ рад/с, то при $r = 0{,}2$ м $\dot{x}(0) = V_D(0) = \omega_{20} r = 0{,}1$ м/с.

Вычисляем скорость движения края пружины, взяв производную: $\dot{x}(t) = 3{,}19 C_1 \cos 3{,}19t - 3{,}19 C_2 \sin 3{,}19t$. Подставляя начальное значение скорости, получим $C_1 = 0{,}03$.

Окончательно уравнение движения верхнего края пружин: $x(t) = 0{,}03 \sin 3{,}19t - 0{,}42 \cos 3{,}19t + 0{,}42$ м. Уравнение колебательного движения блока 2: $\varphi_2 = \dfrac{x}{r} = 0{,}15 \sin 3{,}19t - 2{,}1 \cos 3{,}19t + 2{,}1$ рад.

Задача 73. Прямоугольная призма 3 весом $2P$ лежит на катке 1 радиуса r и веса P и опирается на невесомый блок 2 (рис. 6.35). Каток 1 катится по неподвижной горизонтальной поверхности без скольжения. По наклонной поверхности призмы скатывается без скольжения каток 4 весом P и радиуса r. Угол наклона поверхности призмы к горизонту составляет

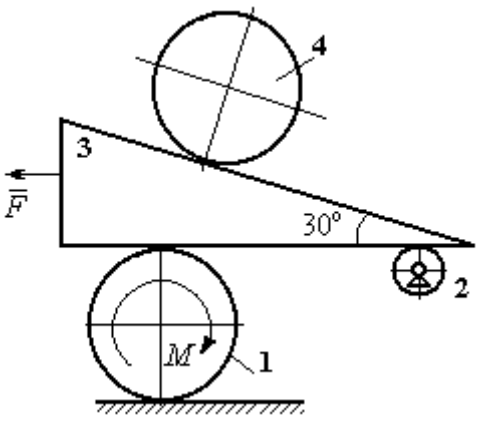


Рис. 6.35. Механическая система с двумя степенями свободы

30º. На каток 1 действует пара сил с постоянным моментом $M = 3Pr$, а на призму 3 – горизонтальная сила $\vec{F}$ с модулем $F = P$. Катки считать однородными дисками. Проскальзывание между катками 1, 4 и призмой отсутствует. В начальный момент система находилась в покое.

Определить закон движения призмы 3 и закон движения катка 4 относительно призмы.

Решение

Рассматриваемая механическая система – катки и призма имеет две степени свободы, так как перемещение катка 4 относительно призмы 3 не зависит от перемещения самой призмы и катка 1. За обобщенные координаты выберем перемещение x_4 центра масс катка 4 относительно края призмы и перемещение x_3 края призмы 3 относительно произвольной неподвижной вертикальной плоскости (рис. 6.36). Обобщенные скорости: $\dot{x}_4$, $\dot{x}_3$.

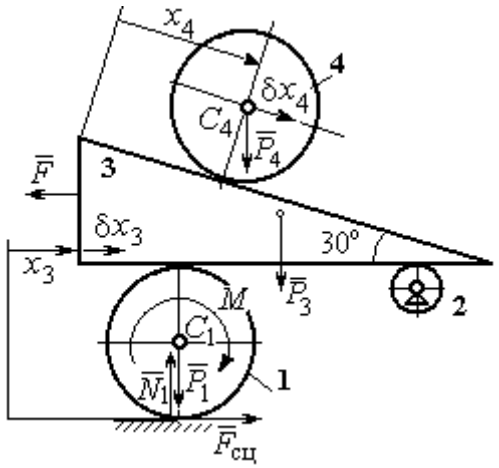


Рис. 6.36. Возможные перемещения механической системы

Уравнения Лагранжа II рода, описывающие движение системы в обобщённых координатах:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_4}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_4} = Q_{x_4};$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q_{x_3},$$

где T – кинетическая энергия системы; Q_{x_4}, Q_{x_3} – обобщенные силы, соответствующие указанным обобщенным координатам.

Вычислим кинетическую энергию тел в системе.

Каток 1 совершает плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия катка $T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_{C_1}^2 + \frac{1}{2} J_{C_1} \omega_1^2$, где V_{C_1} – скорость центра масс катка, $V_{C_1} = \frac{1}{2}\dot{x}_3$; J_{C_1} – момент инерции катка относительно оси, проходящей через центр масс

перпендикулярно плоскости движения, $J_{C_1} = \frac{m_1 r^2}{2}$; ω_1 – угловая скорость катка 1, $\omega_1 = \frac{\dot{x}_3}{2r}$.

Призма 3 совершает поступательное движение со скоростью $V_3 = \dot{x}_3$. Её кинетическая энергия $T_3 = \frac{m_3 V_3^2}{2} = \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}$.

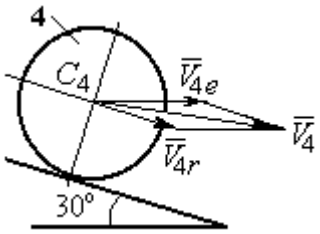


Рис. 6.37. Скорость центра масс катка 4

При расчёте кинетической энергии катка 4 по формуле $T_4 = \frac{1}{2} m_4 V_4^2 + \frac{1}{2} J_{C_4} \omega_4^2$ необходимо учитывать, что каток 4 совершает сложное движение. Здесь относительное движение катка – его качение по наклонной поверхности призмы, переносное – поступательное перемещение вместе с призмой.

Вектор абсолютной скорости центра масс катка 4 $\vec{V}_4$ представляется в виде суммы $\vec{V}_4 = \vec{V}_{4e} + \vec{V}_{4r}$ (рис. 6.37), где $\vec{V}_{4e}$ – вектор переносной скорости катка, равный по модулю скорости призмы: $V_{4e} = \dot{x}_3$; $\vec{V}_{4r}$ – вектор относительной скорости центра масс катка, равный по величине $V_{4r} = \dot{x}_4$. Модуль абсолютной скорости центра масс катка 4 (по теореме косинусов):

$$V_4^2 = V_{4e}^2 + V_{4r}^2 - 2V_{4e}V_{4r}\cos 150^\circ = \dot{x}_3^2 + \dot{x}_4^2 + 2\dot{x}_3\dot{x}_4\cos 30^\circ .$$

Поскольку переносное движение катка 4 поступательное, угловая скорость катка ω_4 равна его угловой скорости в относительном движении $\omega_4 = \frac{V_{4r}}{r} = \frac{\dot{x}_4}{r}$.

В результате выражение кинетической энергии системы, в обобщённых скоростях имеет вид:

$$T = \frac{1}{2} m_1 V_{C_1}^2 + \frac{1}{2} J_{C_1} \omega_1^2 + \frac{1}{2} m_3 V_3^2 + \frac{1}{2} m_4 V_4^2 + \frac{1}{2} J_{C_4} \omega_4^2 =$$

$$= \frac{P}{2g}\left(\frac{27}{8}\dot{x}_3^2 + \frac{3}{2}\dot{x}_4^2 + \dot{x}_3\dot{x}_4\sqrt{3}\right).$$

Дадим системе возможное перемещение по координате x_3, оставляя координату x_4 без изменения: $\delta x_3 > 0, \delta x_4 = 0$. При таком движении системы каток 4 не скатывается по призме, а движется поступательно вместе с ней. В этом случае работа сил тяжести катков 1, 4 и призмы равна нулю, так как нет вертикального перемещения точек приложения этих сил. Работу на этом перемещении будет производить только сила $\vec{F}$ и пара сил с моментом M, приложенная к катку 1. Суммарная элементарная работа

$$\delta A = -F\delta x_3 + M\delta\varphi_1 = \left(-F + \frac{M}{2r}\right)\delta x_3 .$$

Здесь учтено, что элементарный угол поворота катка 1 связан с перемещением призмы соотношением: $\delta\varphi_1 = \frac{\delta x_3}{2r}$. Отсюда обобщённая сила, соответствующая координате x_3: $Q_{x_3} = -F + \frac{M}{2r} = \frac{1}{2}P$.

Дадим системе другое независимое перемещение – по координате x_4, оставляя координату x_3 без изменения: $\delta x_4 > 0, \delta x_3 = 0$. При этом возможном перемещении вся система стоит, кроме катка 4, который скатывается по наклонной поверхности призмы. При таком движении системы работу совершает только сила тяжести катка 4. Выражая элементарную работу $\delta A = P_4\delta x_4\cos 60^\circ = \frac{1}{2}P\delta x_4$, найдём обобщённую силу, соответствующую координате x_4: $Q_{x_4} = \frac{1}{2}P$.

Составим уравнения Лагранжа. С этой целью вычислим необходимые производные кинетической энергии

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right) = \frac{27P}{8g}\ddot{x}_3 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_4;\ \ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_4}\right) = \frac{3P}{2g}\ddot{x}_4 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_3;\ \ \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0,\ \frac{\partial T}{\partial x_4} = 0.$$

Подставляя результаты расчётов в общий вид уравнений Лагранжа, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{27P}{8g}\ddot{x}_3 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_4 = \frac{1}{2}P, \quad \frac{3P}{2g}\ddot{x}_4 + \frac{P\sqrt{3}}{2g}\ddot{x}_3 = \frac{1}{2}P$$

или

$$6{,}75\ddot{x}_3 + 1{,}73\ddot{x}_4 = g\,; \quad 3\ddot{x}_4 + 1{,}73\ddot{x}_3 = g\,.$$

Решаем данную систему как алгебраическую относительно ускорений $\ddot{x}_3$, $\ddot{x}_4$. Получим: $\ddot{x}_3 = 0{,}07g,\ \ddot{x}_4 = 0{,}29g$.

Интегрируя дважды эти уравнения с нулевыми начальными условиями, получим закон движения призмы ($x_3 = 0{,}035gt^2$) и центра масс катка 4 относительно призмы ($x_4 = 0{,}145gt^2$). Движение призмы и катка 4 относительно призмы происходит в положительном направлении осей.

Задача 74. Механическая система состоит из трёх тел – груза 1, катка 2 и блока 3 (рис. 6.38). Невесомый стержень, соединяющий каток 2 с блоком 3, параллелен горизонтальной плоскости качения катка 2. К центру катка 2 прикреплена горизонтальная пружина, другой конец которой соединён с грузом 1. Коэффициент жесткости пружины *c*. Груз 1 весом P_1 движется без трения по горизонтальной поверхности. Каток 2 весом P_2 катится по горизонтальной поверхности без скольжения. Радиус катка 2 равен *r*. Блок 3 считать однородным диском весом P_3 радиуса *R*. К блоку 3 приложена пара сил с моментом *M*. Движение катка 2 блоку 3 передаётся горизонтальным невесомым стержнем. Скольжение между стержнем и дисками отсутствует. В начальный момент система находилась в покое. При этом груз 1 находился в положении, при котором

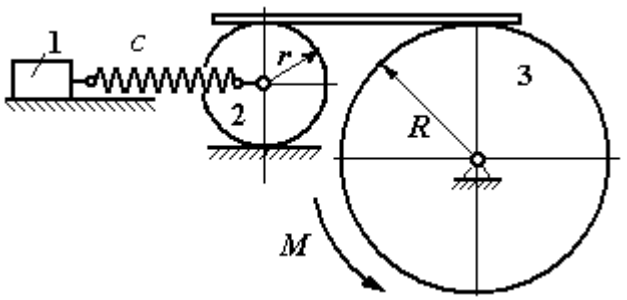


Рис. 6.38. Колебания механической системы с двумя степенями свободы

пружина была растянута относительно своего недеформированного состояния на величину Δl_0.

Найти закон абсолютного движения груза 1, если известно P_1 = 10 Н, P_2 = 20 Н, P_3 = 30 Н, M = 5 Н·м, R = 24 см, c = 207 Н/м, Δl_0 = 5 см.

Решение

Рассматриваемая механическая система имеет две степени свободы. В качестве обобщенных координат выберем удлинение пружины x_1 относительно недеформированного состояния и угол φ_3 поворота блока 3 (рис. 6.39). При этом x_1 является относительной координатой движения груза, а φ_3 – абсолютной координатой вращения блока 3.

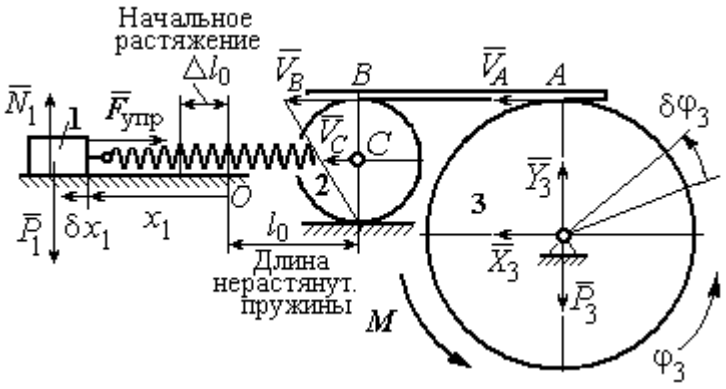


Рис. 6.39. Расчётная схема колебаний механической системы

Рассмотрим сложное движение груза 1. Относительное движение груза – это его движение на пружине в предположении, что точка крепления пружины неподвижна. Относительная скорость $V_{1r} = \dot{x}_1$. Переносное движение – это перемещение груза вместе с фиксированной длиной пружины (иначе, заменяя пружину жестким стержнем). Переносная скорость груза 1 $V_{1e} = V_C$, где V_C – скорость центра масс катка 2.

На рис. 6.39 показано распределение скоростей точек катка 2, откуда следует: $V_C = \frac{1}{2} V_B$. Имеем: $V_B = V_A = \omega_3 R = \dot{\varphi}_3 R$ и $V_C = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R$.

Для того чтобы найти модуль абсолютной скорости груза 1, спроектируем векторное равенство теоремы сложения скоростей $\vec{V}_1 = \vec{V}_{1r} + \vec{V}_{1e}$ на горизон-

тальную ось. Полагая, что движение системы происходит в положительном направлении отсчета обобщённых координат, получим: $V_1 = \dot{x}_1 + \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R$.

Уравнения Лагранжа II рода, описывающие движение системы:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1}\right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_x, \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = Q_\varphi,$$

где T – кинетическая энергия системы; Q_x, Q_φ – обобщенные силы, соответствующие обобщенным координатам x_1 и φ_3.

Вычислим кинетическую энергию системы и выразим её через обобщённые скорости.

Кинетическая энергия поступательного движения груза 1 определяется выражением $T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2$, где V_1 следует рассматривать как абсолютную скорость груза. Тогда $T_1 = \frac{1}{2} m_1 \left(\dot{x}_1 + \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R\right)^2$. Каток 2 совершает плоскопараллельное движение. Кинетическая энергия катка $T_2 = \frac{3}{4} m_2 V_C^2$, причём $V_C = \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R$. Тогда $T_2 = \frac{3}{16} m_2 \dot{\varphi}_3^2 R^2$. Кинетическая энергия вращающегося блока 3: $T_3 = \frac{1}{2} J_{3z} \omega_3^2$, где J_{3z} – осевой момент инерции блока 3, $J_{3z} = \frac{m_3 R^2}{2}$. Окончательно $T_3 = \frac{1}{4} m_3 \dot{\varphi}_3^2 R^2$.

Кинетическая энергия системы имеет вид:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1 + \frac{1}{2}\dot{\varphi}_3 R)^2 + \frac{3}{16} m_2 \dot{\varphi}_3^2 R^2 + \frac{m_3 R^2}{4} \dot{\varphi}_3^2 =$$

$$= \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1 \dot{\varphi}_3 R + \left(\frac{1}{8} m_1 + \frac{3}{16} m_2 + \frac{1}{4} m_3\right) \dot{\varphi}_3^2 R^2.$$

Дадим системе возможное перемещение, при котором изменяется координата груза x_1 ($\delta x_1 > 0$), а другая координата – угол поворота блока 3 φ_3 остаётся постоянной ($\delta\varphi_3 = 0$). В этом случае груз 1 движется горизонтально, блок 3 и каток 2 – неподвижны. При таком движении работу будет производить только упругая сила пружины.

Модуль силы упругости пружины пропорционален её растяжению и в произвольном положении груза равен: $F_{\text{упр}} = c\Delta\ell = cx_1$. Направление силы упругости противоположно растяжению (см. рис. 6.39).

Сумма элементарных работ сил на заданном перемещении системы δx_1: $\delta A = -F_{\text{упр}}\delta x_1 = -cx_1\delta x_1$. Отсюда обобщенная сила Q_x, соответствующая координате x_1: $Q_x = -cx_1 = -207x_1$ Н.

Дадим системе другое возможное перемещение, при котором пружина не растягивается: $\delta x_1 = 0$, а блок 3 повернулся на угол $\delta\varphi_3$: $\delta\varphi_3 > 0$. В этом случае пружина рассматривается как жёсткий стержень, связывающий груз 1 с центром масс катка 2. В результате при повороте блока 3 груз 1 и точка *C* движутся одинаково в горизонтальном направлении. На этом перемещении системы работу совершает только пара сил с моментом *M*, приложенная к блоку 3. Имеем $\delta A = M\delta\varphi_3$, и, следовательно, обобщённая сила $Q_\varphi = M = 5$ Н·м.

Составим уравнения Лагранжа, для чего вычислим производные от кинетической энергии по обобщенным скоростям и координатам:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1\dot{x}_1 + \frac{1}{2}m_1R\dot{\varphi}_3;\quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3} = \frac{1}{2}m_1R\dot{x}_1 + \left(\frac{1}{4}m_1 + \frac{3}{8}m_2 + \frac{1}{2}m_3\right)\dot{\varphi}_3R^2;$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = 0,\quad \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = 0.$$

Полные производные по времени:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1}\right) = m_1\ddot{x}_1 + \frac{1}{2}m_1R\ddot{\varphi}_3;\quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3}\right) = \frac{1}{2}m_1R\ddot{x}_1 + \left(\frac{1}{4}m_1 + \frac{3}{8}m_2 + \frac{1}{2}m_3\right)\ddot{\varphi}_3R^2.$$

Приравнивая полные производные обобщённым силам, получим уравнения Лагранжа окончательно в виде системы алгебраических уравнений относительно ускорений $\ddot{x}_1$ и $\ddot{\varphi}_3$:

$$1{,}02\ddot{x}_1 + 0{,}12\ddot{\varphi}_3 = -207x_1;\ \ 0{,}12\ddot{x}_1 + 0{,}15\ddot{\varphi}_3 = 5.$$

Разрешая систему относительно ускорения $\ddot{x}_1$, получим уравнение относительных колебаний груза:

$$\ddot{x}_1 + 225x_1 = -4{,}35.$$

Решение линейного неоднородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами представляется в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного: $x_1 = x_{\text{одн}} + x_{\text{частн}}$.

Общее решение однородного уравнения $x_{\text{одн}} = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt$, где C_1, C_2 – произвольные постоянные; k – круговая частота собственных колебаний груза 1, $k = \sqrt{225} = 15$ рад/с. Частное решение неоднородного уравнения ищется в виде константы $x_{\text{част}} = b$. Подставив его в уравнение колебаний, получим: $b = -0{,}02$.

Таким образом, общее решение неоднородного уравнения

$$x_1(t) = C_1 \sin 15t + C_2 \cos 15t - 0{,}02.$$

Начальная координата x_{01} груза 1 определяется из условия, что в начальный момент времени при $t = 0$ груз находился в положении, при котором пружина была растянута относительно своего недеформированного состояния на расстояние $\Delta l_0 = 0{,}05$ м. Следовательно, $x_{01} = 0{,}05$. Подставляя значение начальной координаты в общее решение неоднородного уравнения при $t = 0$, получим: $C_2 = 0{,}07$.

Относительная скорость груза 1 в любой момент времени: $\dot{x}_1(t) = C_1 15 \cos 15t - C_2 15 \sin 15t$. По условию задачи начальная скорость груза 1

$\dot{x}_1(0) = 0$. После подстановки начального условия в выражение для скорости груза 1 получим: $C_1 = 0$.

Окончательно уравнение относительного движения груза 1:

$$x_1(t) = 0{,}07\cos 15t - 0{,}02 \text{ м}.$$

Найдём уравнение вращательного движения блока 3. Для этого в дифференциальное уравнение $0{,}12\ddot{x}_1 + 0{,}15\ddot{\varphi}_3 = 5$ подставим значение второй производной решения относительных колебаний груза 1. Получим: $\ddot{\varphi}_3 = 33{,}33 + 12{,}6\cos 15t$. Полагая $\ddot{\varphi}_3 = \dfrac{d\omega_3}{dt}$, получим дифференциальное уравнение первого порядка: $\dfrac{d\omega_3}{dt} = 33{,}33 + 12{,}6\cos 15t$, откуда найдём угловую скорость блока 3: $\omega_3 = 33{,}33t + 0{,}84\sin 15t + C_3$.

Аналогично, положив $\omega_3 = \dfrac{d\varphi_3}{dt}$, найдём закон вращательного движения блока 3: $\varphi_3 = 16{,}665t^2 - 0{,}056\cos 15t + C_3 t + C_4$.

Начальные условия движения блока: при $t = 0$, $\varphi_3(0) = 0$, $\omega_3(0) = 0$. Подставляя начальные условия в уравнения движения, получим: $C_4 = 0{,}056$, $C_3 = 0$.

Окончательно уравнение вращательного движения блока 3:

$$\varphi_3 = 16{,}665t^2 - 0{,}056\cos 15t + 0{,}056.$$

Абсолютное движение s_1 груза 1 представляется суммой относительного и переносного движений:

$$s_1 = x_1 + S_C = x_1 + \frac{1}{2}R\varphi_3 = 2t^2 - 0{,}06\cos 15t - 0{,}01.$$

Упражнения

Упражнение 6.6. Каток весом $P_1 = 2P$, радиуса r, движущийся без проскальзывания по вертикальной стене, удерживается вертикальной пружиной жесткостью $C = 4P / r$, прикреплённой одним концом к центру катка, другим – к неподвижной поверхности (рис. 6.40). К нити, намотанной на барабан катка, подвешен груз 2 весом $P_2 = P$. На груз действует сила $F = P$, к катку приложена пара сил с моментом $M = Pr$.

Найти закон движения груза 2 и максимальное растяжение пружины, если движение системы началось из состояния покоя при недеформированной пружине.

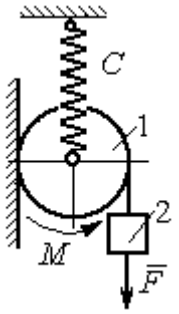


Рис. 6.40. Схема движения катка

Упражнение 6.7. Грузы 1 и 2 весом $P_1 = 20$ Н и $P_2 = 30$ Н привязаны к нерастяжимой нити. Нить переброшена через неподвижные блоки B и D и охватывает снизу подвижный блок 3 весом $P_3 = 40$ Н (рис. 6.41).

Определить ускорения грузов 1 и 2 и центра масс блока 3. Весом нити и неподвижных блоков B и D пренебречь.

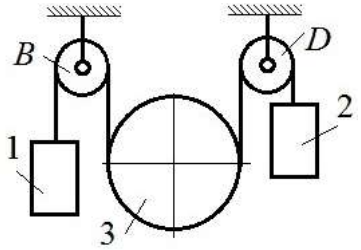


Рис. 6.41. Механическая система с двумя степенями свободы

Упражнение 6.8. Каток 1, радиуса r весом P катится по горизонтальной поверхности. К катку приложена пара сил с моментом $M = 2Pr$. Каток передаёт движение невесомой тележке (см. рис. 6.42). В кузове тележки находится каток 2 такого же радиуса r и веса P, который движется по горизонтальной поверхности кузова под действием силы $F = P$, приложенной в центре катка. Найти закон движения центра катка 2 относительно тележки, если движение системы началось из состояния покоя.

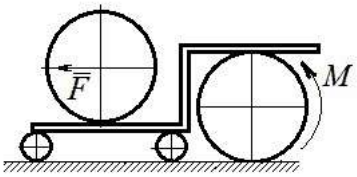


Рис. 6 42. Движение катка в кузове тележки

7. ОТВЕТЫ И КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

7.1. Ответы к упражнениям главы 1

1.1

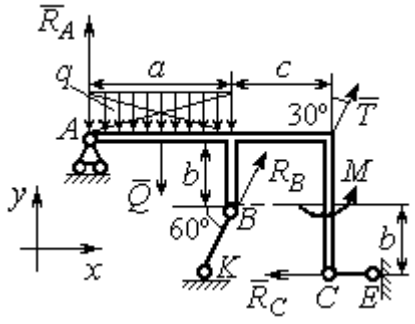


Рис. 7.1. Расчётная схема к упражнению 1.1

$T = 15$ кН, $Q = 15$ кН.

$$R_B\cos60^\circ + T\cos60^\circ - R_C = 0;$$

$$R_A - Q + R_B\cos30^\circ + T\cos30^\circ = 0;$$

$$-Q\cdot\frac{a}{2} + R_B\cos30^\circ\cdot a + R_B\cos60^\circ\cdot b + T\cos30^\circ\cdot(a+c) + $$

$$+ M - R_C\cdot 2b = 0.$$

$R_B = -3{,}8$ кН, $R_C = 5{,}6$ кН, $R_A = 5{,}3$ кН.

1.2

$Q = 9$ кН. $T = 2$ кН.

$$X_A + T\cos30^\circ + Q\cos30^\circ = 0;$$

$$Y_A - Q\cos60^\circ + R_B - T\cos60^\circ - F = 0;$$

$$-Q\cdot\frac{c}{2} + R_B(b + c\cos60^\circ) - Fc\cos60^\circ + M -$$

$$-T\cos60^\circ(b + c\cos60^\circ) - T\cos30^\circ(a + c\sin60^\circ) = 0.$$

$R_B = 10{,}02$ кН, $X_A = -9{,}53$ кН, $Y_A = -0{,}52$ кН.

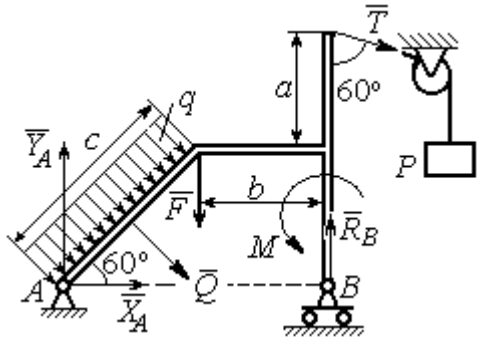


Рис. 7.2. Расчётная схема к упражнению 1.2

1.3

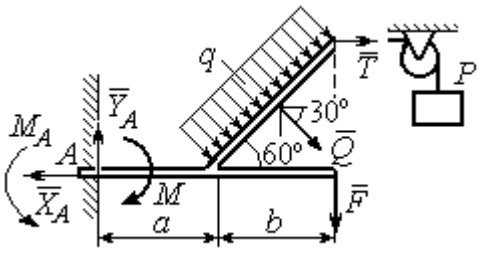


Рис. 7.3. Расчётная схема к упражнению 1.3

$Q = 8$ кН. $T = 3$ кН.

$$-X_A + T + Q\cos30^\circ = 0;$$

$$Y_A - Q\cos60° - F = 0;$$

$$-T2b\cos30° - F(a+b) + M_A - M -$$

$$-Q\cos60°\left(a + \frac{b}{2}\right) - Q\cos30^\circ\left(b\cos30^\circ\right) = 0.$$

$M_A = 18{,}61$ кН·м, $X_A = 9{,}93$ кН, $Y_A = 6$ кН.

1.4

$Q = 6{,}93$ кН, $T = 2$ кН.

$$-X_B - T + Q\cos 30^\circ + F\cos 60^\circ = 0;$$

$$R_A - Q\cos 60^\circ + Y_B - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$-\frac{Qa}{2\cos 30^\circ} + Y_B\left(b + \frac{a}{2\cos 30^\circ}\right) + Ta - Fa\cos 60^\circ -$$

$$-F\cos 30^\circ\left(b + \frac{a}{2\cos 30^\circ}\right) + M = 0.$$

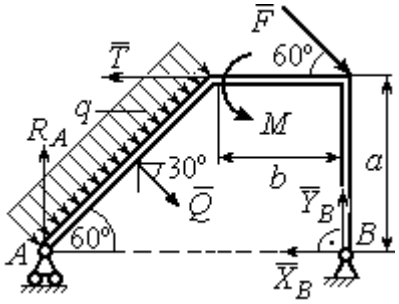


Рис.7.4. Расчётная схема к упражнению 1.4

$R_A = 0{,}72$ кН, $X_B = -5{,}5$ кН, $Y_B = 5{,}34$ кН.

1.5

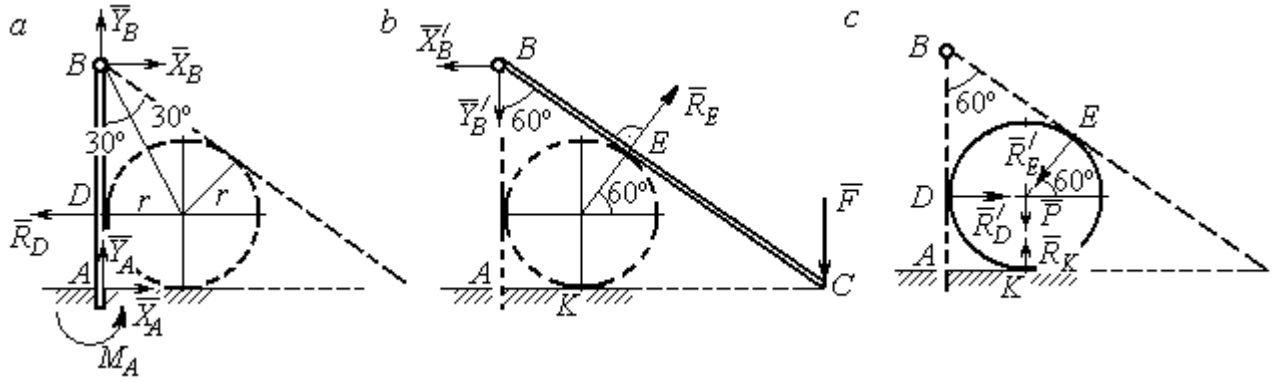


Рис. 7.5. Расчётные схемы к упражнению 1.5:
a – равновесие балки *AB*; *b* – равновесие балки *BC*; *c* – равновесие шара

$X_B = X'_B$, $Y_B = Y'_B$, $R_D = R'_D$, $R_E = R'_E$.

Балка *AB*. $AB = r + BD = r + r\operatorname{ctg}30^\circ = 2{,}73$ м.

$$X_A - R_D + X_B = 0, \quad Y_A + Y_B = 0, \quad M_A + R_D \cdot r - X_B \cdot AB = 0.$$

Балка *BC*. $BE = BD = 1{,}73$ м. $AC = BC\cos 30^\circ = 2AB\cos 30^\circ = 4{,}73$ м.

$$R_E\cos 60^\circ - X'_B = 0, \quad RE\sin 60\circ - Y'B - F = 0, \quad R_E \cdot BE - F \cdot AC = 0.$$

Шар.

$$R'_D - R'_E\cos 60^\circ = 0, \quad R_K - P - R'_E\cos 30^\circ = 0.$$

$R_E = 21{,}87$ кН, $Y_B = 10{,}94$ кН, $X_B = 10{,}94$ кН, $R_D = 10{,}94$ кН;

$R_K = 20{,}94$ кН, $X_A = 0$, $Y_A = -10{,}94$ кН, $M_A = 18{,}93$ кН·м.

1.6

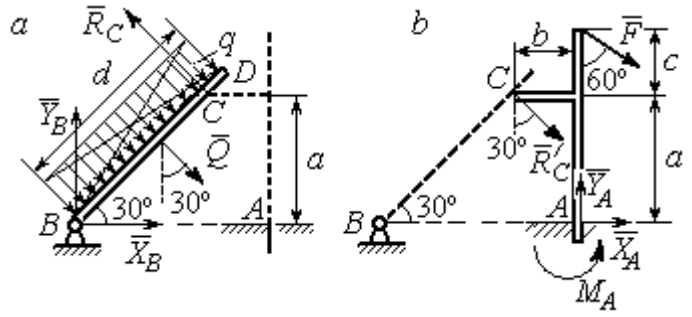


Рис. 7.6. Расчётные схемы к упражнению № 1.6:
a – равновесие балки *BD*; *b* – равновесие балки *AC*

Балка *BD*. $Q = 15$ кН.

$$X_B + Q\cos 60^\circ - R_C\cos 30^\circ = 0;$$

$$Y_B - Q\cos 30^\circ + R_C\cos 60^\circ = 0;$$

$$-Q\frac{d}{2} + R_C\, 2a = 0.$$

Балка *AC*. $R_C = R'_C$.

$$X_A + R'_C\cos 60^\circ + F\cos 30^\circ = 0,\ Y_A - R'_C\cos 30^\circ - F\cos 60^\circ = 0;$$

$$M_A - R'_C\cos 60^\circ \cdot a + R'_C\cos 30^\circ \cdot b - F\cos 30^\circ (a + c) = 0.$$

$$X_B = 0{,}61 \text{ кН},\ \ Y_B = 8{,}3 \text{ кН},\ R_C = 9{,}37 \text{ кН};$$

$$X_A = -8{,}15 \text{ кН},\ \ Y_A = 10{,}11 \text{ кН},\ \ M_A = 11{,}65 \text{ кН·м}.$$

1.7

Балка *AB*. $Q_1 = 6$ кН.

$T = P = 3$ кН.

$$X_A + R_B - T\cos 60^\circ + F = 0;$$

$$Y_A - Q_1 - T\cos 30^\circ = 0;$$

$$M_A - R_B(b + c)\cos 30^\circ + Q_1\frac{a}{2} +$$

$$+ T\cos 30^\circ a + T\cos 60^\circ c\cos 30^\circ -$$

$$- F\left[c + (b + c)\cos 30^\circ\right] = 0.$$

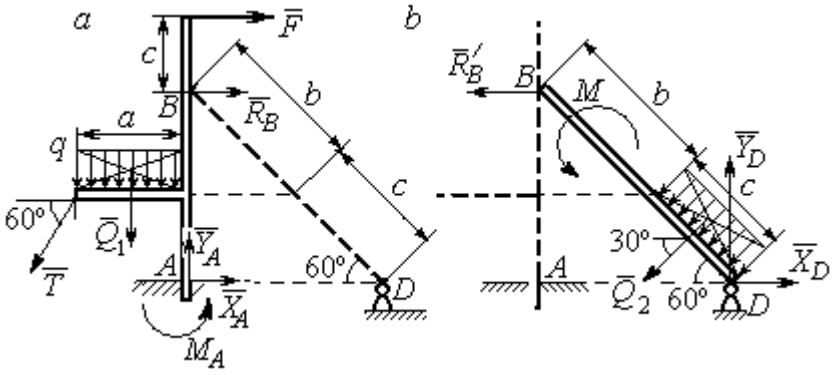


Рис. 7.7. Расчётные схемы к упражнению 1.7:
a – равновесие балки *AB*; *b* – равновесие балки *BD*

Балка *DB*. $Q_2 = 3$ кН. $R'_B = R_B$.

$$X_D - R'_B - Q_2\cos 30^\circ = 0,\ \ Y_D - Q_2\cos 60^\circ = 0,\ M + R'_B(b + c)\cos 30^\circ + Q_2\frac{c}{2} = 0.$$

$$X_A = -1{,}49 \text{ кН},\ Y_A = 8{,}6 \text{ кН},\ M_A = 8{,}86 \text{ кН},\ R_B = -1{,}01 \text{ кН};$$

$$X_D = 1{,}59 \text{ кН},\ \ Y_D = 1{,}5 \text{ кН}.$$

1.8

Шар.

$$R_B\cos60^\circ - R_D\cos60^\circ = 0;$$

$$R_B\cos30^\circ + R_D\cos30^\circ - P = 0.$$

Балка AC. $R'_B = R_B$.

$$X_A - R'_B\cos60^\circ = 0;$$

$$Y_A - R'_B\cos30^\circ + F = 0;$$

$$M_A - R'_B AB + F \cdot AC\cos30^\circ = 0.$$

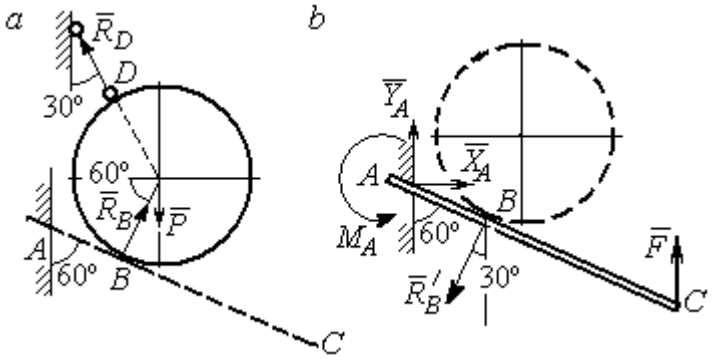


Рис. 7.8. Расчётные схемы к упражнению 1.8:
a – равновесие шара; *b* – равновесие балки *AC*

$X_A = 2{,}89$ кН, $Y_A = 0$ кН, $M_A = -11{,}55$ кН·м, $R_B = 5{,}77$ кН, $R_D = 5{,}77$ кН.

1.9

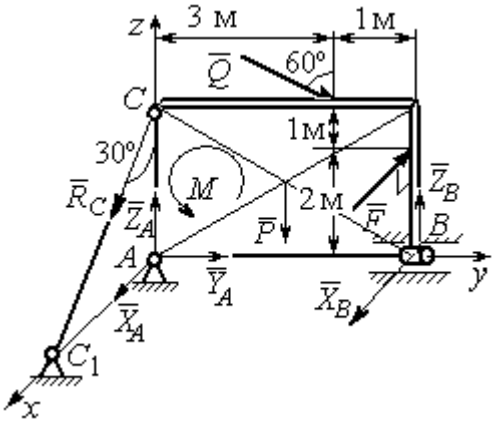


Рис. 7.9. Расчётная схема
к упражнению 1.9

$$X_A + R_C\cos60^\circ + X_B - F = 0;$$

$$Y_A + Q\cos30^\circ = 0;$$

$$Z_A - R_C\cos30^\circ - Q\cos60^\circ + Z_B - P = 0;$$

$$M - Q\cos60^\circ \cdot 3 - Q\cos30^\circ \cdot 3 + Z_B \cdot 4 - P \cdot 2 = 0;$$

$$R_C\cos60^\circ \cdot 3 - F \cdot 2 = 0,\ -X_B \cdot 4 + F \cdot 4 = 0.$$

$X_A = 5{,}34$ кН, $Y_A = 2{,}6$ кН;

$Z_A = 8{,}92$ кН, $R_C = 10{,}67$ кН;

$X_B = 8$ кН, $Z_B = 3{,}82$ кН.

1.10

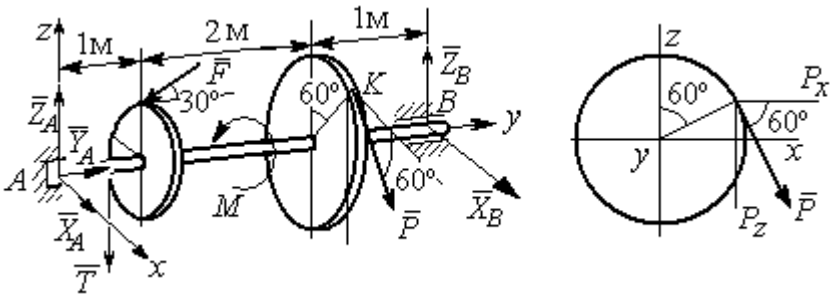


Рис. 7.10. Расчётные схемы к упражнению 1.10

$T = Q = 3$ кН.

$$X_A + P\cos 60^\circ + X_B = 0,\ \ Y_A - F\cos 30^\circ = 0;$$

$$Z_A - F\cos 60^\circ - P\cos 30^\circ - T + Z_B = 0.$$

$$-T\cdot 1 - F\cos 60^\circ \cdot 1 + F\cos 30^\circ \cdot r - P\cos 30^\circ \cdot 3 + Z_B \cdot 4 = 0;$$

$$-Tr + PR - M = 0,\ \ -P\cos 60^\circ \cdot 3 + X_B \cdot 4 = 0.$$

$X_A = 5{,}6$ кН, $Y_A = 3{,}46$ кН, $Z_A = 5{,}48$ кН, $P = 6{,}4$ кН, $X_B = 2{,}4$ кН, $Z_B = 5{,}06$ кН.

1.11

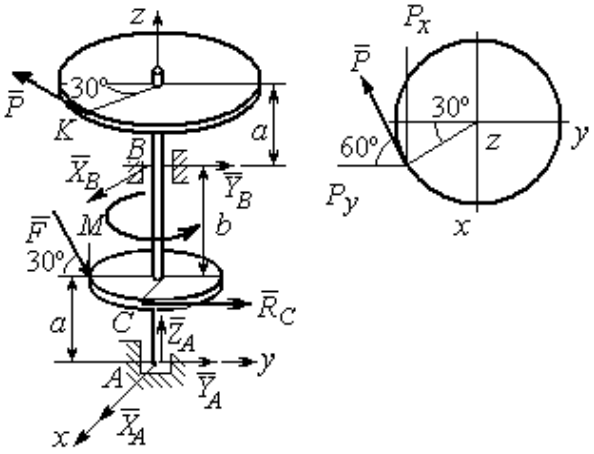


Рис. 7.11. Расчётные схемы к упражнению 1.11

$R_C = Q = 3$ кН.

$$X_A + X_B - P\cos 30^\circ = 0;$$

$$Y_A + Y_B - P\cos 60^\circ + R_C + F\cos 30^\circ = 0;$$

$$Z_A - F\cos 60^\circ = 0;$$

$$-Y_B(a+b) + P\cos 60^\circ(2a+b) - R_C a - -$$

$$F\cos 30^\circ \cdot a + F\cos 60^\circ \cdot r = 0;$$

$$X_B(a+b) - P\cos 30^\circ(2a+b) = 0;$$

$$-PR + R_C r + M = 0.$$

$X_A = -1{,}85$ кН, $Y_A = -5{,}64$ кН, $Z_A = 2$ кН, $P = 6{,}4$ кН, $X_B = 7{,}39$ кН, $Y_B = 2{,}38$кН.

1.12

$$T = Q = 3 \text{ кН}.$$

$$X_A + T + X_D = 0;\ Y_A - F + P\cos 60^\circ = 0,$$

$$Z_A + Z_D + P\cos 30^\circ = 0;$$

$$Fa\sin 30^\circ + Z_D(b+2a) + P(2b+2a)\cos 30^\circ = 0;$$

$$Ta\sin 30^\circ - Pa\cos 30^\circ + M = 0;$$

$$-Ta - X_D(b+2a) + Pa\cos 60^\circ + Fa\cos 30^\circ = 0.$$

$$X_A = 0{,}8 \text{ кН},\quad Y_A = 2{,}56 \text{ кН},\ \ Z_A = 1{,}3 \text{ кН};$$

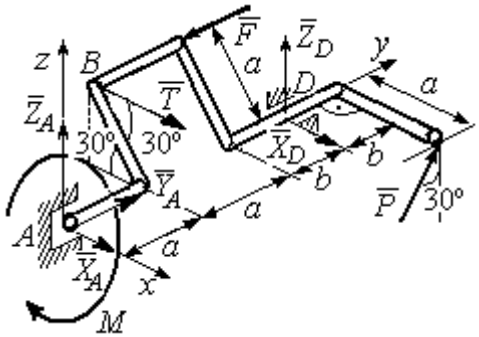


Рис. 7.12. Расчётная схема к упражнению 1.12

$$P = 2{,}89 \text{ кН},\ X_D = 0{,}76 \text{ кН},\ Z_D = -3{,}80 \text{ кН}.$$

1.13

Минимальный вес груза P:

$$T_{\min} + F_{\text{тр}\,A} - N_B = 0;$$

$$F_{\text{тр}\,B} + N_A - Q = 0;$$

$$F_{\text{тр}\,B} \cdot AB\sin 30° + N_B \cdot AB\cos 30° - Q \cdot AC\sin 30° = 0$$

Максимальный вес груза P:

$$T_{\max} - F_{\text{тр}\,A} - N_B = 0;$$

$$-F_{\text{тр}\,B} + N_A - Q = 0;$$

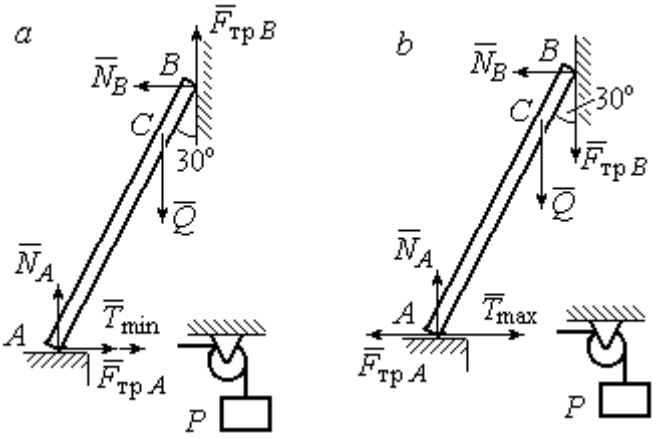


Рис. 7.13. Расчётные схемы к упражнению 1.13:
a – расчёт минимального веса груза;
b – расчёт максимального веса груза

$$-F_{\text{тр}\,B} \cdot AB\sin 30° + N_B \cdot AB\cos 30° - Q \cdot AC\sin 30° = 0;$$

$$F_{\text{тр}\,A} = f N_A,\ \ F_{\text{тр}\,B} = f N_B.$$

$$T_{\min} = 31.77 \text{ Н} < P < T_{\max} = 130{,}51 \text{ Н}.$$

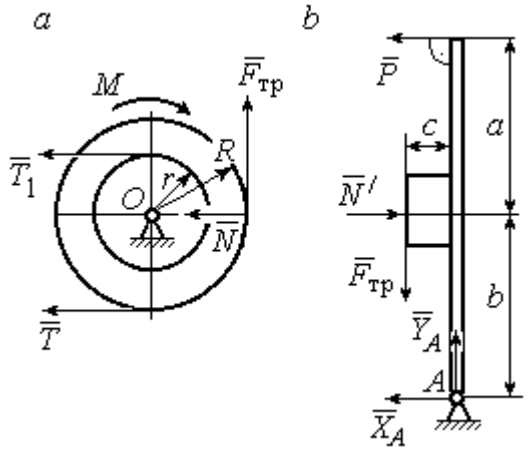


Рис. 7.14. Расчётные схемы
к упражнению 1.14:
a – равновесие шкива; *b* – равновесие рычага

1.14

Шкив. $T = T_1 = Q$.

$$T \cdot R - T_1 r + M - F_{\text{тр}} R = 0.$$

$$F_{\text{тр}} = 266{,}67 \text{ Н};$$

$$N = \frac{F_{\text{тр}}}{f} = 666{,}67 \text{ Н}.$$

Рычаг. $N = N'$. $F_{\text{тр}} = F'_{\text{тр}}$.

$$P(a+b) - N' \cdot b + F'_{\text{тр}} c = 0.$$

$$P = 320 \text{ Н}.$$

$$-X_A - P + N' = 0;$$

$$Y_A - F'_{\text{тр}} = 0.$$

$$X_A = 346{,}67 \text{ Н},\ Y_A = 266{,}67 \text{ Н}.$$

7.2. Ответы к упражнениям главы 2

2.1

$$\omega_{1z} = \dot{\varphi}_1 = 3 + \pi\cos\frac{\pi t}{2},\ \omega_1(1) = |\omega_{1z}(1)| = 3 \text{ рад/с}.$$

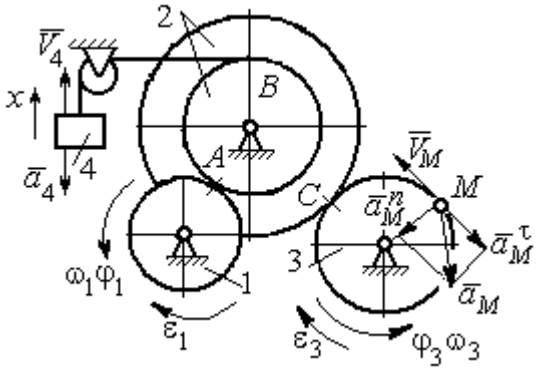


Рис. 7.15. Расчётная схема к упражнению 2.1

$$\omega_{3z} = \omega_{1z}\frac{R_1}{r_2}\frac{R_2}{R_3} = \left(3 + \pi\cos\frac{\pi t}{2}\right)\frac{4}{3};$$

$$\omega_3(1) = |\omega_{3z}(1)| = 4 \text{ рад/с}.$$

$$V_M(1) = \omega_3(1)R_3 = 40 \text{ см/с}.$$

$$\varepsilon_{3z} = \dot{\omega}_{3z} = -\frac{2\pi^2}{3}\sin\frac{\pi t}{2},\quad \varepsilon_{3z}(1) = -\frac{2\pi^2}{3};$$

$$\varepsilon_3(1) = |\varepsilon_{3z}(1)| = \frac{2\pi^2}{3} = 6{,}58 \text{ рад/с}^2.$$

$$\overline{a}_M = \overline{a}_M^n + \overline{a}_M^\tau,\ a_M^n(1) = \omega_3^2(1)R_3 = 160 \text{ см/с}^2,\ a_M^\tau(1) = \varepsilon_3(1)R_3 = 65{,}8 \text{ см/с}^2.$$

$$a_M(1) = 173 \text{ см/с}^2.$$

$$V_{4x} = V_A = \omega_{1z}R_1 = \left(3 + \pi\cos\frac{\pi t}{2}\right)8;\ V_4(1) = |V_{4x}(1)| = 24 \text{ см/с}.$$

$$\dot{V}_{4x} = -4\pi^2\sin\frac{\pi t}{2},\ \dot{V}_{4x}(1) = -4\pi^2;\ a_4(1) = |\dot{V}_{4x}(1)| = 39{,}48 \text{ см/с}^2.$$

2.2

$$V_{4x} = \dot{x}_4 = 1 - \frac{\pi}{3}\cos\frac{\pi t}{3} - \frac{\pi}{3}\sin\frac{\pi t}{3};$$

$$V_{4x}(3) = 2{,}05 \text{ м/с},\ V_4 = |V_{4x}(3)|$$

$$\omega_{3z} = \frac{V_{4x}}{r_3} = \frac{1}{r_3}\left(1 - \frac{\pi}{3}\cos\frac{\pi t}{3} - \frac{\pi}{3}\sin\frac{\pi t}{3}\right);$$

$$\omega_{3z}(3) = 6{,}83 \text{ рад/с};\ \omega_3 = |\omega_{3z}(3)|.$$

$$\varepsilon_{3z} = \dot{\omega}_{3z} = \frac{1}{r_3}\left(\frac{\pi^2}{9}\sin\frac{\pi t}{3} - \frac{\pi^2}{9}\cos\frac{\pi t}{3}\right).$$

$$\varepsilon_{3z}(3) = 3{,}65 \text{ рад/с}^2;\ \varepsilon_3 = |\varepsilon_{3z}(3)|.$$

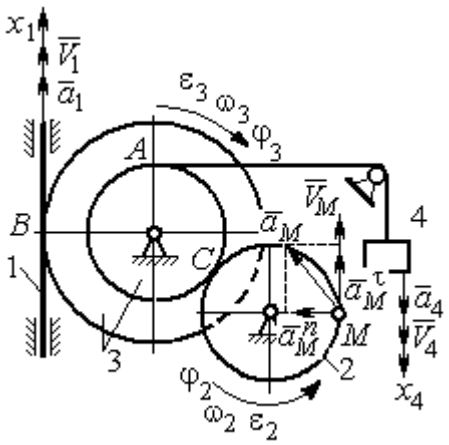


Рис. 7.16. Расчётная схема к упражнению 2.2

$$\frac{\omega_3}{\omega_2}=\frac{R_2}{r_3};\ \ \omega_2=\omega_3\frac{r_3}{R_2}=10{,}25\ \text{рад/с};\ V_M=\omega_2 R_2=2{,}05\ \text{м/с}.$$

$$\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}=\frac{R_2}{r_3};\ \ \varepsilon_2=\varepsilon_3\frac{r_3}{R_2}=5{,}47\ \text{рад/с}^2.$$

$$a_M^n=\omega_2^2 R_2=20{,}4\ \text{м/с}^2;\ \ a_M^\tau=\varepsilon_2 R_2=1{,}09\ \text{м/с}^2.$$

$$a_M=\sqrt{\left(a_M^n\right)^2+\left(a_M^\tau\right)^2}=20{,}43\ \text{м/с}^2.$$

$$V_1=\omega_3 R_3=2{,}73\ \text{м/с};\ a_1=\dot V_1=\dot\omega_3 R_3=\varepsilon_3 R_3=2{,}19\ \text{м/с}^2.$$

2.3

$$BP_2=BC\cos30^\circ=4{,}33\ \text{см};\ CP_2=2{,}5\ \text{см}.$$

$$\omega_{BC}=\frac{V_B}{BP_2}=1{,}15\ \text{рад/с};\ \ V_C=\omega_{BC}CP_2=2{,}87\ \text{см/с};$$

$$\omega_1=\frac{V_C}{CP_1}=0{,}72\ \text{рад/с};\ EP_1=2R_1\cos30^\circ=3{,}46\ \text{см};$$

$$V_E=\omega_1 EP_1=2{,}49\ \text{см/с};\ EP_3=2AE\cos30^\circ=10{,}39\ \text{см};$$

$$\omega_{AE}=\frac{V_E}{EP_3}=0{,}24\ \text{рад/с};\ EA=AP_3;$$

$$V_A=\omega_{AE}AP_3=1{,}44\ \text{см/с},\ \ \omega_{AO}=\frac{V_A}{AO}=0{,}24\ \text{рад/с}.$$

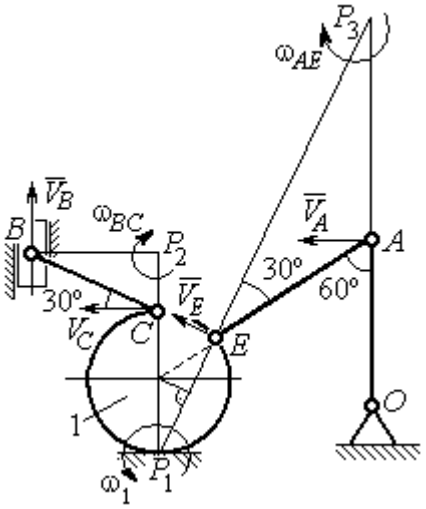


Рис. 7.17. Расчётная схема к упражнению 2.3

2.4

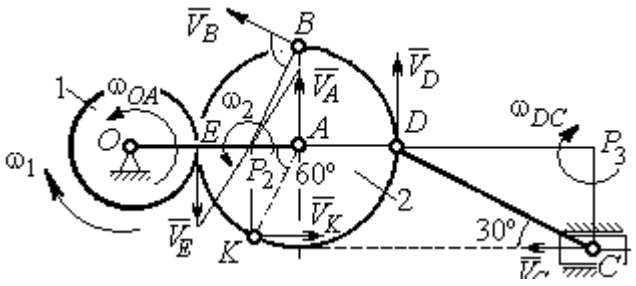


Рис. 7.18. Расчётная схема к упражнению 2.4

E – точка касания дисков.

$$V_E=\omega_1 r_1=18\ \text{см/с}.$$

$$V_A=\omega_{OA}\left(r_1+r_2\right)=18\ \text{см/с}.$$

$$EP_2=P_2A=3\ \text{см},\ \omega_2=\frac{V_E}{EP_2}=6\ \text{рад/с}.$$

$$V_K=\omega_2 P_2K=31{,}18\ \text{см/с}.$$

$$V_B=\omega_2 P_2B=40{,}25\ \text{см/с};\ V_D=\omega_2 P_2D=54\ \text{см/с}.$$

$$DC = 2r_2,\ \omega_{DC} = \frac{V_D}{DP_3} = 5{,}197 \text{ рад/с};\ V_C\cos 30^\circ = V_D\cos 60^\circ,\ V_C = 31{,}18 \text{ см/с}.$$

2.5

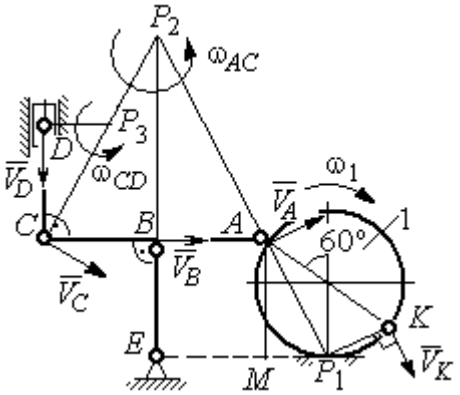


Рис. 7. 19. Расчётная схема к упражнению 2.5.

$$BE = 1{,}5R_1;\ R_1 = 2{,}67 \text{ см}.$$

$$KP_1 = R_1;\ \omega_1 = \frac{V_K}{KP_1} = 0{,}75 \text{ рад/с}.$$

$$AP_1 = \frac{AM}{\cos 30^\circ} = 4{,}62 \text{ см};\ V_A = \omega_1 P_1 A = 3{,}46 \text{ см/с}.$$

$$AP_2 = 2AB = 8 \text{ см};\ \omega_{AC} = \frac{V_A}{AP_2} = 0{,}43 \text{ рад/с}.$$

$$V_B\cos 0^\circ = V_A\cos 30^\circ;\ V_B = 2{,}99 \text{ см/с}.$$

$$\omega_{BE} = \frac{V_B}{BE} = 0{,}75 \text{ рад/с};\ V_C = V_A = 3{,}46 \text{ см/с};\ CP_3 = \frac{DC}{\cos 30^\circ} = 4{,}62 \text{ см};$$

$$\omega_{CD} = \frac{V_C}{CP_3} = 0{,}75 \text{ рад/с};\ V_D\cos 0^\circ = V_C\cos 60^\circ;\ V_D = 1{,}73 \text{ см/с}.$$

2.6

$$V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 12 \text{ см/с};\ \omega_{AD} = 0,\ V_D = V_A.$$

$$\omega_{O_1C} = \frac{V_D}{DO_1} = 3 \text{ рад/с};$$

$$V_C = \omega_{O_1C} \cdot O_1C = 48 \text{ см/с}.$$

$$CB = CP = 16 \text{ см};\ \omega_{CB} = \omega_{CL} = \frac{V_C}{CP} = 3 \text{ рад/с}.$$

$$PL = \frac{CP}{\cos 30^\circ} = 18{,}48 \text{ см};\ PB = 2BC\cos 30^\circ.$$

$$V_L = \omega_{CL} \cdot PL = 55{,}44 \text{ см/с};$$

$$V_B = \omega_{CB} \cdot PB = 83{,}13 \text{ см/с}.$$

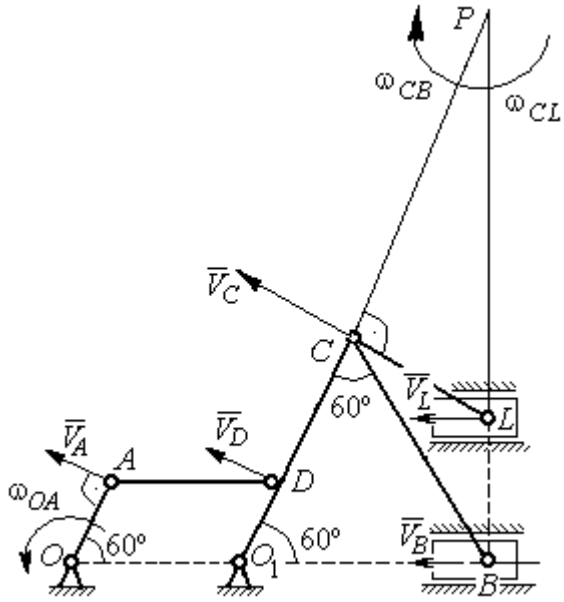


Рис. 7.20. Расчётная схема к упражнению 2.6.

2.7

$V_D = \omega_1 R_1 = 30$ см/с; $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 15$ см/с.

$$\omega_2 = \frac{V_A}{AP_2} = 3 \text{ рад/с.}$$

$$V_B = \omega_2 \cdot P_2 B = 21{,}21 \text{ см/с.}$$

$V_C \cos 0^\circ = V_B \cos 45^\circ$; $V_C = 15$ см/с.

$CP_3 = CB$; $\omega_{BC} = \dfrac{V_C}{CP_3} = 1{,}87$ рад/с.

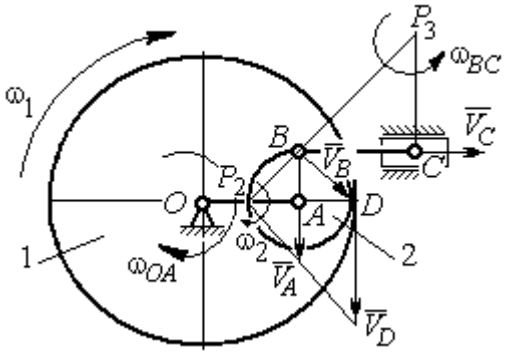


Рис. 7.21. Расчётная схема к упражнению 2.7

2.8

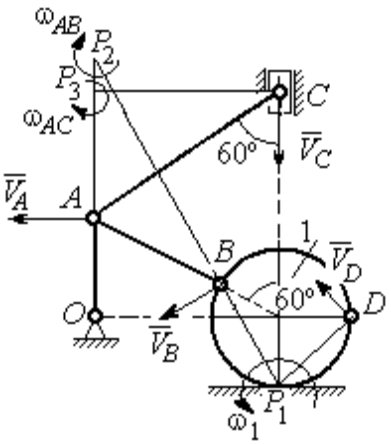


Рис. 7.22. Расчётная схема к упражнению 2.8

$AC = AB + R_1 = 12$ см; $CP_3 = AC \cos 30^\circ = 10{,}39$ см.

$\omega_{AC} = \dfrac{V_C}{CP_3} = 0{,}48$ рад/с; $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_3 = 2{,}89$ см/с.

$$AB = AP_2; \quad \omega_{AB} = \frac{V_A}{AP_2} = 0{,}29 \text{ рад/с.}$$

$$BP_2 = 2AB \cos 30^\circ = 17{,}32 \text{ см.}$$

$$V_B = \omega_{AB} BP_2 = 5{,}02 \text{ см/с.}$$

$OA = (AB + R_1)\sin 30° = 6$ см; $\omega_{OA} = \dfrac{V_A}{AO} = 0{,}48$ рад/с.

$$BP_1 = 2R_1 \cos 30^\circ = 3{,}46 \text{ см;} \quad \omega_1 = \frac{V_B}{BP_1} = 1{,}45 \text{ рад/с.}$$

$$DP_1 = R_1\sqrt{2} = 2{,}82 \text{ см; } V_D = \omega_1 DP_1 = 4{,}09 \text{ см/с.}$$

2.9

$$V_A = \omega_{OA} OA = 12 \text{ см/с;} \quad AP = 2AB = 2BC \cdot \operatorname{tg} 60^\circ = 27{,}71 \text{ см.}$$

$$\omega_{AB} = \frac{V_A}{AP} = 0{,}43 \text{ рад/с; } V_B \cos 0^\circ = V_A \cos 30^\circ; \; V_B = 10{,}38 \text{ см/с.}$$

$$\omega_{BC} = \frac{V_B}{BC} = 1{,}29 \text{ рад/с.}$$

$$\bar{a}_B = \bar{a}_A + \bar{a}^n_{BA} + \bar{a}^\tau_{BA}; \quad \bar{a}_B = \bar{a}_C + \bar{a}^n_{BC} + \bar{a}^\tau_{BC}, \; a_C = 0.$$

$$\bar{a}_A = \bar{a}_O + \bar{a}^n_{AO} + \bar{a}^\tau_{AO},\ a_O = 0.$$

$$\bar{a}^n_{BC} + \bar{a}^\tau_{BC} = \bar{a}^n_{AO} + \bar{a}^\tau_{AO} + \bar{a}^n_{BA} + \bar{a}^\tau_{BA}.$$ Найти a^τ_{BC}

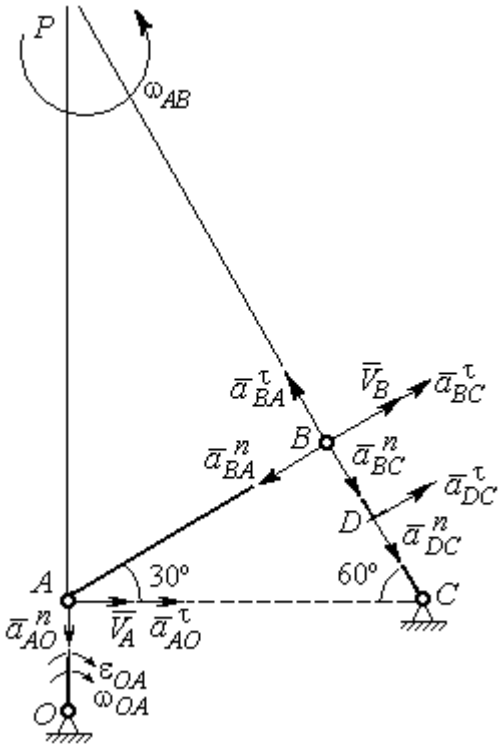


Рис. 7.23. Расчётная схема к упражнению 2.9

$$a^n_{AO} = \omega^2_{AO} \cdot AO = 36 \text{ см/с}^2;$$

$$a^\tau_{AO} = \varepsilon_{AO} \cdot AO = 8 \text{ см/с}^2;$$

$$AB = BC \cdot \text{tg}60^\circ = 13{,}86 \text{ см}.$$

$$a^n_{BA} = \omega^2_{AB} \cdot AB = 2{,}56 \text{ см/с}^2;\ \ a^\tau_{AB} = \varepsilon_{AB} AB.$$

$$a^n_{BC} = \omega^2_{BC} \cdot BC = 13{,}31 \text{ см/с}^2;\ \ a^\tau_{BC} = \varepsilon_{BC} BC.$$

Проекция на AB:

$$a^\tau_{BC} = -a^n_{AO}\cos 60^\circ +$$

$$+ a^\tau_{AO}\cos 30^\circ - a^n_{BA} = 13{,}63 \text{ см/с}^2.$$

$$\varepsilon_{BC} = \frac{\left|a^\tau_{BC}\right|}{BC} = 1{,}7 \text{ рад/с}^2.$$

$$\bar{a}_D = \bar{a}^n_{DC} + \bar{a}^\tau_{DC}.$$

$$a^n_{DC} = \omega^2_{BC} \cdot DC = 6{,}65 \text{ см/с}^2;\ \ a^\tau_{DC} = \varepsilon_{BC} \cdot DC = 6{,}8 \text{ см/с}^2.$$

$$a_D = \sqrt{\left(a^n_{DC}\right)^2 + \left(a^\tau_{DC}\right)^2} = 9{,}51 \text{ см/с}^2.$$

2.10

$$V_A = \omega_1 r_1 = 12 \text{ см/с};\ P_2 A = \frac{1}{2} BC = 5 \text{ см}.$$

$$\omega_{AB} = \frac{V_A}{P_2 A} = 2{,}4 \text{ рад/с}.$$

$$V_B \cos 30^\circ = V_A \cos 60^\circ;\ V_B = 6{,}93 \text{ см/с}.$$

$$P_3 B = BC\cos 30^\circ = 8{,}66 \text{ см};$$

$$\omega_{BC} = \frac{V_B}{P_3 B} = 0{,}8 \text{ рад/с}.$$

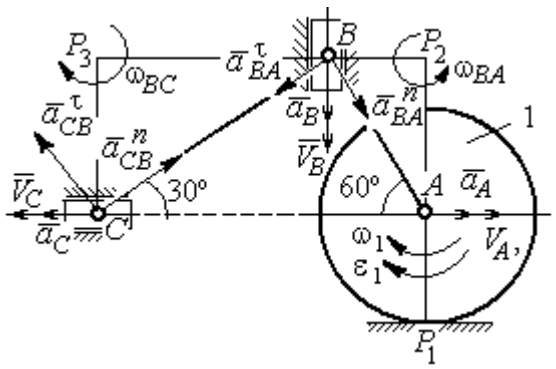


Рис. 7.24. Расчётная схема к упражнению 2.10

$$\bar{a}_B = \bar{a}_A + \bar{a}^n_{BA} + \bar{a}^\tau_{BA}.$$ Найти a_B.

Проекция на BA: $a_B\cos30° = a_A\cos60° + a^n_{BA}$.

$$a_A = a^\tau_A = \varepsilon_1 r_1 = 8 \text{ см/с}^2;\ AB = BC\operatorname{tg}30° = 5{,}77 \text{ см}.$$

$$a^n_{BA} = \omega^2_{BA}\cdot BA = 33{,}23 \text{ см/с}^2;\ \ a_B = 43{,}03 \text{ см/с}^2.$$

$$\bar a_C = \bar a_B + \bar a^n_{CB} + \bar a^\tau_{CB}.$$

Проекция на BC: $a_C\cos60° = a_B\cos60° - a^n_{CB}$,

$$a^n_{CB} = \omega^2_{CB}\cdot CB = 6{,}4 \text{ см/с}^2;\ \ a_C = a_B - 2a^n_{CB} = 30{,}23 \text{ см/с}^2.$$

7.3. Ответы к упражнениям главы 3

3.1

$$CM_1 = S_r(1) = \frac{40}{3}\sin\frac{\pi}{3} = 11{,}55 \text{ см}.$$

Так как $CM_1\cos30° = 10$ см $= R$, то точка M_1 лежит на вертикальном диаметре.

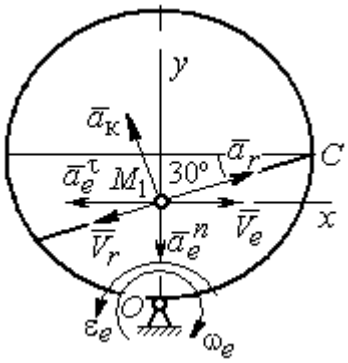


Рис. 7.25. Расчётная схема к упражнению 3.1

$$V_r = \dot S_r = \frac{40\pi}{9}\cos\frac{\pi t}{3};\ V_r(1) = 6{,}98 \text{ см/с}.$$

$$\omega_e(1) = 0{,}5 \text{ рад/с};\ OM_1 = R - \frac{1}{2}CM_1 = 4{,}23 \text{ см}.$$

$$V_e = \omega_e OM_1;\ \ V_e(1) = 2{,}12 \text{ см/с}.$$

$$\bar V_M = \bar V_e + \bar V_r.$$

$$V_{Mx} = V_e - V_r\cos30° = -3{,}93 \text{ м/с};\ V_{My} = -V_r\cos60° = -3{,}49 \text{ м/с};$$

$$V_M = \sqrt{(V_{Mx})^2 + (V_{My})^2} = 5{,}26 \text{ см/с}.$$

$$\bar a_M = \bar a_e + \bar a_r + \bar a_к.$$

$$\bar a_e = \bar a^n_e + \bar a^\tau_e,\ \ a^n_e = \omega^2_e OM_1;\ \ a^n_e(1) = 1{,}06 \text{ см/с}^2.$$

$$\dot\omega_e = -\frac{\pi}{3}\sin\frac{\pi t}{3},\ \ \dot\omega_e(1) = -0{,}91 \text{ рад/с}^2;\ \ \varepsilon_e = |\dot\omega_e(1)| = 0{,}91 \text{ рад/с}^2,$$

$$a^\tau_e(1) = \varepsilon_e\cdot OM_1 = 3{,}85 \text{ см/с}^2.$$

$$\dot{V}_r = -\frac{40\pi^2}{27}\sin\frac{\pi t}{3},\ \dot{V}_r(1) = -12{,}66;\ a_r = \left|\dot{V}_r(1)\right| = 12{,}66 \text{ см/с}^2$$

$$a_к = 2\left|\omega_e\right| \cdot \left|V_r\right|;\ \ a_к(1) = 6{,}98 \text{ см/с}^2.$$

$$\bar{a}_M = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_r + \bar{a}_к.$$

$$a_{Mx} = -a_e^\tau + a_r\cos 30° - a_к\cos 60° = 3{,}62 \text{ см/с}^2;$$

$$a_{My} = -a_e^n + a_r\cos 60° + a_к\cos 30° = 11{,}31 \text{ см/с}^2.$$

$$a_M = \sqrt{(a_{Mx})^2 + (a_{My})^2} = 11{,}87 \text{ см/с}^2.$$

3.2

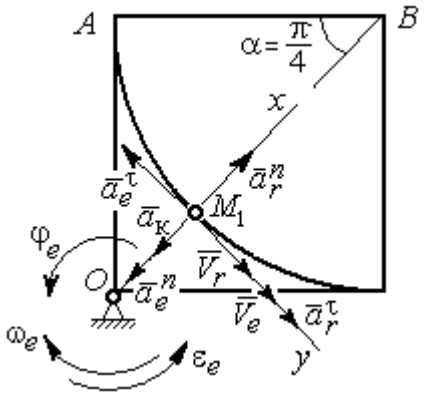


Рис. 7.26. Расчётная схема к упражнению 3.2

Положение M_1:

$$\alpha = \frac{S_r(1)}{R} = \frac{\pi}{4};\ \ OM_1 = 8{,}28 \text{ см}.$$

$$\dot{S}_r = 10\pi t;\ \ V_r = \left|\dot{S}_r(1)\right| = 31{,}42 \text{ см/с}.$$

$$\dot{\varphi}_e = 2t - 5,$$

$$\dot{\varphi}_e(1) = -3 \text{ рад/с},\ \ \omega_e = \left|\dot{\varphi}_e(1)\right| = 3 \text{ рад/с}.$$

$$V_e = \omega_e \cdot OM_1 = 24{,}6 \text{ см/с}.$$

$$\bar{V}_M = \bar{V}_e + \bar{V}_r \cdot\ V_{Mx} = V_e + V_r = 56{,}02 \text{ см/с};$$

$$V_{My} = 0;\ V_M = 56{,}02 \text{ см/с}.$$

$$\bar{a}_M = \bar{a}_e + \bar{a}_r + \bar{a}_к = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_r^n + \bar{a}_r^\tau + \bar{a}_к.$$

$$\bar{a}_e = \bar{a}_e^n + \bar{a}_e^\tau\ \cdot\ a_e^n = \omega_e^2 \cdot OM_1 = 74{,}52 \text{ см/с}^2;$$

$$\dot{\omega}_e = 2 \text{ рад/с}^2;\ \varepsilon_e = \left|\dot{\omega}_e\right|;\ \ a_e^\tau(1) = \varepsilon_e OM_1 = 16{,}56 \text{ см/с}^2;$$

$$\bar{a}_r = \bar{a}_r^n + \bar{a}_r^\tau \cdot \dot{V}_r = 10\pi;\ a_r^\tau = \left|\dot{V}_r\right| = 10\pi = 31{,}42 \text{ см/с}^2;$$

$$a_r^n(1) = \frac{V_r^2}{R} = 49{,}36 \text{ см/с}^2;\ \ a_к = 2\left|\omega_e\right| \cdot \left|V_r\right|;\ \ a_к(1) = 62{,}84 \text{ см/с}^2.$$

$$a_{Mx} = -a_e^n + a_r^n - a_к = -88 \text{ см/с}^2;\ a_{My} = -a_e^\tau + a_r^\tau = 14{,}86 \text{ см/с}^2.$$

$$a_M = \sqrt{(a_{Mx})^2 + (a_{My})^2} = 89{,}24 \text{ см/с}^2.$$

7.4. Ответы к упражнениям главы 4

4.1

$$m\ddot{x} = F - P\cos 60° - F_{\text{тр}}, \quad m\ddot{y} = N - P\cos 30° = 0.$$

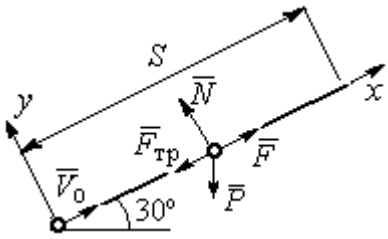


Рис. 7.27. Расчётная схема к упражнению 4.1

$$F_{\text{тр}} = fN = fmg\cos 30°;$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{2}kt - 3{,}4, \quad \dot{x} = \frac{1}{4}kt^2 - 3{,}4t + V_0;$$

$$x = \frac{1}{12}kt^3 - 1{,}7t^2 + V_0 t.$$

Конечные условия: $t = 2$ с; $x = S = 2$ м; $V = 2V_0$.

$$V_0 = k - 6{,}8; \quad 1 = \frac{1}{3}k - 3{,}4 + V_0.$$

$$k = 8{,}4; \; V_0 = 1{,}6 \text{ м/с}.$$

4.2

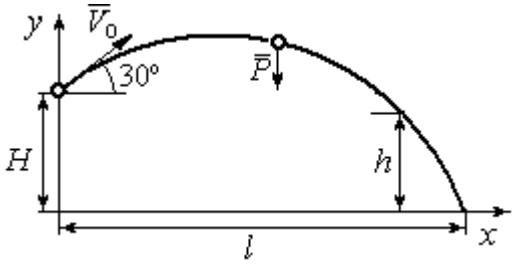


Рис. 7.28. Расчётная схема к упражнению 4.2

Уравнения движения точки:

$$m\ddot{x} = 0; \; \dot{x} = V_0\cos 30°; \; x = V_0 t\cos 30°.$$

$$m\ddot{y} = -P; \dot{y} = -gt + V_0\cos 60°;$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0 t\cos 60° + H.$$

Краевое условие пролёта высоты h:

$$t = 1 \text{ с}; \; y = h = 7 \text{ м}.$$

Подставляя краевые условия в уравнение движения, находим: $V_0 = 3{,}81$ м/с.

Краевое условие падения точки:

$$t = t_{\text{пад}}; \; x = l; \; y = 0.$$

Подстановка в уравнения движения условия приводит к системе:

$$l = V_0 t_{\text{пад}}\cos 30°; \; 0 = -\frac{1}{2}gt_{\text{пад}}^2 + V_0 t_{\text{пад}}\cos 60° + H.$$

Находим: $t_{\text{пад}} = 1{,}64$ с; $l = 5{,}41$ м.

4.3

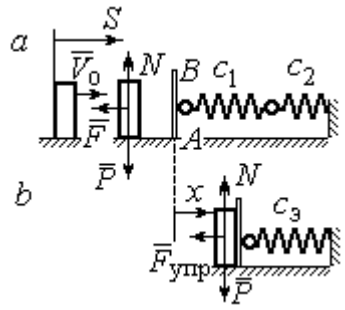


Рис. 7.29. Расчётная схема к упражнению 4.3: *a* – движение груза до начала колебаний; *b* – колебания груза

Уравнение движения груза (рис. 7.29, *a*):

$$m\ddot{S} = -F = -k\dot{S}.$$

Начальные условия: $t = 0;\ S = 0;\ \dot{S} = V_0$.

Решение: $S = \dfrac{mV_0}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) = 6\left(1 - e^{-t}\right)$ м.

Скорость груза: $\dot{S} = 6e^{-t}$.

Скорость груза в момент соединения с площадкой AB: $V_1 = \dot{S}(1) = 0{,}21$ м/с.

Уравнение колебаний груза на эквивалентной пружине (рис. 7.29, *b*):

$$m\ddot{x} = -F_{\text{упр}} = -c_э x;\ c_э = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} = 30 \text{ Н/м}.$$

Начальные условия движения: $t = 0;\ x = 0;\ \dot{x} = V_1$.

Общий вид решения: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t;\ \omega = \sqrt{\dfrac{c_э}{m}} = 7{,}75$ рад/с,

где константы: $C_1 = 0;\ C_2 = \dfrac{V_1}{\omega} = 0{,}28$ м. Закон движения груза $x = 0{,}28\sin 7{,}75t$.

Максимальное сжатие 0,28 м.

4.4

Жесткость эквивалентной пружины

$$c_э = \frac{c \cdot 2c}{c + 2c} = \frac{2}{3}c.$$

Уравнение колебаний:

$$m\ddot{x} = P - F_{\text{упр}} = P - c_э(\lambda_{\text{ст}} + x) = -c_э x.$$

Общее решение:

$$x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t;\ \omega = \sqrt{\frac{c_э}{m}} = 10{,}33 \text{ рад/с}.$$

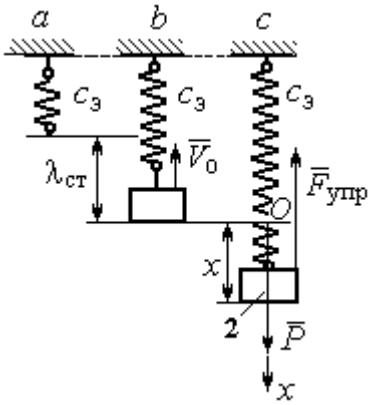


Рис. 7.30. Расчётная схема к упражнению 4.4: *a* – нерастянутая пружина; *b* – положение статического равновесия; *c* – произвольное положение груза

Начальные условия: $t = 0;\ x = 0;\ \dot{x} = -V_0$.

Находим константы интегрирования: $C_1 = 0;\ C_2 = \dfrac{V_0}{\omega} = 0{,}39$ м.

Закон движения груза: $x = 0{,}39\sin 10{,}33t$.

Амплитуда $A = 0{,}39$ м, частота $\omega = 10{,}33$ рад/с.

4.5

Скорость человека, находящегося в самолёте, в нижней точке траектории (точка C):

$$\frac{mV_C^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = mg\left[l\sin\varphi + r(1-\cos\varphi)\right].$$

Откуда $V_C^2 = V_0^2 + 2g\left[l\sin\varphi + r(1-\cos\varphi)\right]$.

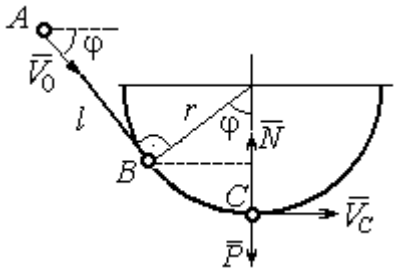


Рис. 7.31. Расчётная схема к упражнению 4.5

Уравнение движения человека, двигающегося вместе с самолётом, в проекции на нормаль в точке C: $\dfrac{mV_C^2}{r} = N - P$, где N – реакция корпуса самолёта. Сила давления человека на корпус самолёта по величине равна реакции, но направлена в противоположную сторону.

Из условия $N \le 3P$ следует неравенство: $V_C^2 \le 2gr$, или

$$V_0^2 + 2g\left[l\sin\varphi + r(1-\cos\varphi)\right] \le 2gr.$$ Откуда $r \ge \dfrac{V_0^2 + 2gl\sin\varphi}{2g\cos\varphi}$.

4.6

Из уравнения теоремы об изменении кинетической энергии шарика в точке B с учётом, что $V_A = 0$, найдём:

$$\frac{mV_B^2}{2} = \frac{ca^2}{2} + mg\left[R + R\cos 60° - a\cos 30°\right].$$

Составим уравнение теоремы об изменении кинетической энергии точки на участке BD:

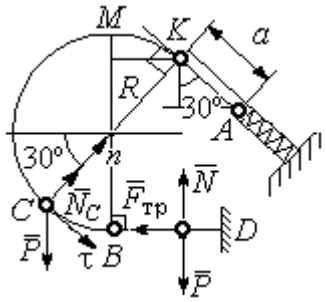


Рис. 7.32. Расчётная схема к упражнению 4.6

$-\frac{mV_B^2}{2} = -fNs$, где s – путь точки до остановки. С учётом данных задачи, получим: s = 5,39 м.

Уравнение движения шарика в проекции на нормальную ось в точке C

$$\frac{mV_C^2}{R} = N_C - P\cos 60°.$$

Для вычисления реакции опоры шарика на трубу имеем равенство $N_C = \frac{mV_C^2}{R} + P\cos 60° = \frac{1}{R}\left[mV_B^2 - 2mgR(1-\cos 60°)\right] + mg\cos 60°$, где кинетическая энергия шарика в точке B: $mV_B^2 = ca^2 + 2mgR\left[(1+\cos 60°) - \frac{a}{R}\cos 30°\right]$. Получим: $N_C = 18{,}71$ Н. Давление шарика на трубку равно реакции опоры и направлено в противоположную сторону.

7.5. Ответы к упражнениям главы 5

5.1

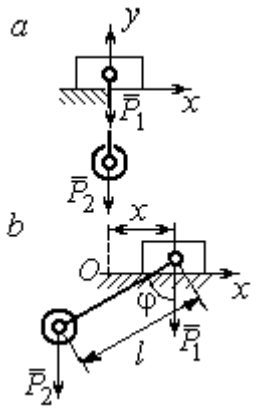


Рис. 7.33. Расчётная схема к упражнению 5.1:
a – начальное положение системы;
b – произвольное положение

x_0 – координата центра тяжести системы в начальном положении, x_0 = 0 (см. рис.7.33); x – текущая координата центра тележки; x_1 – координата центра тяжести системы в её произвольном положении: $x_1 = \frac{m_1 x - m_2(l\sin\varphi - x)}{m_1 + m_2}$.

Уравнение закона сохранения движения центра масс системы: $x_1 = x_0$, или

$$m_1 x - m_2(l\sin\varphi - x) = 0.$$

Отсюда зависимость координаты движения тележки от положения груза 2: $x = \frac{m_2 l}{m_1 + m_2}\sin\varphi$.

5.2

Теорема об изменении кинетического момента системы относительно оси z: $\dfrac{dL_z}{dt} = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$.

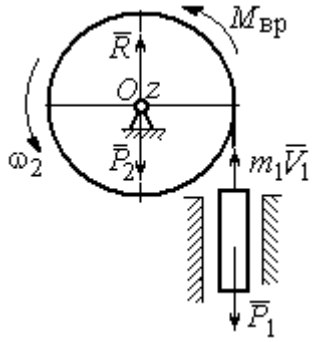


Рис. 7.34. Расчётная схема к упражнению 5.2

Кинетический момент системы:

$$L_z = L_z^{\text{бар}} + L_z^{\text{гр}} = \frac{m_2 r^2}{2}\omega + m_1 V_1 r = \left(m_1 + \frac{m_2}{2}\right)\omega r^2.$$

Суммарный момент внешних сил относительно оси z: $\sum M_z(\vec{F}_k^e) = M_{\text{вр}} - P_1 r = kt - m_1 g r$.

Дифференциальное уравнение вращения барабана:

$$\left(m_1 + \frac{m_2}{2}\right) r^2 \frac{d\omega}{dt} = kt - m_1 g r.$$

При нулевых начальных условиях $\omega = \dfrac{kt^2 - 2m_1 grt}{(2m_1 + m_2)r^2}$.

5.3

Уравнение теоремы об изменении кинетической энергии для неизменяемых систем на конечном перемещении: $T - T_0 = \sum A(F_k)$, $T_0 = 0$.

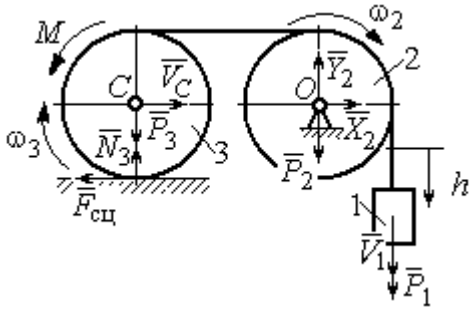


Рис. 7.35. Расчётная схема к упражнению 5.3

Кинетическая энергия груза 1: $T_1 = \dfrac{m_1 V_1^2}{2}$. Энергия вращательного движения блока 2: $T_2 = \dfrac{1}{2} J_O \omega_2^2$, где осевой момент инерции блока: $J_O = \dfrac{m_2 r^2}{2}$, угловая скорость блока $\omega_2 = \dfrac{V_1}{r}$. Кинетическая энергия катка 3: $T_3 = \dfrac{1}{2} m_3 V_C^2 + \dfrac{1}{2} J_C \omega_3^2$, где момент инерции катка относительно оси, проходя-

щей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_C = \frac{m_3 r^2}{2}$, угловая скорость катка и скорость его центра масс $\omega_3 = \frac{V_1}{2r}$, $V_C = \frac{V_1}{2}$.

Энергия системы: $T = T_1 + T_2 + T_3 = (8m_1 + 4m_2 + 3m_3)\frac{V_1^2}{16}$.

Суммарная работа вешних сил на перемещении h: $\sum A(F_k) = P_1 h - M\frac{h}{2r}$.

Уравнение теоремы об изменении кинетической энергии:

$$(8m_1 + 4m_2 + 3m_3)\frac{V_1^2}{16} = \left(m_1 g - \frac{M}{2r}\right)h.$$

Скорость груза на высоте h: $V_1 = 4\sqrt{\frac{\left(m_1 g - \frac{M}{2r}\right)h}{8m_1 + 4m_2 + 3m_3}}$.

5.4

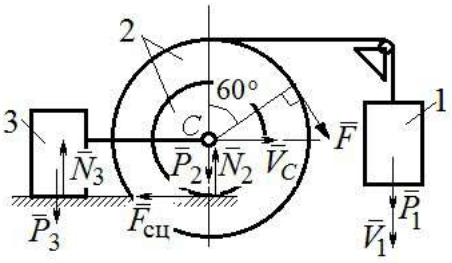


Рис. 7.36. Расчётная схема к упражнению 5.4

Для решения задачи используется теорема об изменении кинетической энергии в дифференциальной форме: $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e)$, где T – энергия системы в её текущем положении; $\sum N(\vec{F}_k^e)$ – суммарная мощность внешних сил.

Допустим, груз 1 движется вниз со скоростью V_1. Скорость центра масс катка V_C.

Кинетическая энергия катка 2: $T_2 = \frac{1}{2}m_2 V_C^2 + \frac{1}{2}J_{zC}\omega_2^2$. Здесь $m_2 = \frac{2P}{g}$, $J_{zC} = m_2 i_z^2$, $\omega_2 = \frac{V_C}{r}$. В результате кинетическая энергия катка $T_2 = \frac{3P}{g}V_C^2$.

Скорость груза 3 $V_3 = V_C$. Кинетическая энергия груза 3 $T_3 = \frac{P}{g}V_C^2$.

Скорость груза 1 $V_1 = \omega_2 3r = 3V_C$. Кинетическая энергия груза 1: $T_1 = \dfrac{9P}{2g}V_C^2$.

Суммарная кинетическая энергия (энергия системы): $T = T_1 + T_2 + T_3 = \dfrac{17P}{2g}V_C^2$. Производная $\dfrac{dT}{dt} = \dfrac{17P}{g}V_C\dfrac{dV_C}{dt} = \dfrac{17}{g}V_C a_C$.

Мощности сил $\vec{P}_2$, $\vec{N}_2$, $\vec{F}_{\text{сц}}$, $\vec{P}_3$, $\vec{N}_3$ равны нулю.

Мощность силы $\vec{F}$, приложенной к колесу, определяется по формуле: $N(\vec{F}) = \vec{F}\cdot\vec{V}_C + \vec{M}_C(\vec{F})\cdot\vec{\omega}_2 = FV_C\cos 60° + FR\omega_2$. Мощность силы $\vec{P}_1$ $N(\vec{P}_1) = P_1V_1$. Суммарная мощность внешних сил: $\sum N(F^e) = 7PV_C$.

Составляем уравнение теоремы об изменении кинетической энергии системы: $\dfrac{17P}{g}V_C a_C = 7PV_C$, откуда $a_C = \dfrac{7}{17}g$ м/с^2.

5.5

Рассмотрим движение катков отдельно, заменив невесомый стержень реакцией. Предположим, катки движутся направо (см. рис. 7.37). Уравнения движения катков:

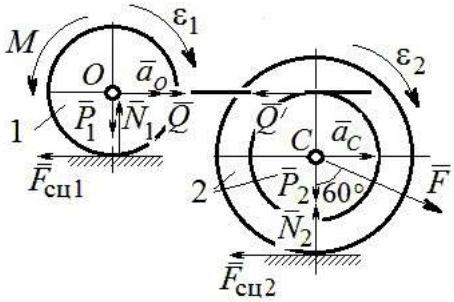


Рис. 7.37. Расчётная схема к упражнению 5.5

$$m_1 a_O = Q - F_{\text{сц1}},\ J_{1O}\varepsilon_1 = F_{\text{сц1}}r - M;$$

$$m_2 a_C = -Q' - F_{\text{сц2}} + F\cos 30°;$$

$$J_{2C}\varepsilon_2 = F_{\text{сц2}}3r - Q'r.$$

Здесь $\vec{Q}$ – реакция невесомого стержня, $|\vec{Q}| = |\vec{Q}'|$; $\vec{F}_{\text{сц1}}$, $\vec{F}_{\text{сц2}}$ – силы сцепления катков с поверхностями качения; моменты инерции катков $J_{1O} = \dfrac{m_1 r^2}{2}$, $J_{2C} = m_2 i_2^2$. Подставляя кинематические соотношения $\varepsilon_2 = \dfrac{a_C}{3r}$; $a_O = \dfrac{4}{3}a_C$; $\varepsilon_1 = \dfrac{4a_C}{3r}$, с учётом данных задачи, получим систему уравнений:

$$\frac{4P}{3g}a_C = Q - F_{сц1};\ \ \frac{2P}{3g}a_C = F_{сц1} - 4P;$$

$$\frac{2P}{g}a_C = -Q - F_{сц2} + P\sqrt{3};\ \ \frac{4P}{3g}a_C = 3F_{сц2} - Q.$$

Находим ускорение центра катка 2: $a_C = \dfrac{3\left(3\sqrt{3}-16\right)g}{46} \approx -\ 0{,}7g$. Каток движется в противоположную сторону. Реакция стержня $Q = 2{,}6P$.

5.6

Выделяем звенья механизма, заменяя действия нитей их реакциями. Допустим, направления движений тел в системе соответствуют подъёму груза 1.

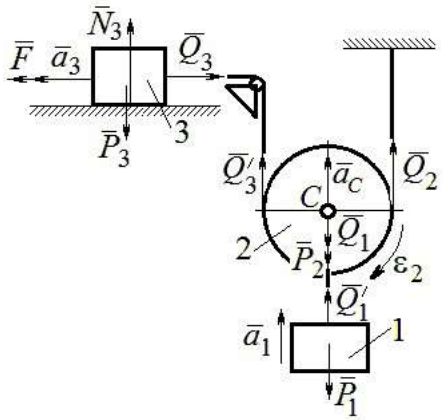


Рис. 7.38. Расчётная схема к упражнению 5.6

Уравнения движения тел:

$$m_3a_3 = F - Q_3,\ m_2a_C = Q_3' + Q_2 - P_2 - Q_1;$$

$$J_{2C}\varepsilon_2 = Q_3'r - Q_2r,\ m_1a_1 = Q_1' - P_1.$$

С учётом, что $\left|\vec{Q}_3\right| = \left|\vec{Q}_3'\right|$, $\left|\vec{Q}_1\right| = \left|\vec{Q}_1'\right|$ и $a_C = a_1$, $a_3 = 2a_1$, $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{r}$, $J_{2C} = \dfrac{m_2r^2}{2}$, подставляя данные задачи, получим систему уравнений:

$$2ma_1 = 2{,}5mg - Q_3;\ \ ma_1 = Q_3 + Q_2 - mg - Q_1;$$

$$\frac{ma_1}{2} = Q_3 - Q_2;\ m_1a_1 = Q_1 - P_1.$$

Решая систему, находим: $a_1 = \dfrac{2}{17}g \approx 0{,}12g$; $Q_3 = 2{,}26mg$; $Q_2 = 2{,}15mg$.

5.7

Заменяем действия нитей реакциями. Предположим, груз 1 спускается по наклонной плоскости. Уравнения движения тел:

$$m_1a_1 = P_1\cos 30° - Q_1;\ \ m_3a_3 = Q_3;$$

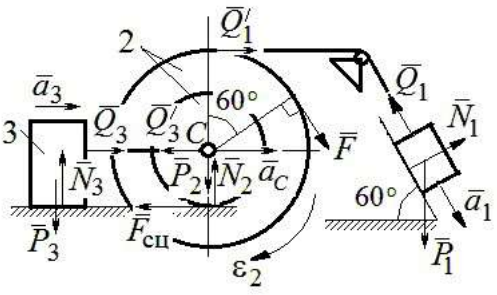


Рис. 7.39. Расчётная схема к упражнению 5.7

$$m_2 a_C = Q_1' - Q_3' - F_{\text{сц}} + F\cos 60^\circ;\ J_{2C}\varepsilon_2 = Q_1' R + FR + F_{\text{сц}} r,\ J_{2C} = m_2 i_2^2.$$

Соотношения ускорений: $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{R+r}$, $a_C = \dfrac{a_1 r}{R+r}$, $a_3 = a_C$. Подставляя данные задачи, с учётом, что модули сил $Q_1' = Q_1$ и $Q_3' = Q_3$, получим систему уравнений:

$$ma_1 = mg\frac{\sqrt{3}}{2} - Q_1;\ \frac{2}{3}ma_1 = Q_3;$$

$$ma_1 = Q_1 - Q_3 - F_{\text{сц}} + \frac{1}{2}mg;\ 3ma_1 = 2Q_1 + 2mg + F_{\text{сц}}.$$

Находим $a_1 = \dfrac{3}{46}\left(5+3\sqrt{3}\right)g \approx 0{,}44g;\ Q_1 = 0{,}21mg;\ Q_3 = 0{,}44mg$.

7.6. Ответы к упражнениям главы 6

6.1

Внешние силы, действующие на систему: силы тяжести – $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и реакции опор $\vec{N}_3$, $\vec{R}_3$ Приложим к телам системы, силы инерции $\vec{R}_1^{\text{ин}}$, $\vec{R}_2^{\text{ин}}$ (рис. 7.40, *a*). В соответствии с принципом Даламбера, полученная система сил находится в равновесии. Составляем условие равновесия системы сил в проекциях на горизонтальную и вертикальную оси:

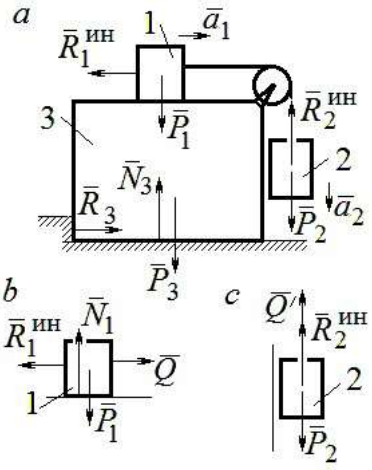


Рис. 7.40. Расчётная схема к упражнению 6.1

$$R_3 - R_1^{\text{ин}} = 0,\ N_3 - P_3 - P_1 - P_2 + R_2^{\text{ин}} = 0.$$

Для вычисления сил инерции рассмотрим отдельно грузы 1 и 2, заменяя действие соединяющей их нити реакцией (рис. 7.40, *b*, *c*). Присоединим к грузам силы инерции и, применив принцип Даламбера, составим уравнения равновесия систем сил - для груза 1 в проекции на горизонтальную ось, для груза 2 – на вертикальную:

$$Q - R_1^{\text{ин}} = 0;\ P_2 - Q' - R_2^{\text{ин}} = 0,$$

где $R_1^{\text{ин}} = m_1 a_1$, $R_2^{\text{ин}} = m_2 a_2$.

Решая полученную систему с учётом равенства модулей сил $Q = Q'$ и ускорений грузов $a_1 = a_2$, находим ускорение грузов: $a_1 = a_2 = 0{,}5g$. Тогда давление призмы на горизонтальную поверхность: $N_3 = 2{,}5mg$.

6.2

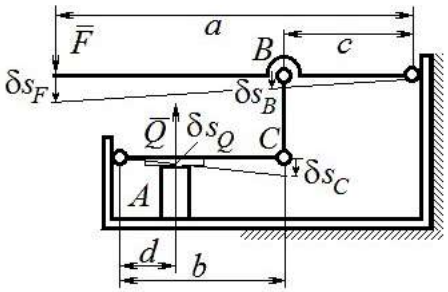


Рис. 7.41. Расчётная схема к упражнению 6.2

Активными силами в системе являются силы $\vec{F}$ и $\vec{Q}$. Для равновесия системы необходимо и достаточно выполнения условия: $\delta A(\vec{F}) + \delta A(\vec{Q}) = 0$ или $F\delta s_F - Q\delta s_Q = 0$, где δs_F и δs_Q – возможные перемещения точек приложения сил $\vec{F}$ и $\vec{Q}$.

Имеем соотношения: $\dfrac{\delta s_F}{\delta s_B} = \dfrac{a}{c}$, $\dfrac{\delta s_C}{\delta s_Q} = \dfrac{b}{d}$, где δs_B и δs_C – возможные перемещения точек B и C, причём $\delta s_B = \delta s_C$. Тогда $\delta s_Q = \dfrac{cd}{ab}\delta s_F$ и сила, сжимающая деталь A под прессом, равна $Q = \dfrac{ab}{cd}F$.

6.3

Активными силами, совершающими работу при движении системы, являются силы тяжести $\vec{P}_3$, $\vec{P}_4$ и пары сил с моментами M_1 и M_2. Связи идеальные.

Для равновесия системы необходимо и достаточно выполнения условия:

$$\delta A(\vec{P}_3) + \delta A(\vec{P}_4) + \delta A(M_1) + \delta A(M_2) = 0 \text{ или}$$

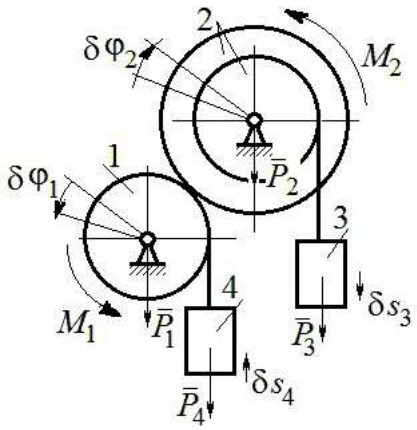


Рис. 7.42. Расчётная схема к упражнению 6.3

$$P_3\delta s_3 - P_4\delta s_4 + M_1\delta\varphi_1 - M_2\delta\varphi_2 = 0,$$

где $\delta s_3, \delta s_4$ – элементарные перемещения грузов 3, 4; $\delta\varphi_1, \delta\varphi_2$ – элементарные повороты валов 1 и 2. Выразим все перемещения через угол поворота вала 2: $\delta s_3 = \delta\varphi_2 r$, $\delta\varphi_1 = 3\delta\varphi_2$, $\delta s_4 = 3r\delta\varphi_2$ и подставим в уравнение равновесия. Получим: $M_2 = 4Pr$.

6.4

Система с идеальными связями. Активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$ и пара сил с моментом $M_{\text{вр}}$ (рис. 7.43).

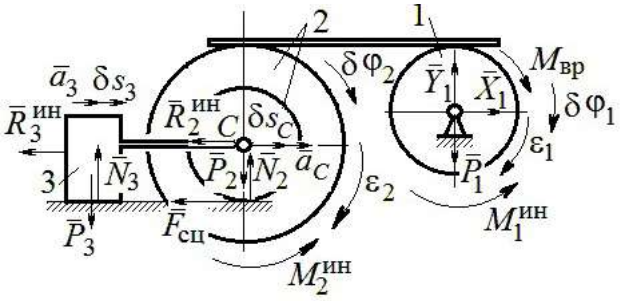


Рис. 7.43. Расчётная схема к упражнению 6.4

Направления поворотов дисков и их угловые ускорения показаны на рис. 7.43 дуговыми стрелками $\delta\varphi_1, \varepsilon_1$ и $\delta\varphi_2, \varepsilon_2$. Направления движения центра масс катка 2, груза 3 и их ускорения обозначены: $\delta s_C, a_C$ и $\delta s_3, a_3$.

Кинематические соотношения между перемещениями и ускорениями:

$$\delta s_C = \delta s_3,\ a_C = a_3,\ \delta\varphi_2 = \frac{\delta s_3}{r},\ \varepsilon_2 = \frac{a_3}{r},\ \delta\varphi_1 = \frac{3\delta s_3}{r},\ \varepsilon_1 = \frac{3a_3}{r}.$$

Присоединим к телам системы силы инерции.

Модули главных векторов сил инерции: $R_3^{\text{ин}} = m_3 a_3 = ma_3$;

$$R_2^{\text{ин}} = m_2 a_C = 2ma_3;\ M_2^{\text{ин}} = m_2 i_2^2 \varepsilon_2 = 4{,}5mra_3;\ M_1^{\text{ин}} = \frac{m_1 R_1^2}{2}\varepsilon_1 = 1{,}5mra_3.$$

Элементарные работы активных сил:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = M_{\text{вр}}\delta\varphi_1 = (mg\sin\omega t)3\delta s_3.$$

Элементарные работы сил инерции:

$$\sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = -R_3^{\text{ин}}\delta s_3 - R_2^{\text{ин}}\delta s_C - M_2^{\text{ин}}\delta\varphi_2 - M_1^{\text{ин}}\delta\varphi_1 =$$

$$= -ma_3\delta s_3 - 2ma_3\delta s_3 - 4{,}5ma_3\delta s_3 - 1{,}5ma_3 3\delta s_3 = -12ma_3\delta s_3.$$

Общее уравнение динамики имеет вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = m(3g\sin\omega t - 12a_3)\delta s_3 = 0.$$

Ускорение груза 3: $a_3 = 0{,}25g\sin\omega t$, или $\ddot{s}_3 = 0{,}25g\sin\omega t$. Интегрируя дифференциальное уравнение с нулевыми начальными условиями, получим закон движения груза: $s_3 = \dfrac{0{,}25g}{\omega}\left(t - \dfrac{1}{\omega}\sin\omega t\right)$.

6.5

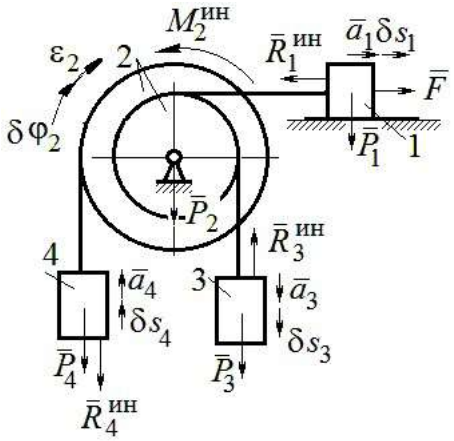


Рис. 7.44. Расчётная схема к упражнению 6.5

Система с идеальными связями. Активные силы и главные вектора сил инерции показаны на рис. 7.44.

Элементарные работы активных сил: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = F\delta s_1 + P_3\delta s_3 - P_4\delta s_4$ и сил инерции $\sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = -R_1^{\text{ин}}\delta s_1 - R_3^{\text{ин}}\delta s_3 - R_4^{\text{ин}}\delta s_4 - M_2^{\text{ин}}\delta\varphi_2$, где модули сил инерции: $R_1^{\text{ин}} = \dfrac{P_1}{g}a_1$, $R_3^{\text{ин}} = \dfrac{P_3}{g}a_3$, $R_4^{\text{ин}} = \dfrac{P_1}{g}a_4$, $M_2^{\text{ин}} = \dfrac{P_2}{g}i_2^2\varepsilon_2$.

Кинематические соотношения: $\delta s_3 = \delta s_1$, $a_3 = a_1$, $\delta s_4 = 2\delta s_1$, $a_4 = 2a_1$, $\delta\varphi_2 = \dfrac{\delta s_1}{r}$, $\varepsilon_2 = \dfrac{a_1}{r}$. Общее уравнение динамики:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{ин}}) = P(t+1)\delta s_1 + P\delta s_1 - 2P\delta s_1 -$$

$$-\left(\frac{P}{g}a_1\delta s_1 + \frac{P}{g}a_1\delta s_1 + \frac{2P}{g}2a_1 2\delta s_1 + \frac{2P}{g}2r^2\frac{a_1}{r}\frac{\delta s_1}{r}\right) = P\left(t - \frac{14a_1}{g}\right)\delta s_1 = 0.$$

Находим уравнение движения груза 3: $a_3 = a_1 = \dfrac{1}{14}gt$, или $\ddot{x}_3 = \dfrac{1}{14}gt$.

Проинтегрировав дифференциальное уравнение с нулевыми начальными условиями, получим закон движения груза 3: $x_3 = \dfrac{1}{84}gt^3 \approx 0{,}012gt^3$.

6.6

Рассматриваемая механическая система (рис. 7.45) имеет одну степень свободы. Уравнение Лагранжа: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right)-\frac{\partial T}{\partial x}=Q_x$, где T – кинетическая энергия системы: Q_x – обобщенная сила.

В качестве обобщённой координаты x выберем положение точки C относительно недеформированной пружины, отмеченной на рис. 7.45 величиной l_0. Обобщённая скорость $\dot{x}$.

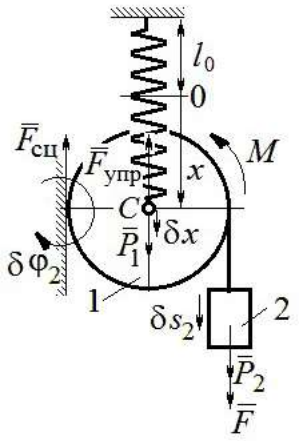


Рис. 7.45. Расчётная схема к упражнению 6.6

Кинетическая энергия катка: $T_1=\frac{1}{2}m_1V_C^2+\frac{1}{2}J_{zC}\omega_1^2$, где ω_1, V_C – угловая скорость катка и скорость его центра масс, $V_C=\dot{x}$, $\omega_1=\frac{V_C}{r}=\frac{\dot{x}}{r}$; момент инерции $J_{zC}=\frac{1}{2}m_1r^2$. Кинетическая энергия груза 2: $T_2=\frac{1}{2}m_2V_2^2$, где V_2 – скорость груза 2, $V_2=2V_C=2\dot{x}$. Кинетическая энергия системы, выраженная через обобщённую скорость: $T=T_1+T_2=\frac{7P}{2g}\dot{x}^2$.

В произвольном положении системы, определяемом координатой x, дадим центру масс катка возможное перемещение δx (см. рис. 7.45). Элементарная работа активных сил $\sum\delta A(F_{\text{к}})=P_1\delta x-F_{\text{упр}}\delta x+(P_2+F)\delta s_2-M\delta\varphi_1$. Полагая перемещения $\delta s_2=2\delta x$, $\delta\varphi_1=\frac{\delta x}{r}$, модуль силы упругости $F_{\text{упр}}=cx$ и с учётом данных задачи, получим $\sum\delta A(F_{\text{к}})=(3P-cx)\delta x$. Обобщённая сила $Q_x=3P-cx$.

Уравнение Лагранжа $\frac{7P}{g}\ddot{x}=3P-cx$, или $\ddot{x}+\frac{4g}{7r}x=\frac{3g}{7}$.

Решение уравнения (с нулевыми начальными условиями): $x = \frac{3}{4} r\left(1 - \cos\omega t\right)$. Закон движения груза: $s_2 = 2x = \frac{3}{2} r\left(1 - \cos\omega t\right)$.

6.7

Рассматриваемая система имеет две степени свободы. Обобщённые координаты – расстояния x_1, x_2 соответственно до грузов 1 и 2, отсчитываемые от неподвижных центров блоков *B* и *D* (рис. 7.46, *a*). Обобщённые скорости $\dot{x}_1$, $\dot{x}_2$. Кинетическая энергия грузов и блока 3:

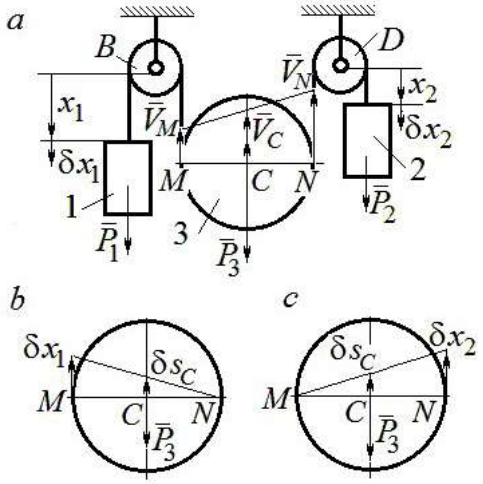


Рис. 7.46. Расчётная схема к упражнению 6.7:
a – кинематика механизма;
b, *c* – возможные перемещения блока 3 при вычислении обобщённых сил

$$T_1 = \frac{P_1 \dot{x}_1^2}{2g},\ T_2 = \frac{P_2 \dot{x}_2^2}{2g};$$

$$T_3 = \frac{P_3}{2g}\left(\frac{\dot{x}_1 + \dot{x}_2}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}\frac{P_3 r^2}{2g}\left(\frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{2r}\right)^2.$$

Здесь учтено (см. рис. 7.46, *a*): что

$$V_C = \frac{V_N + V_M}{2} = \frac{\dot{x}_2 + \dot{x}_1}{2};$$

$$\omega_2 = \frac{V_N - V_M}{2r} = \frac{\dot{x}_2 - \dot{x}_1}{2r}.$$

Дадим системе возможное перемещение по координате x_1, оставляя координату x_2 постоянной: $\delta x_1 \neq 0$, $\delta x_2 = 0$. На этом перемещении сумма элементарных работ внешних сил (см. рис. 7.46, *a*, *b*):

$$\sum \delta A(F_к) = P_1 \delta x_1 - P_3 \delta s_C = \left(P_1 - \frac{1}{2} P_3\right)\delta x_1.$$

Обобщённая сила $Q_{x_1} = P_1 - \frac{1}{2} P_3$.

Дадим системе другое независимое возможное перемещение – по координате x_2, так, что $\delta x_1 = 0$, $\delta x_2 \neq 0$. При этом перемещении сумма элементарных работ внешних сил (см. рис. 7.46, *a*, *c*):

$$\sum \delta A(F_{\text{к}}) = P_2 \delta x_2 - P_3 \delta s_C = \left(P_2 - \frac{1}{2} P_3 \right) \delta x_2 .$$

Обобщённая сила $Q_{x_2} = P_2 - \frac{1}{2} P_3$.

Уравнения Лагранжа

$$\left(P_1 + \frac{3}{8} P_3 \right) \frac{\ddot{x}_1}{g} + \frac{1}{8} P_3 \frac{\ddot{x}_2}{g} = P_1 - \frac{1}{2} P_3 , \quad \frac{1}{8} P_3 \frac{\ddot{x}_1}{g} + \left(P_2 + \frac{3}{8} P_3 \right) \frac{\ddot{x}_2}{g} = P_2 - \frac{1}{2} P_3 \text{ или}$$

$$7\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2 = 0 , \; \ddot{x}_1 + 9\ddot{x}_2 = 2g .$$

Ускорения грузов: $\ddot{x}_1 = -\frac{1}{31} g$, $\ddot{x}_2 = \frac{7}{31} g$. Ускорение центра масс блока $\ddot{x}_C = \frac{\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1}{2} = \frac{6}{31} g$. Груз 1 и центр блока 3 движутся вверх, груз 2 – вниз. (Сравнить с задачей 70.)

6.8

Система с двумя степенями свободы. Обобщённые координаты: x_1 – положение центра масс катка 1 (точки C_1) относительно неподвижной вертикальной стены; x_2 – положение центра масс катка 2 (точки C_2) относительно подвижного края платформы.

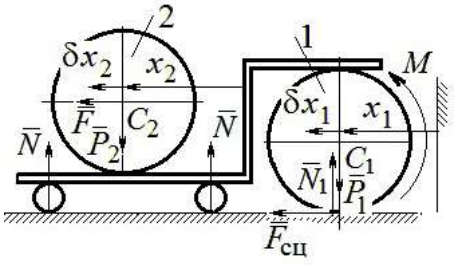


Рис. 7.47. Расчётная схема к упражнению 6.8

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{3}{4} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} \left[m_2 \left(\dot{x}_2 + 2\dot{x}_1 \right)^2 + \frac{m_2 r^2}{2} \left(\frac{\dot{x}_2}{r} \right)^2 \right] = \frac{P}{g} \left(\frac{11}{4} \dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + 2\dot{x}_1 \dot{x}_2 \right).$$

Дадим системе возможное перемещение по координате x_1 $\left(\delta x_1 \neq 0 \right)$, оставляя другую координату x_2 неизменной $\left(\delta x_2 = 0 \right)$. Работу совершают момент M и сила $\bar{F}$. Суммарная работа

$$\sum \delta A(F_{\text{к}}) = M \delta \varphi_1 + F \delta s_{C_2} = M \frac{\delta x_1}{r} + F 2 \delta x_1 = 4 P \delta x_1 .$$

Обобщённая сила $Q_{x_1} = 4P$.

При другом независимом возможном перемещении $\delta x_1 = 0$, $\delta x_2 \neq 0$ суммарная работа внешних сил $\sum \delta A(F_к) = F\delta x_2$ и обобщённая сила, соответствующая координате x_2, равна $Q_{x_2} = P$.

Уравнения Лагранжа

$$\frac{P}{g}\left(\frac{11}{2}\ddot{x}_1 + 2\ddot{x}_2\right) = 4P,\ \frac{P}{g}\left(2\ddot{x}_2 + 2\ddot{x}_1\right) = P, \text{ или}$$

$$11\ddot{x}_1 + 4\ddot{x}_2 = 8g,\ 2\ddot{x}_2 + 2\ddot{x}_1 = g$$

Ускорение центра катка 1 $\ddot{x}_1 = \frac{6}{7}g$. Тележка катится в направлении оси x_1. Ускорение центра катка 2 относительно тележки $\ddot{x}_2 = -\frac{5}{14}g$. Закон относительного движения центра катка 2 при нулевых начальных условиях: $x_2 = -\frac{5}{28}gt^2$. Каток катится к правому борту тележки.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бать М. И., *Джанелидзе Г. Ю.*, *Кельзон А. С.* Теоретическая механика в примерах и задачах: Т. 1–2.– СПб.: Лань, 2010.

Бутенин Н. В., *Лунц Я. Л.*, *Меркин Д. Р.* Курс теоретической механики: В 2-х томах.– М.: Наука, 2009.

Вебер Г. Э., *Ляпцев*, *С. А*. Лекции по теоретической механике. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008.

Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебник для втузов. – М.: Высшая школа, 2010.

Учебное издание

Валерий Григорьевич Брагин
Евгений Борисович Волков
Юрий Михайлович Казаков

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебное пособие

Редактор *Л.В. Устьянцева*

Компьютерная версия

Подписано в печать 26.10.2018 г.
Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 15,625. Уч. изд. л. 10,5. Тираж экз. Заказ №
Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Минобрнауки Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный
горный университет»

Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы студентов,
выполнению практических и контрольных работ

Екатеринбург
2020

Минобрнауки Российской Федерации
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ:
проректор по УМК

_____доц. С. А. Упоров

«___»_____2019 г.

Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы студентов,
выполнению практических и контрольных работ

Издание УГГУ Екатеринбург, 2019

В 67

Рецензент: *Н. М. Суслов*, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики от 19.12.2016 г. (протокол № 2) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета.

Волков Е. Б., Казаков Ю. М.

В67 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА: Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов, выполнению практических и контрольных работ / Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков, Уральский государственный горный университет. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. 156 с.

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов содержит краткие методические указания, контрольные задания и примеры выполнения заданий по темам: «Статика твердого тела. Равновесие произвольной плоской и пространственной систем сил», «Кинематика вращательного и плоскопараллельного движений твердого тела. Определение скоростей и ускорений точек твёрдого тела», «Сложное движение точки», «Динамика точки. Дифференциальные уравнения движения точки. Гармонические и вынужденные колебания точки. Применение теоремы об изменении кинетической энергии при исследовании движения точки», «Применение общих теорем динамики к исследованию движения механической системы», «Принципы механики. Применение общего уравнения динамики к исследованию движения механической системы», «Уравнения Лагранжа II рода».

Учебно-методическое пособие для студентов всех специальностей очной формы обучения.

© Волков Е. Б., Казаков Ю. М., 2019
©Уральский государственный горный университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА 4
1.1. Основные виды связей и их реакции 4
1.2. Моменты силы относительно центра и относительно оси. Пара сил. Момент пары 5
1.3. Условия равновесия систем сил 7
1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел 8
1.5. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил 17
2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА 26
2.1. Кинематика точки. Основные параметры движения точки 26
2.2. Вращение тела вокруг неподвижной оси 28
2.3. Плоскопараллельное движение твёрдого тела 29
2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек твердого тела при поступательном и вращательном движениях 32
2.5. Задание К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении 38
2.6. Задание К3. Определение ускорений точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении 46
3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ 57
3.1. Основные понятия сложного движения точки 57
3.2. Задание К4. Определение скорости и ускорения точки при сложном движении 60
4. ДИНАМИКА ТОЧКИ 73
4.1. Дифференциальные уравнения движения точки. 73
4.2. Задание Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки 73
4.3. Колебания материальной точки 80
4.4. Задание Д2. Исследование колебаний точки 84
4.5. Теорема об изменении кинетической энергии точки. 95
4.6. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии 96
5. ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 103
5.1. Описание движений твёрдых тел на основе общих теорем динамики системы . 103
5.2. Задание Д4. Динамический расчет механической системы 104
5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы. 112
5.4. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии 114
6. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА 124
6.1. Принципы механики. Общее уравнение динамики 124
6.2. Задание Д6. Исследование механической системы с применением общего уравнения динамики 126
6.3. Уравнения Лагранжа II рода 136
6.4. Задание Д7. Исследование механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа 137
6.5. Задание Д8. Исследование механической системы с двумя степенями свободы 145
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 155

1. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Статика представляет раздел теоретической механики, в котором изучаются условия равновесия твердых тел под действием системы сил.

1.1. Основные виды связей и их реакции

Опора тела на гладкую плоскость (поверхность) без трения. Реакция приложена в точке касания и направлена перпендикулярно к общей касательной соприкасающихся поверхностей. При опоре углом, или на угол (рис. 1.1, *a*), реакция направлена по нормали к одной из поверхностей. **Гибкая связь**. Если на тело наложена связь в виде гибкой нерастяжимой нити (каната, троса), то реакция связи $\vec{T}$, равная натяжению нити, приложена к телу и направлена вдоль нити (рис. 1.1, *b*).

Цилиндрический шарнир (подшипник) создает соединение, при котором

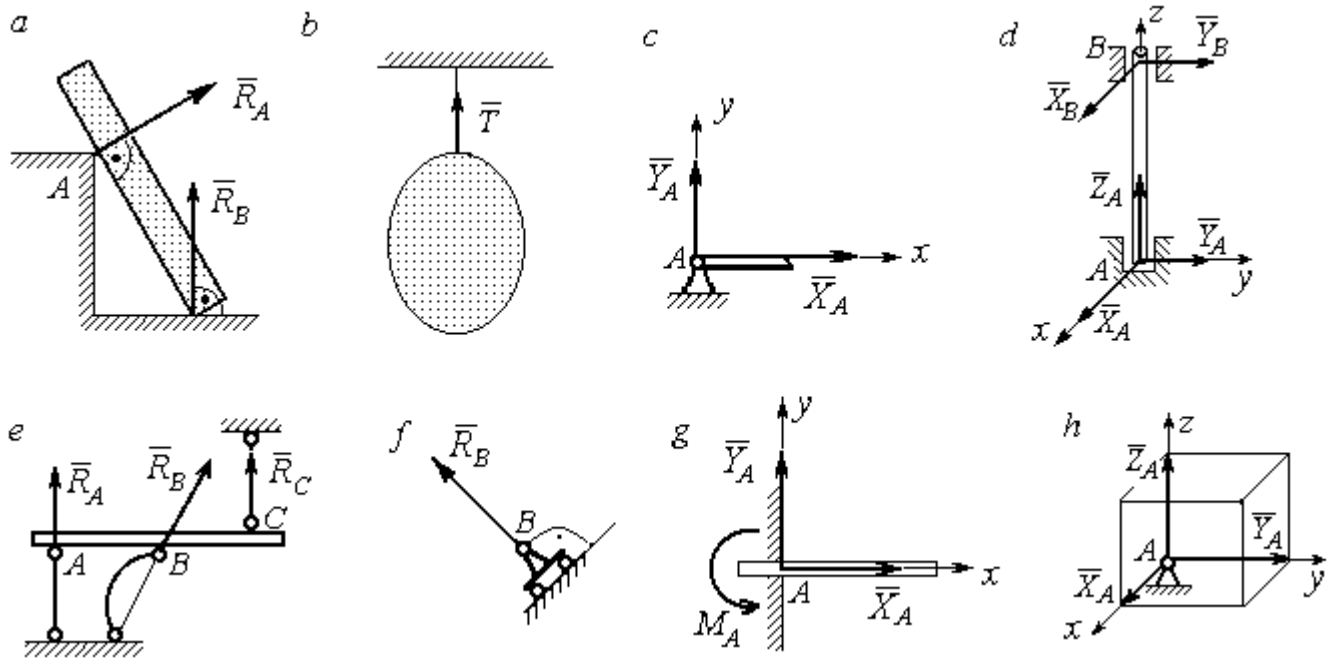


Рис. 1.1. Виды связей и их реакции:
a – реакция опоры тела на гладкую поверхность без трения; *b* – реакция связи гибкой нерастяжимой нити; *c* – реакция цилиндрического шарнира; *d* – реакция подшипника и подпятника; *e* – реакция невесомого стержня; *f* – реакция подвижной опоры; *g* – реакция жесткой заделки; *h* – реакция пространственного шарнира

одно тело может вращаться по отношению к другому. Реакция цилиндрического шарнира лежит в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач

реакцию цилиндрического шарнира $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, взятыми по направлениям координатных осей (рис. 1.1, *c*). Реакция подшипника $\vec{R}_B$ (рис. 1.1, *d*) также изображается своими составляющими $\vec{X}_B$ и $\vec{Y}_B$, взятыми по направлениям координатных осей в плоскости, перпендикулярной оси вращения подшипника. Величина реакции определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$. **Реакция прямолинейного невесомого стержня с шарнирными соединениями на краях** направлена вдоль самого стержня, а криволинейного – вдоль линии, соединяющей точки крепления стержня (рис. 1.1, *e*). **Реакция подвижной опоры** $\vec{R}_B$ (рис. 1.1, *f*) направлена по нормали к поверхности, на которую опираются катки опоры. **Жесткая заделка** (рис. 1.1, *g*) препятствует не только линейным перемещениям тела, но и повороту. Реакция заделки состоит из силы реакции $\vec{R}_A$ и пары сил с моментом M_A. При решении задач силу реакции жесткой заделки $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, взятыми по направлениям координатных осей. Модуль реакции определяется по формуле $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$. Виды связей и их реакции показаны на рис. 1.1.

1.2. Моменты силы относительно центра и относительно оси. Пара сил. Момент пары

Алгебраическим моментом силы F относительно центра O $M_O(\vec{F})$, или просто **моментом силы** $\vec{F}$ относительно центра *O*, называют взятое с соответствующим знаком произведение модуля силы $\vec{F}$ на кратчайшее расстояние *h* от центра *O* до линии действия силы: $M_O(\vec{F}) = \pm Fh$ (рис. 1.2, *a*).

Величину *h* называют **плечом силы**. Момент силы относительно центра считается положительным, если сила стремится повернуть тело вокруг центра против хода часовой стрелки, и отрицательным – в обратном случае.

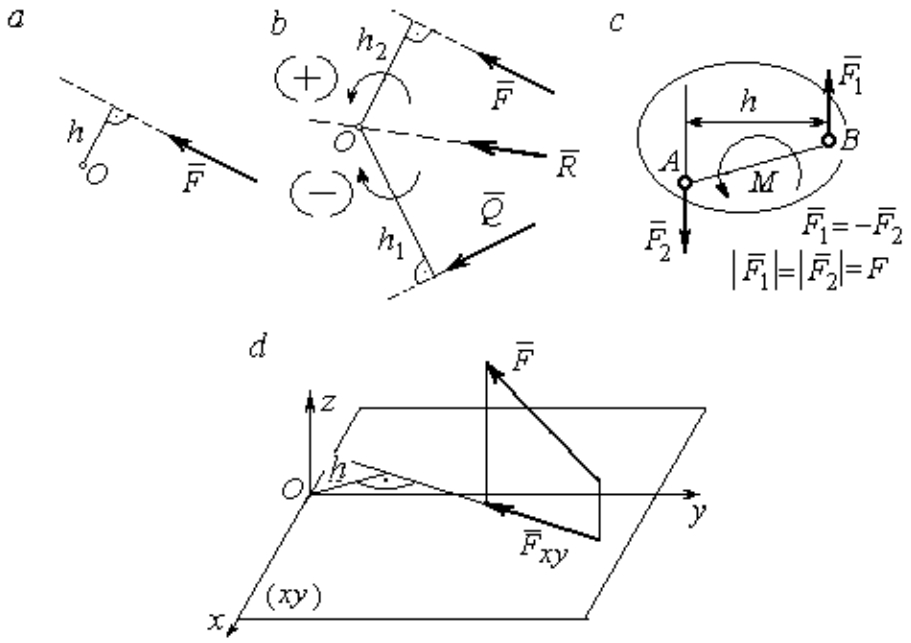


Рис. 1.2. Схемы для вычисления моментов сил:
a, *b* – момент силы относительно центра; *c* – момент пары сил;
d – момент силы относительно оси

На рис. 1.2, *b* показано, что момент силы $\vec{F}$ относительно центра *O* положительный, а момент силы $\vec{Q}$ относительно того же центра – отрицательный. Момент силы $\vec{R}$ относительно центра *O* равен нулю, так как линия действия этой силы проходит через центр *O* и плечо силы равно нулю.

Парой сил, или просто парой (рис.1.2, *c*), называют систему двух равных по модулю сил, параллельных, направленных в противоположные стороны и не лежащих на одной прямой. Алгебраическим моментом пары сил, или **моментом пары,** называют взятое со знаком плюс или минус произведение модуля одной из сил пары на плечо пары – кратчайшее расстояние между линиями действия ее сил. Правило знаков такое же, как и для момента силы. На рисунках пару часто изображают дуговой стрелкой, показывающей направление поворота твердого тела под действием пары (см. *M* на рис. 1.2, *c*).

Моментом силы относительно оси называют момент проекции этой силы на плоскость, перпендикулярную оси, относительно точки пересечения оси с этой плоскостью. На рис. 1.2, *d* показано вычисление момента силы *F* относительно

оси z: $M_z(\vec{F}) = F_{xy}h$, где F_{xy} – проекция силы $\vec{F}$ на плоскость xy, перпендикулярную оси z, h – плечо проекции F_{xy} относительно центра O – точки пересечения оси z и плоскости xOy.

1.3. Условия равновесия систем сил

Плоской системой сил называется система сил, расположенных в одной плоскости.

Основная форма условий равновесия плоской системы сил. Для равновесия плоской системы сил, приложенных к твердому телу, необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю и сумма моментов сил относительно любого центра, находящегося в плоскости действия сил, также была равна нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky}– проекции всех сил на координатные оси; $M_A(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно произвольно выбранного центра A.

Пространственной системой сил называется система сил, расположенных произвольно в пространстве.

Для **равновесия пространственной системы сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на оси прямоугольной системы координат были равны нулю и суммы моментов всех сил относительно тех же осей также были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky}, F_{kz}– проекции всех сил на координатные оси x, y, z; $M_x(\vec{F}_k)$, $M_y(\vec{F}_k)$, $M_z(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно выбранных осей.

Равновесие систем тел

Связи, соединяющие части конструкции, называют **внутренними,** в отличие от **внешних** связей, скрепляющих конструкцию с внешними телами, не входящими в данную конструкцию. Одним из способов решения задач на равновесие сил, действующих на сочленённую конструкцию с внутренними связями, является **разбиение конструкции на отдельные тела** и составление уравнений равновесия для каждого из тел, входящих в конструкцию. При этом в уравнения равновесия должны входить только силы, непосредственно приложенные к тому телу, равновесие которого рассматривается.

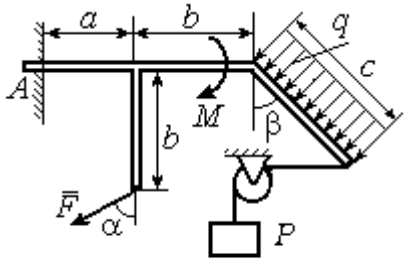
1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел

Каждый вариант задания включает две задачи по темам: «Равновесие произвольной плоской системы сил» и «Равновесие системы тел».

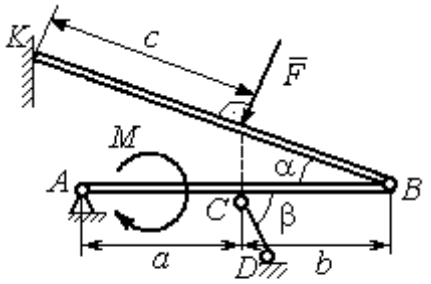
В задачах требуется определить реакции связей конструкции исходя из условия равновесия произвольной плоской системы сил. Весом стержневых подпорок, поддерживающих балочные конструкции, и блоков, через которые перекинуты невесомые нити, пренебречь.

Варианты заданий даны на рис. 1.3 – 1.6. Исходные данные приведены в табл. 1.1. Из таблицы исходных данных выбираются значения тех параметров, которые указаны на схемах.

Варианты № 1, 11, 21	
Задача 1	Задача 2



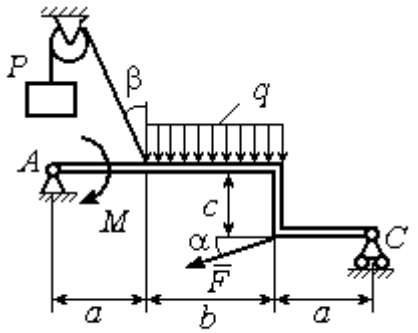
Найти реакцию жесткой заделки в точке A



Найти реакции шарниров A, B, реакцию стержня CD и реакцию опоры в точке K

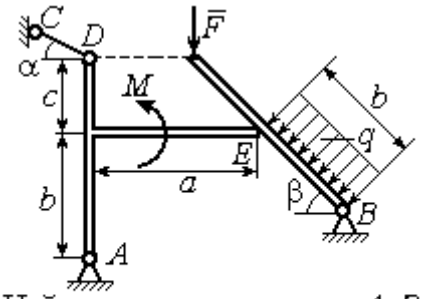
Варианты № 2, 12, 22

Задача 1



Найти реакции шарниров A и C

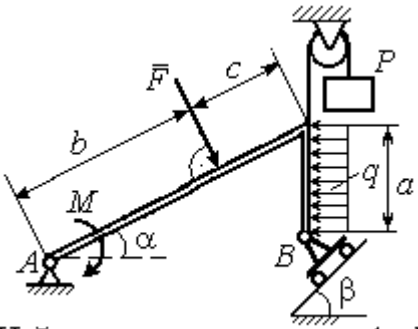
Задача 2



Найти реакции шарниров A, B, реакцию опоры в точке E и реакцию стержня CD

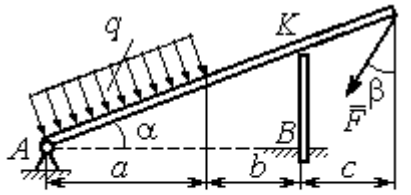
Варианты № 3, 13, 23

Задача 1



Найти реакцию шарниров A и B

Задача 2

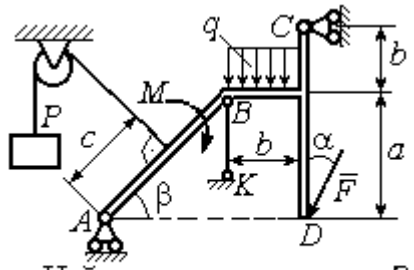


Найти реакцию шарнира A, реакцию опоры в точке K и реакцию жесткой заделки в точке B

Рис. 1.3. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

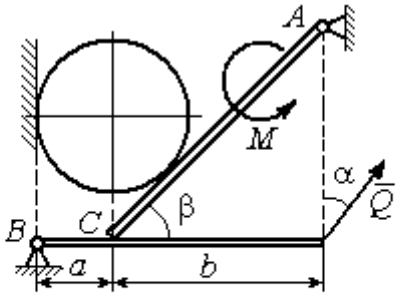
Варианты № 4, 14, 24

Задача 1



Найти усилие в стержне BK и реакцию шарниров A, C

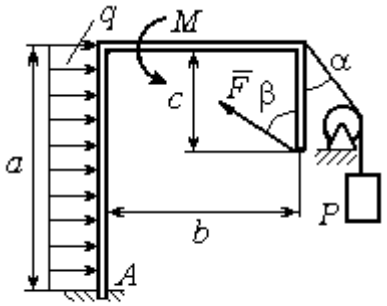
Задача 2



Вес шара P. Найти реакцию шарниров A, B, давление шара на балку и стенку, реакцию опоры балки в точке C и уравновешивающую силу Q

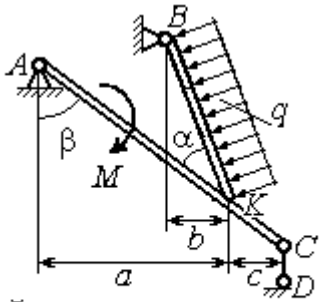
Варианты № 5, 15, 25

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

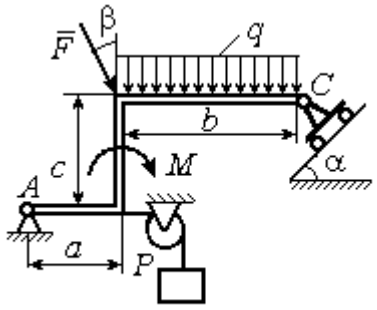
Задача 2



Найти реакцию шарниров A, B, реакцию стержня CD и реакцию опоры в точке K

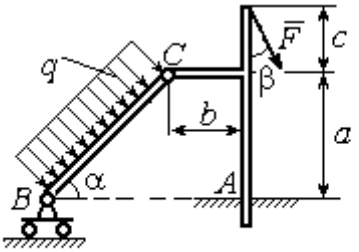
Варианты № 6, 16, 26

Задача 1



Найти реакции шарниров A и C

Задача 2

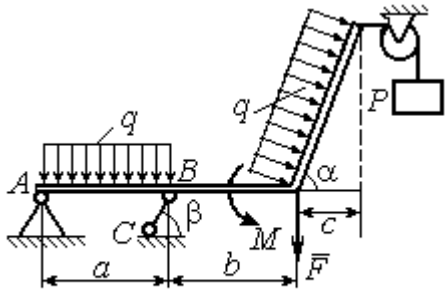


Найти реакцию жесткой заделки в точке A и реакции шарниров B и C

Рис. 1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 4 – 6, 14 – 16, 24 –26

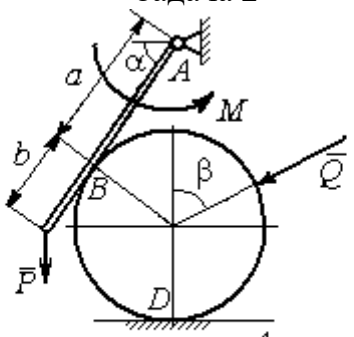
Варианты № 7, 17, 27

Задача 1



Найти реакцию стержня BC и реакцию шарнира A

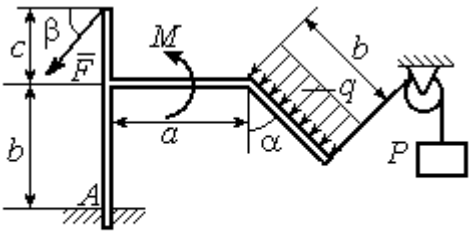
Задача 2



Найти реакцию шарнира A, давление балки на шар, реакцию опоры шара в точке D и уравновешивающую силу Q

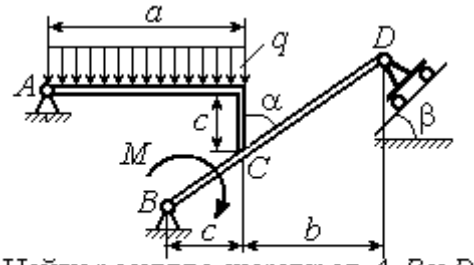
Варианты № 8, 18, 28

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

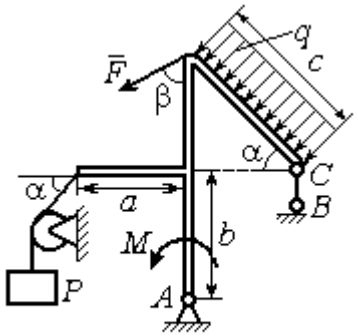
Задача 2



Найти реакцию шарниров A, B и D и реакцию опоры в точке C

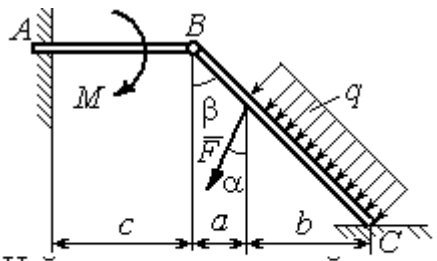
Варианты № 9, 19, 29

Задача 1



Найти реакцию стержня BC и реакцию шарнира A

Задача 2

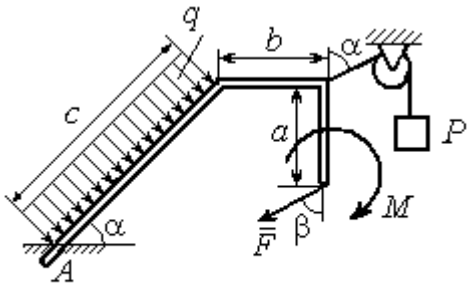


Найти реакцию жесткой заделки в точке A, реакцию шарнира B и реакцию опоры в точке C

Рис. 1.5. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

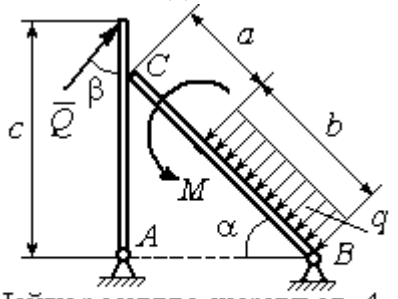
Варианты № 10, 20, 30

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

Задача 2



Найти реакцию шарниров A, B, реакцию опоры в точке C и уравновешивающую силу Q

Рис. 1.6. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 10, 20, 30

Таблица 1.1

Исходные данные задания С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел.

Номер варианта задания	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
P, кН	6	5	6	12	6	6	10	3	8	5	10	4	8	10	8
F, кН	12	6	10	5	12	8	6	5	6	2	12	8	12	6	10
q, кН/м	5	4	2	3	6	3	5	2	2	4	6	2	3	4	5
M, кН·м	12	8	6	8	12	5	12	8	4	6	8	12	10	6	10
α, град	45	60	30	60	30	30	45	60	30	30	45	30	60	45	60
β, град	60	30	45	30	60	90	60	60	30	45	30	45	30	60	30
a, м	3	4	3	4	3	4	3	4	1	2	2	3	2	3	4
b, м	3	3	4	3	2	4	3	3	2	3	3	3	4	3	2
c, м	4	2	2	2	3	2	2	1	5	4	4	2	1	2	2

Номер варианта задания	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
P, кН	10	8	10	6	4	6	12	10	5	6	8	6	8	4	6
F, кН	6	12	12	8	3	14	10	8	15	10	12	8	10	10	2
q, кН/м	5	3	4	3	2	3	2	5	4	2	3	4	5	2	4
M, кН·м	10	6	8	6	5	12	4	6	8	10	12	10	6	4	8
α, град	60	60	30	45	60	30	60	45	30	60	45	30	30	30	45
β, град	45	30	30	60	60	45	30	60	30	45	90	30	60	45	30
a, м	3	4	3	1	2	2	4	1	4	3	4	3	2	1	2
b, м	2	4	3	3	4	1	4	3	2	2	2	2	2	2	2
c, м	3	2	2	4	5	4	2	2	1	1	1	2	1	3	5

Пример выполнения задания С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел.

Задача 1**.** Рама *ACE* (рис. 1.7) в точке *A* закреплена на цилиндрической шарнирной опоре, а в точке *B* поддерживается вертикальным невесомым стержнем *BK*. На раму действуют: пара с моментом $M = 8$ Нм, сила $F = 10$ Н, приложенная в точке *D* под углом 60° к раме, и равномерно распределенная нагрузка интенсивностью $q = 2$ Н/м, приложенная на отрезке *AB*. В точке *E* под прямым углом к участку балки *CE* прикреплен трос, несущий груз $P = 20$ Н. Пренебрегая весом балки, определить реакцию шарнира *A* и реакцию стержневой опоры *BK*, если $a = 2$ м.

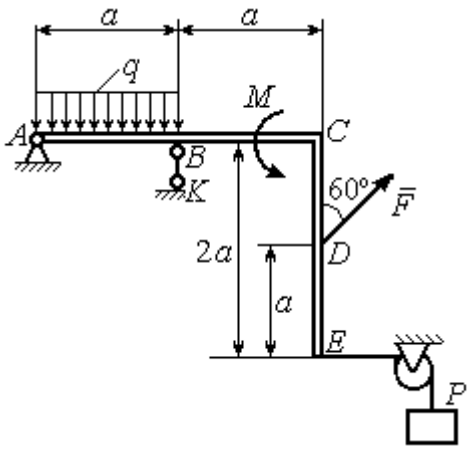


Рис. 1.7. Конструкция рамы

Решение

Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.8. Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию шарнира *A* двумя ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными вдоль горизонтальной и вертикальной осей (см. рис. 1.8). Реакция $\vec{R}_B$ невесомой стержневой опоры *BK* приложена в точке *B* и направлена вдоль стержня *BK*. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ приложена в середине отрезка *AB* и по модулю равна $Q = qa = 4$ Н. Действие груза *P* на раму изображается реакцией $\vec{T}$, равной по величине весу груза.

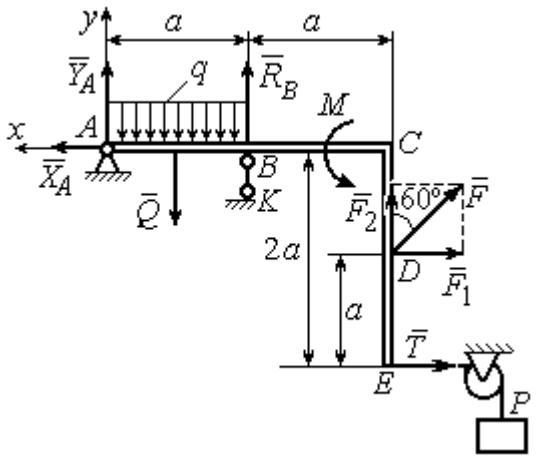


Рис. 1.8. Силы и реакции связей, действующие на раму при её равновесии

При равновесии рамы действующие на неё силы составляют уравновешенную произвольную плоскую систему. Условия равновесия системы сил имеют вид: $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$, $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$. Вычисляя проекции сил на оси *x*, *y*, и моменты сил относительно центра *A*, уравнения равновесия получим в виде:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ - T = 0, \quad \sum F_{ky} = Y_A - Q + R_B + F\cos 60^\circ = 0.$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -Q\frac{a}{2} + R_B a + M + F\cos 60^\circ \cdot 2a + F\cos 30^\circ \cdot a + T2a = 0.$$

Здесь для вычисления момента силы $\vec{F}$ относительно центра A использована теорема Вариньона: $M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_1) + M_A(\vec{F}_2) = F_1 \cdot a + F_2 \cdot 2a$, где $F_1 = F\cos 30^\circ$, $F_2 = F\cos 60^\circ$ (см. рис. 1.8).

Подставляя в уравнения равновесия исходные данные задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных X_A, Y_A, R_B:

$$X_A - 28{,}66 = 0, \quad Y_A + R_B + 1 = 0, \quad R_B \cdot 2 + 121{,}32 = 0.$$

Решая систему, найдем X_A = 28,66 Н, Y_A = 59,66 Н, R_B = – 60,66 Н.

Отрицательное значение величины R_B означает, что фактическое направление реакции R_B стержневой опоры BK противоположно направлению, показанному на рис. 1.8. Численное значение реакции шарнира

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = \sqrt{28{,}66^2 + 59{,}66^2} = 66{,}18 \text{ Н}.$$

Задача 2. Балка *ABLC* с вертикальной частью *AB* и горизонтальной перекладиной *LC* закреплена в точке *A* с помощью жесткой заделки (рис. 1.9). Наклонная балка *EC* с углом наклона к горизонту 60° в точке *C* шарнирно прикреплена к горизонтальной перекладине *CL*, а в точке *E* закреплена на шарнирно-подвижной опоре, установленной на горизонтальной поверхности. На конструкцию действуют равномерно распределенная на отрезках *BL* и *DE* нагрузка с одинаковой интенсивностью q = 2 кН/м, сила $\vec{F}$, приложенная в точке *D* перпендикулярно балке *EC* и равная по величине F = 10 кН, и пара сил с моментом M = 5 кН·м. Определить реакцию жесткой заделки *A* и реакции шарниров *C* и *E*, если a = 2 м.

Решение

Разделяем систему на две части по шарниру *C* и рассмотрим равновесие балок *ABLC* и *EC* отдельно. Изобразим обе балки и расставим внешние силы и реакции связей (рис. 1.10). Рассмотрим балку *ABLC* (рис. 1.10, *a*). Заменим распределенную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_1$, приложенной в середине отрезка *BL*, направленной в сторону действия нагрузки и равной $Q_1 = q \cdot a = 4$ кН. Кроме силы $\vec{Q}_1$ и пары сил с моментом *M* на балку действуют реакция жёсткой заделки в точке *A*, имеющая своими составляющими силы $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$ и пару сил с моментом M_A, а также реакция шарнира *C*, разложенная на составляющие $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ (см. рис. 1.10, *a*). Действующие на раму силы составляют уравновешенную плоскую систему сил. Выберем систему координат *xAy*, как показано на рис. 1.10, *a*, и составим уравнения равновесия:

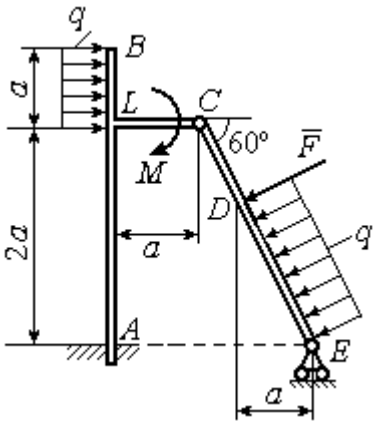


Рис. 1.9. Равновесие конструкции двух балок, соединённых шарниром

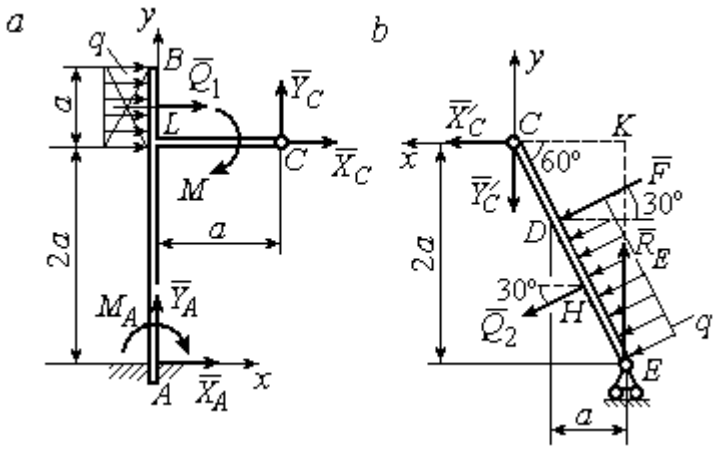


Рис. 1.10. Равновесие частей конструкции:
a - силы и реакции связей, действующие на балку *ABLC*;
b - силы и реакции связей, действующие на балку *CE*

$$\sum F_{kx} = X_A + Q_1 + X_C = 0,$$

$$\sum F_{ky} = Y_A + Y_C = 0,$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -M_A - Q_1 \cdot \left(2a + \frac{a}{2}\right) - M + Y_C a - X_C 2a = 0.$$

Рассмотрим равновесие балки *EC*. Заменим равномерную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_2$, приложенной в середине отрезка *ED*, направленной в сторону действия нагрузки и равной по модулю $Q_2 = q \cdot 2a = 8$ кН. На балку кроме сил $\vec{Q}_2$, $\vec{F}$ действуют реакции связей: $\vec{R}_E$ – реакция шарнирно-подвижной опоры в точке

E и $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ – составляющие реакции шарнира *C*. Силы $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ направлены противоположно силам $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и равны им по модулю $X_C = X'_C$, $Y_C = Y'_C$ (см. рис. 1.10, *a*, *b*). Действующие на балку *EC* силы образуют плоскую уравновешенную систему сил. Выберем систему координат *xCy,* как показано на рис. 1.10, *b,* и составим уравнения равновесия. При этом центром, относительно которого будем считать моменты сил, выберем точку *C*. Получим:

$$\sum F_{kx} = Q_2 \sin 60^\circ + F\cos 30^\circ + \vec{X}'_C = 0,\ \sum F_{ky} = R_E - Q_2 \cos 60^\circ - F\sin 30^\circ - Y'_C = 0,$$

$$\sum M_C\left(\vec{F}_k\right) = -F \cdot CD - Q_2 \cdot CH + R_E \cdot CK = 0.$$

Здесь плечи сил: $CD = \dfrac{2a}{\cos 30^\circ} - 2a$, $CH = \dfrac{2a}{\cos 30^\circ} - a$, $CK = 2a\,\mathrm{tg}30^\circ$. Заменяя в уравнениях величины X'_C на X_C, а Y'_C на Y_C и подставляя исходные данные, получим систему уравнений:

$$X_A + X_C + 4 = 0,\ Y_A + Y_C = 0,\ -M_A - 4X_C + 2Y_C - 25 = 0,$$

$$X_C + 15{,}59 = 0,\ -Y_C + R_E - 9 = 0,\ 2{,}31R_E - 27{,}14 = 0,$$

откуда найдём величины реакции жесткой заделки и реакции шарниров:

$$X_A = 11{,}59 \text{ кН},\ Y_A = -2{,}76 \text{ кН},\ M_A = 42{,}87 \text{ кН·м},$$

$$X_C = -15{,}59 \text{ кН},\ Y_C = 2{,}76 \text{ кН},\ R_E = 11{,}76 \text{ кН}.$$

Модули реакций жесткой заделки *A* и шарнира *C*:

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 11{,}91 \text{ кН},\ R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 15{,}83 \text{ кН}.$$

1.5. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил

В заданиях рассматривается равновесие однородной плиты или вала (прямого или с «ломаной» осью) с насаженным на него шкивом.

Вал закреплен подпятником и подшипником и удерживается в равновесии. На вал действуют сила $\vec{F}$, пара сил с моментом M и сила $\vec{P}$. На шкив вала намотана нить, к свободному концу которой, перекинутому через невесомый блок, подвешен груз весом Q. Для вала определить реакции подшипника и подпятника и величину уравновешивающей силы Q (или момента M).

Плита весом P закреплена пространственным шарниром, подшипником и удерживается в заданном положении невесомым стержнем. На плиту действуют силы $\vec{F}$, $\vec{Q}$ и пара сил с моментом M. Для плиты найти реакции сферического и цилиндрического шарниров и реакцию стержня.

Варианты задания даны на рис. 1.11 – 1.13. Исходные данные для выполнения задания приведены в табл. 1.2.

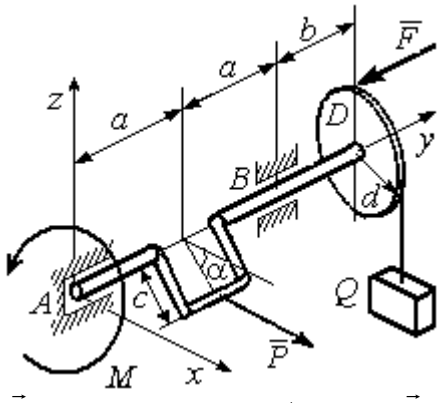
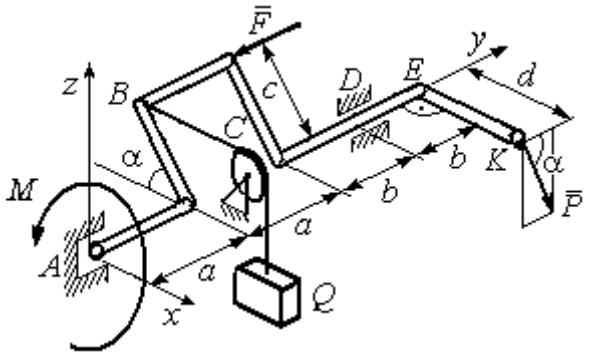
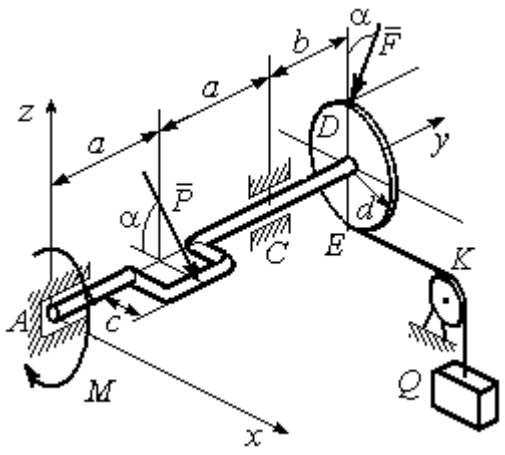
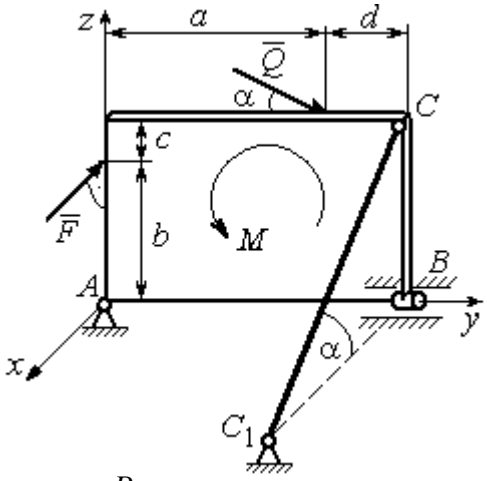
Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**
	
Сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; сила $\vec{P}$ параллельна оси Ax; нить, удерживающая груз, сходит со шкива вертикально. Найти реакции подпятника и подшипника в точках A и B и величину уравновешивающего груза Q	Сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; сила $\vec{P}$ лежит в плоскости, параллельной zAy; отрезок нити BC параллелен оси Ax; рукоять вала EK параллельна оси Ax. Найти реакции подпятника и подшипника в точках A и D и величину уравновешивающего момента M

Рис. 1.11. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 1 – 2, 11 – 12, 21 – 22

Варианты № 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
	
Сила $\vec{F}$, лежит в плоскости zAy; сила $\vec{P}$ лежит в плоскости, параллельной zAx, отрезок нити EK параллелен оси Ax. Найти реакции подпятника и подшипника в точках A и C, а также величину уравновешивающего груза Q	Плита весом P расположена в плоскости zAy; пара сил с моментом M действует в плоскости плиты; стержень CC_1 расположен в плоскости, параллельной zAx; сила $\vec{Q}$ действует в плоскости плиты; сила $\vec{F}$ перпендикулярна плоскости плиты. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1

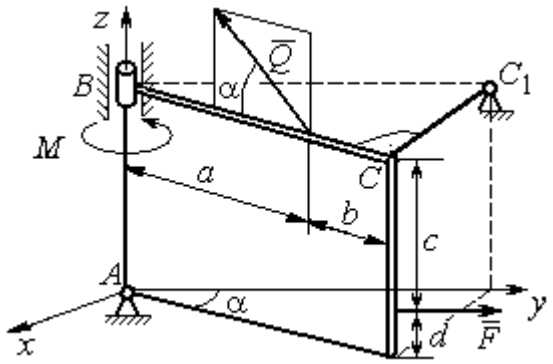
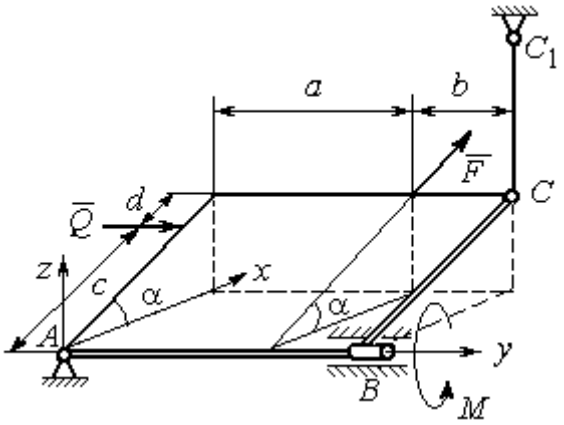
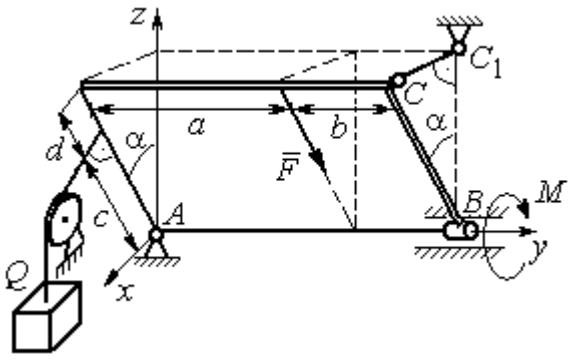
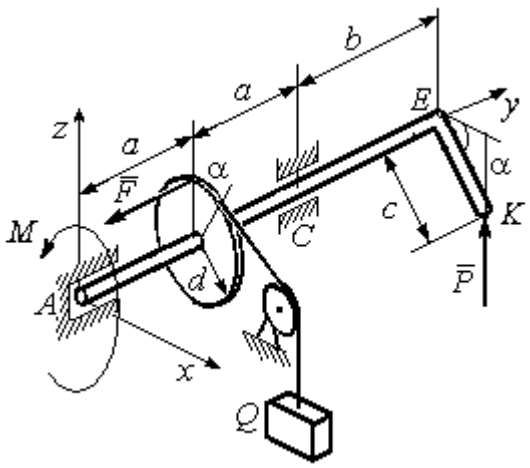
Варианты № 5, 15, 25	**Варианты № 6, 16, 26**
	
Плита весом P отклонена на угол α от вертикальной плоскости zAy; сила $\vec{Q}$ лежит в плоскости плиты; сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; стержень CC_1 перпендикулярен плоскости плиты. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1	Плита весом P отклонена на угол α от горизонтальной плоскости xAy; сила $\vec{Q}$ перпендикулярна боковой стенке плиты и параллельна оси Ay; сила $\vec{F}$ расположена в плоскости плиты и параллельна её боковым стенкам; стержень CC_1 параллелен оси Az. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1

Рис. 1.12. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 3 – 6, 13 – 16, 23 – 26

Варианты № 7, 17, 27	Варианты № 8, 18, 28
	
Плита весом P отклонена на угол α от вертикальной плоскости zAy; нить, удерживающая груз Q, находится плоскости zAx, прикреплена к боковой стенке плиты и перпендикулярна ей; сила $\vec{F}$ параллельна боковым стенкам плиты; стержень CC_1 перпендикулярен плоскости zAy. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1	Рукоять EK перпендикулярна оси вала и наклонена под углом α к горизонтальной плоскости xAy; сила $\vec{P}$ параллельна оси Az; сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; нить, удерживающая груз Q, сходит со шкива по касательной. Найти реакции подпятника A, подшипника C, и величину уравновешивающего груза Q

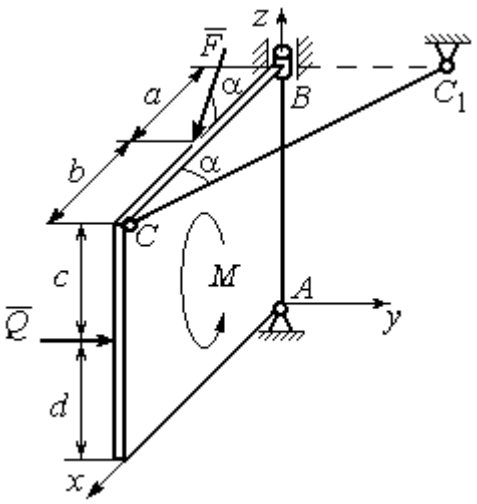
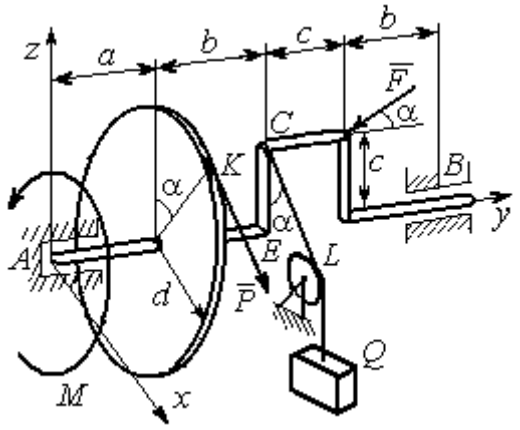
Варианты № 9, 19, 29	Варианты № 10, 20, 30
	
Плита весом P находится в вертикальной плоскости zAx; стержень CC_1 расположен в плоскости, параллельной xAy; пара сил с моментом M действует в плоскости плиты; сила $\vec{Q}$ перпендикулярна плоскости плиты; сила $\vec{F}$ лежит в плоскости плиты. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1	Сила $\vec{F}$ находится в плоскости zAy; стойка CE находится в плоскости zAy; отрезок CL нити, удерживающей груз, находится в плоскости параллельной xAz; сила $\vec{P}$ находится в плоскости шкива и направлена по касательной к ободу в точке K. Найти реакции подпятника A, подшипника B и величину уравновешивающего момента M

Рис. 1.13. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 1.2

Исходные данные для задания С2.

Равновесие пространственной системы сил

Номер варианта задания	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
P, кН	5	4	6	10	16	15	12	10	15	14
F, кН	8	6	12	6	10	10	8	12	12	10
Q, кН	–	12	–	12	8	12	10	–	10	12
M, кН·м	12	–	10	8	12	6	8	6	8	–
α, град	60	30	30	30	60	60	60	30	30	60
a, м	1,2	0,8	1,4	0,6	1,2	0,9	1,4	0,4	0,8	0,8
b, м	1,0	0,6	1,1	0,4	0,8	0,4	0,6	1,2	0,2	0,6
c, м	0,8	0,5	0,8	0,3	1,4	0,8	1,2	0,8	0,4	0,4
d, м	0,4	0,4	0,6	0,2	0,4	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6

Номер варианта задания	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
P, кН	8	10	10	15	14	10	16	9	10	12
F, кН	6	12	16	8	12	14	10	15	8	10
Q, кН	–	14	–	10	10	12	14	–	12	14
M, кН·м	10	–	12	12	12	8	10	10	10	–
α, град	30	60	60	60	30	30	30	60	60	30
a, м	0,8	1,3	0,9	0,5	1,3	1,2	1,6	0,6	0,9	1,2
b, м	0,6	1,1	0,6	0,4	0,9	0,6	0,8	1,2	0,3	0,8
c, м	0,4	0,8	0,5	0,2	1,5	0,9	1,2	0,4	0,6	0,6
d, м	0,2	0,4	0,4	0,1	0,5	0,4	0,6	0,2	0,2	0,8

Номер варианта задания	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
P, кН	10	12	5	8	10	14	18	12	14	10
F, кН	12	8	15	10	12	8	10	15	9	8
Q, кН	–	10	–	12	14	10	16	–	12	6
M, кН·м	12	–	16	14	8	10	8	12	10	–
α, град	90	30	60	30	45	30	30	60	60	30
a, м	0,6	0,8	1,1	1,2	1,5	0,8	1,0	0,8	1,2	0,9
b, м	0,8	0,6	0,9	1,0	0,9	0,6	0,8	1,4	0,6	0,4
c, м	0,4	1,2	0,8	0,6	1,5	0,9	1,1	0,5	0,8	0,6
d, м	0,4	1,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5

Примеры решения задания С2. Равновесие пространственной системы сил

Задача 1. Горизонтальный вал (рис. 1.14) закреплен в подпятнике *C* и подшипнике *K*. Вал имеет шкив I радиуса *R* и шкив II радиуса *r*, перпендикулярные оси вала. Рукоять *AE* параллельна оси *Cx*. Нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива I по касательной вертикально вниз. На вал действуют силы $\vec{F}$, $\vec{P}$ и пара сил с моментом *M*, закручивающая вал вокруг оси *Cy*. Сила $\vec{F}$ находится в плоскости, параллельной *zCy*, и составляет угол 60° с направлением оси *Cy*. Сила $\vec{P}$ приложена в точке *B* шкива II, определяемой центральным углом 30º, и направлена по касательной. Определить величину уравновешивающего момента *M* и реакции подшипника и подпятника, если $P = 4$ кН, $F = 2$ кН, $Q = 3$ кН, $R = 0{,}6$ м, $r = 0{,}3$ м, $a = 0{,}8$ м, $b = 0{,}4$ м.

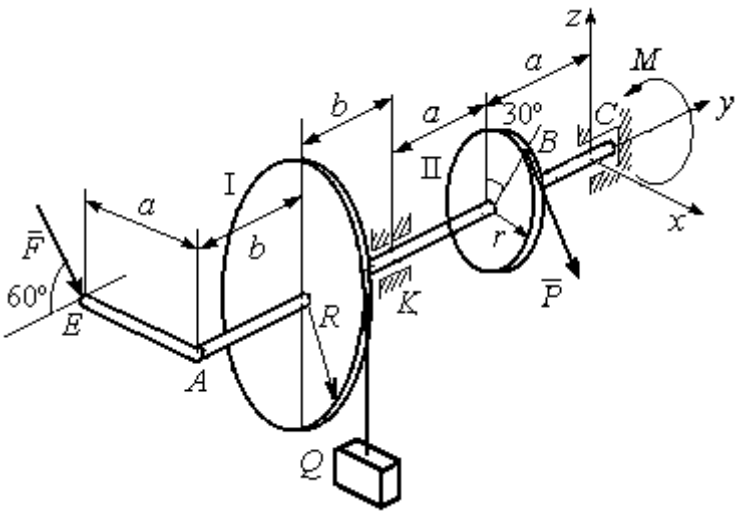


Рис. 1.14. Схема вала и его нагрузка

Решение

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют внешние силы $\vec{F}$, $\vec{P}$, пара сил с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом *Q*, подпятник *C* и подшипник *K*. Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию подпятника *C* раскладываем на три составляющие: $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$, $\vec{Z}_C$, направленные

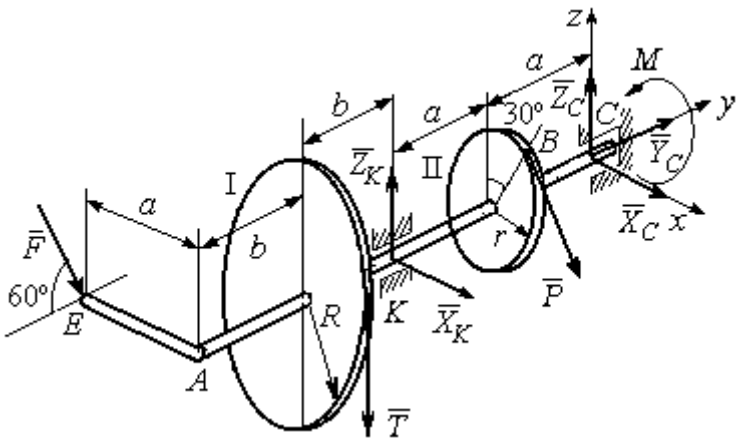


Рис. 1.15. Внешние силы и реакции связей вала

вдоль координатных осей. Реакция подшипника *K* лежит в плоскости, перпендикулярной оси вала, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_K, \vec{Z}_K$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити от точки *K* и по модулю равна весу груза. Действие на вал внешних сил и реакций связи показано на рис. 1.15.

Внешние силы, действующие на вал, и реакции связей составляют произвольную пространственную систему сил, эквивалентную нулю ($\vec{P}$, $\vec{F}$, $\vec{X}_K, \vec{Z}_K, \vec{T}$, $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C, \vec{Z}_C, M$) ∞ 0, для которой уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0.$$

Для удобства при составлении уравнений равновесия изобразим вал вместе с действующими на него силами в проекциях на координатные плоскости (рис. 1.16)

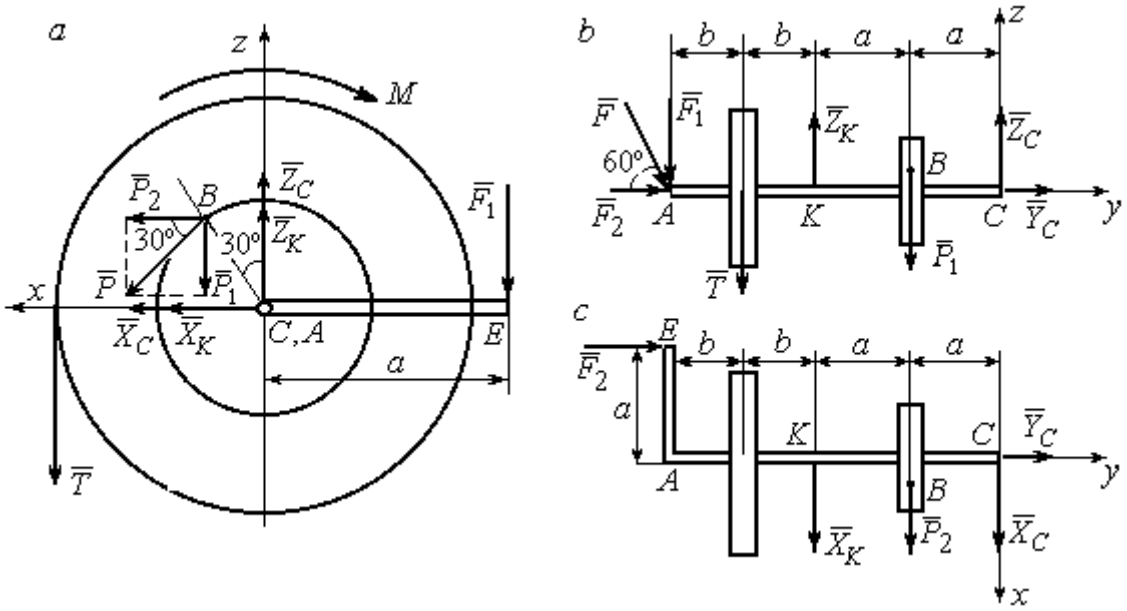


Рис. 1.16. Вал и действующие на него силы в проекциях на координатные плоскости:
a – вид вала в проекции на плоскость *zCx* с положительного конца оси *y*;
b – вид вала в проекции на плоскость *zCy* с положительного конца оси *x*;
c – вид вала в проекции на плоскость *xCy* с положительного конца оси *z*.

На рис. 1.16, *а* показаны проекции всех сил на плоскость *zCx*. Вычисляя моменты проекций этих сил относительно точки *C*, получим значения моментов исходных сил относительно оси *y*.

Для вычисления моментов сил относительно оси *x* достаточно найти моменты проекций сил на плоскость *zCy* относительно точки *C* (см. рис. 1.16, *b*), а вычисляя моменты проекций сил на плоскость *xCy* относительно точки *C*, получим значения моментов сил относительно оси z.

Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = P_2 + X_K + X_C = 0,\ \sum F_{ky} = F_2 + Y_C = 0,$$

$$\sum F_{kz} = -P_1 + Z_K - T + Z_C - F_1 = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = P_1 a - Z_K 2a - T(2a + b) + F_1(2a + 2b) = 0,$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -F_1 a + TR + Pr - M = 0,$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = P_2 a + X_K 2a - F_2 a = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, с учётом того, что

$$P_1 = P\cos 60^\circ = 0{,}5P,\ P_2 = P\cos 30^\circ = 0{,}87P,$$

$$F_1 = F\cos 30^\circ = 0{,}87F,\ F_2 = F\cos 60^\circ = 0{,}5F$$ (см. рис. 1.16 *а*, *b*),

получим систему уравнений:

$$0{,}87 \cdot 4 + X_K + X_C = 0,\ \ 2 \cdot 0{,}5 + Y_C = 0,\ -4 \cdot 0{,}5 + Z_K - 3 + Z_C - 2 \cdot 0{,}87 = 0,$$

$$0{,}5 \cdot 4 \cdot 0{,}8 - 1{,}6Z_K - 3 \cdot 0{,}87(2 \cdot 0{,}8 + 0{,}4) + 2 \cdot 0{,}87(2 \cdot 0{,}8 + 2 \cdot 0{,}4) = 0,$$

$$-0{,}87 \cdot 0{,}8 + 3 \cdot 0{,}6 + 4 \cdot 0{,}3 - M = 0,\ 0{,}87 \cdot 4 \cdot 0{,}8 + 1{,}6 \cdot X_K - 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 0.$$

Решая систему, найдём: $X_C = -2{,}24$ кН, $Y_C = -1$ кН, $Z_C = 6{,}39$ кН, $X_K = -1{,}24$ кН, $Z_K = 0{,}35$ кН, $M = 2{,}3$ кН·м.

Окончательно, реакция подпятника $R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2} = 6{,}84$ кН,

реакция подшипника $R_K = \sqrt{X_K^2 + Z_K^2} = 1{,}29$ кН.

Задача 2. Плита весом *P* расположена в вертикальной плоскости *zAy*. В точке А плита закреплена пространственным шарниром, а в точке *B* на оси *y* опирается на цилиндрический шарнир (подшипник). Плита удерживается в равновесии при помощи невесомого стержня CC_1, прикреплённого шарниром к плите в её верхнем углу, в точке *C* перпендикулярно плоскости плиты (рис. 1.17).

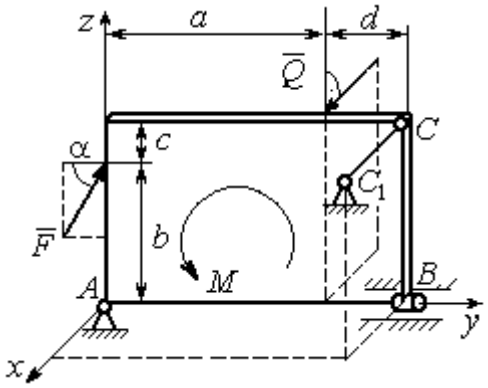


Рис. 1.17. Равновесие плиты

На плиту действует сила $\vec{Q}$, приложенная на краю плиты перпендикулярно её плоскости, и сила $\vec{F}$, лежащая в плоскости плиты и направленная под углом α к горизонту (см. рис. 1.17). Кроме того, в плоскости плиты на неё действует пара сил с моментом *M*. Найти реакции шарниров *A* и *B* и усилие в стержневой подпорке CC_1 при равновесии плиты, если параметры нагрузки: *P* = 1 кН, *Q* = 500 Н, *F* = 400 Н, *M* = 300 Н·м, $\alpha = 35^\circ$, *a* = 2 м, *b* = 1,5 м, *c* = 0,2 м, *d* = 0,4 м.

Решение

Заменим связи плиты их реакциями. Реакция шарнира *A* раскладывается на три составляющие: $\vec{X}_A$ $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$ по направлениям координатных осей. Направления координатных осей показаны на рис. 1.17. Реакция подшипника *B* лежит в плоскости, перпендикулярной оси подшипника, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_B, \vec{Z}_B$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция стержня $\vec{T}$ направлена вдоль стержня. Действие сил и реакций показано на рис.1.18.

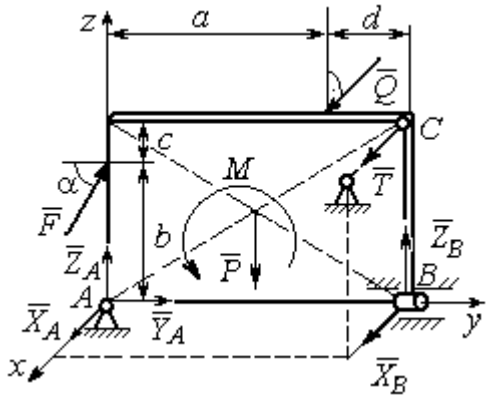


Рис. 1.18. Действие сил и реакций при равновесии плиты

Пространственная система сил, действующих на плиту, является уравновешенной: $(\vec{P}, \vec{F}, \vec{X}_B, \vec{Z}_B, \vec{T}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A, M) \infty 0$. Уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0\,,\ \sum F_{ky} = 0\,,\ \sum F_{kz} = 0\,,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k)=0,\ \sum M_y(\vec{F}_k)=0,\ \sum M_z(\vec{F}_k)=0.$$

В вычислениях моментов сил относительно осей будем считать момент положительным, если при взгляде со стороны положительного направления оси, сила вращает тело (плиту) против хода часовой стрелки. Получим:

$$\sum F_{kx}=0,\ X_A+Q+X_B+T=0,$$

$$\sum F_{ky}=0,\ Y_A+F\cos\alpha=0,$$

$$\sum F_{kz}=0,\ Z_A+F\sin\alpha-P+Z_B=0$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k)=0,\ -F\cos\alpha\cdot b-P\cdot 0{,}5(a+d)+Z_B(a+d)+M=0,$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k)=0,\ Q\cdot(b+c)+T\cdot(b+c)=0,$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k)=0,\ -Q\cdot a-T\cdot(a+d)-X_B\cdot(a+d)=0.$$

Подставив исходные данные задачи, получим систему уравнений:

$$X_A+500+X_B+T=0,\ Y_A+400\cdot 0{,}82=0,\ Z_A+400\cdot 0{,}57-1000+Z_B=0,$$

$$-400\cdot 0{,}82\cdot 1{,}5-1000\cdot 0{,}5\cdot 2{,}4+Z_B\cdot 2{,}4+300=0,$$

$$500\cdot 1{,}7+T\cdot 1{,}7=0,\quad -500\cdot 2-T\cdot 2{,}4-X_B\cdot 2{,}4=0,$$

откуда находим значения составляющих реакций:

$$T=-500\text{ Н},\ X_B=83{,}33\text{ Н},\ Z_B=580\text{ Н},$$

$$X_A=-83{,}33\text{ Н},\ Y_A=-328\text{ Н},\ Z_A=192\text{ Н}.$$

Полные реакции пространственного шарнира *A*:

$$R_A=\sqrt{X_A^2+Y_A^2+Z_A^2}=389{,}09\text{ Н},$$

цилиндрического шарнира *B*: $R_B=\sqrt{X_B^2+Z_B^2}=585{,}95$ Н.

2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

Кинематикой называется раздел механики, в котором изучаются свойства движения материальных тел без учета их масс и действующих на них сил.

2.1. Кинематика точки. Основные параметры движения точки

Кривая, которую описывает движущаяся точка, называется **траекторией** точки. Движение точки может быть задано **векторным**, **координатным** или **естественным** способами.

Векторный способ основан на определении положения точки ее радиусом-вектором в виде векторного уравнения $\vec{r} = \vec{r}(t)$. При **координатном способе** задания движения точки положение точки определяется ее координатами, заданными для каждого момента времени: $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$. **Естественный способ** задания движения используется, если заранее известна траектория движения точки. Тогда положение точки однозначно определяется длиной дуги $\breve{OM} = S(t)$, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки O, принятой за начало отсчета.

Мгновенная скорость, или скорость точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от радиуса-вектора точки: $\vec{V} = \dot{\vec{r}}$. Вектор скорости точки $\vec{V}$ всегда направлен по касательной к траектории в сторону движения точки.

При координатном способе задания движения величины проекций вектора скорости $\vec{V}$ на координатные оси определяются как производные по времени от соответствующих координат: $V_x = \dot{x}$, $V_y = \dot{y}$, $V_z = \dot{z}$. Модуль вектора скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$. При естественном способе задания движения вектор скорости точки определяется равенством: $\vec{V} = \dot{S}\vec{\tau}$, где $S = S(t)$ – закон изменения длины дуги, $\vec{\tau}$ –единичный вектор касательной к траектории движения, направленный в сторону возрастающих расстояний.

Величина $V = |\dot{S}|$ называется алгебраической скоростью точки. При $\dot{S} > 0$ вектор скорости $\vec{V}$ направлен по единичному вектору $\vec{\tau}$ – в сторону возрастающих расстояний. При $\dot{S} < 0$ он имеет направление, противоположное единичному вектору $\vec{\tau}$, т. е. в сторону убывающих расстояний.

Мгновенное ускорение, или ускорение точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от вектора скорости точки или как вторая производная от радиус-вектора точки: $\vec{a} = \dot{\vec{V}} = \ddot{\vec{r}}$. При координатном способе проекции вектора ускорения $\vec{a}$ на координатные оси – величины a_x, a_y, a_z – определяются равенствами: $a_x = \dot{V}_x = \ddot{x}$, $a_y = \dot{V}_y = \ddot{y}$, $a_z = \dot{V}_z = \ddot{z}$. Модуль вектора ускорения равен: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

При естественном способе задания движения вектор ускорения точки $\vec{a}$ раскладывается на две взаимно перпендикулярные составляющие $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$, параллельные осям n и τ естественной системы координат, и представляется в виде равенства $\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n}$, или $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где $\vec{\tau}$ – единичный направляющий вектор оси, касательной к траектории (касательная ось); $\vec{n}$ – единичный направляющий вектор главной нормали траектории. Величина a_n называется **нормальным ускорением** точки и вычисляется по формуле: $a_n = \dfrac{V^2}{\rho}$, где ρ – радиус кривизны траектории. (У окружности радиус кривизны равен её радиусу, у прямой линии – бесконечности.) Вектор $\vec{a}_n$ нормальной составляющей ускорения всегда направлен к центру кривизны траектории. При движении по окружности радиус кривизны траектории равен радиусу окружности, а центр кривизны траектории совпадает с центром окружности. Величина a_τ называется **касательным ускорением** и равна модулю второй производной от заданного закона изменения длины дуги: $a_\tau = |\ddot{S}|$, где $S = S(t)$ – закон изменения длины дуги. Направление вектора касательного ускорения $\vec{a}_\tau$ зависит от знака второй производной $\ddot{S}$. При $\ddot{S} > 0$

вектор $\vec{a}_\tau$ в направлен в сторону возрастающих расстояний, по направлению единичного вектора $\vec{\tau}$, при $\ddot{S} < 0$ – в сторону убывающих расстояний (противоположно единичному вектору $\vec{\tau}$). Вектор полного ускорения $\vec{a}$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$. Модуль вектора ускорения: $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$.

2.2. Вращение тела вокруг неподвижной оси

Движение тела, при котором все точки некоторой его прямой остаются неподвижными, называется **вращательным**, а указанная прямая называется осью вращения. Вращение тела задается углом поворота $\varphi = \varphi(t)$ подвижной плоскости, связанной с телом, относительно некоторого ее начального положения. Направление вращения с возрастанием угла поворота считается положительным.

Величина **угловой скорости** вращения тела равна модулю производной от угла поворота тела по времени: $\omega = |\dot{\varphi}|$. Направление угловой скорости вращения тела зависит от знака производной $\dot{\varphi}$. При $\dot{\varphi} > 0$ вращение происходит в положительном направлении, в сторону возрастания угла поворота, при $\dot{\varphi} < 0$ – в отрицательном. Направление угловой скорости обычно показывают дуговой стрелкой вокруг оси вращения. Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения в сторону, откуда вращение тела видно против хода часовой стрелки.

Величина **углового ускорения** при вращении тела равна модулю второй производной от угла поворота тела по времени: $\varepsilon = |\ddot{\varphi}|$. Если $\ddot{\varphi}$ одного знака с $\dot{\varphi}$, то угловое ускорение ускоряет вращение тела, если разных знаков, то угловое ускорение замедляет вращение.

При вращательном движении тела все его точки движутся по окружностям, радиусы которых равны расстояниям от выбранной точки до неподвижной оси. **Скорость точки вращающегося твердого тела (**в отличие от угловой скорости тела) называют **линейной,** или **окружной скоростью** точки. Величина скорости рассчитывается по формуле: $V = \omega h$, где ω – величина угловой скорости тела; h

– расстояние от точки до оси вращения. Вектор скорости точки лежит в плоскости описываемой точкой окружности и направлен по касательной к ней в сторону вращения тела. Отношение скоростей двух точек вращающегося тела равно отношению расстояний от этих точек до оси: $\frac{V_{M1}}{V_{M2}} = \frac{h_1}{h_2}$.

Ускорение точки вращающегося твердого тела рассчитывается как ускорение точки при естественном способе задания движения в виде суммы векторов касательного и нормального ускорений: $\vec{a}_M = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$. Величины касательного, нормального и полного ускорений точки вращающегося тела, соответственно: $a_\tau = \varepsilon h$, $a_n = \omega^2 h$, $a_M = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$, где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела; h – расстояние от точки до оси вращения.

2.3. Плоскопараллельное движение твёрдого тела

Плоскопараллельным, или плоским движением твердого тела, называется такое движение, при котором все точки тела движутся параллельно некоторой неподвижной плоскости. Плоское движение представляется в виде суммы мгновенного поступательного движения, при котором все точки плоской фигуры движутся со скоростью выбранной точки-полюса, и мгновенного вращательного движения вокруг этого полюса.

Скорость любой точки M плоской фигуры равна векторной сумме вектора скорости точки-полюса и вектора скорости точки M при вращении тела вокруг этого полюса: $\vec{V}_M = \vec{V}_A + \vec{V}_{MA}$, где $\vec{V}_M$ – скорость точки M; $\vec{V}_A$ – скорость полюса A; $\vec{V}_{MA}$ – вектор скорости точки M при вращении тела вокруг полюса A, модуль скорости $V_{MA} = \omega \cdot MA$, где ω – угловая скорость мгновенного вращательного движения тела вокруг полюса; MA – расстояние между полюсом A и точкой M.

Мгновенным центром скоростей называется такая точка P плоской фигуры, скорость которой в данный момент времени равна нулю. Выбрав в качестве полюса мгновенный центр скоростей, скорость любой точки плоской фигуры

находят так, как если бы мгновенное движение фигуры было вращательным вокруг мгновенного центра скоростей.

Способы построения мгновенного центра скоростей

1. Если известны направления скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ каких-нибудь двух точек *A* и *B* плоской фигуры, то мгновенный центр скоростей находится в точке пересечения перпендикуляров, восстановленных из этих точек к векторам скоростей (рис. 2.1, *a*).

2. Если скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ двух точек *A* и *B* плоской фигуры известны и параллельны друг другу, а линия *AB* перпендикулярна $\vec{V}_A$ (и, конечно, $\vec{V}_B$), то мгновенный центр скоростей определяется как точка пересечения линий, проведенных через основания и вершины векторов скоростей (построение показано на рис. 2.1, *b*, *c*).

3. Если скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ двух точек *A* и *B* параллельны друг другу, но линия *AB*, соединяющая эти точки, не перпендикулярна векторам скоростей (рис. 2.1, *d*), то мгновенная угловая скорость тела равна нулю и движение тела в данный момент времени является мгновенным поступательным. В этом случае скорости всех точек равны по величине и направлению.

4. Если плоскопараллельное движение осуществляется путем качения без скольжения одного тела по неподвижной поверхности другого, то мгновенный

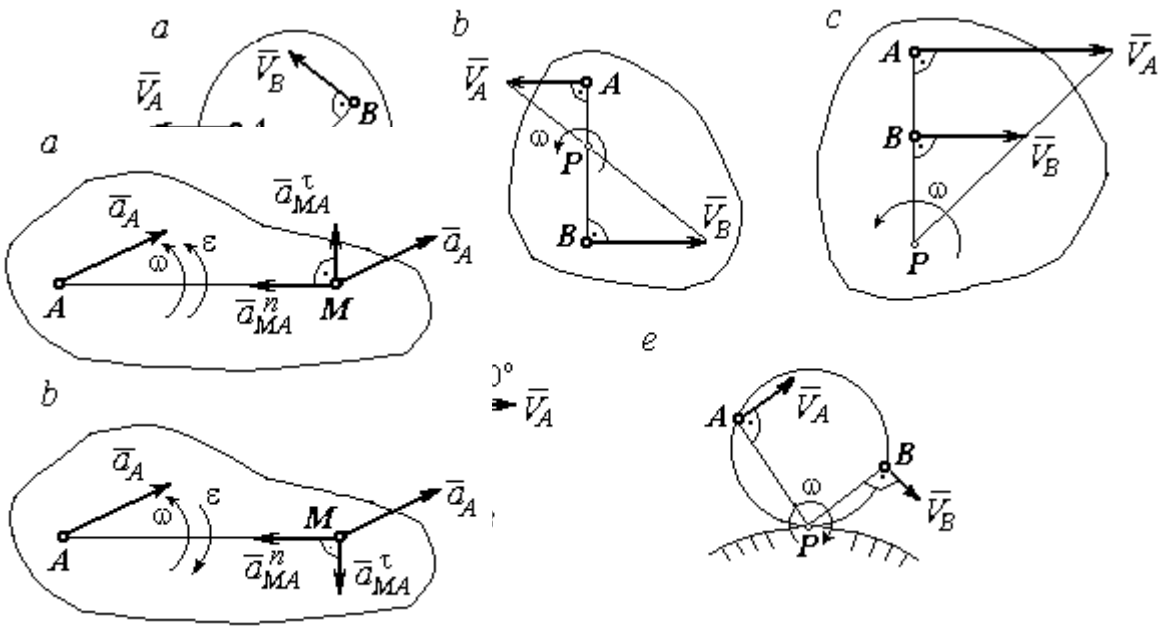


Рис. 2.1. Способы построения мгновенного центра скоростей

Рис. 2.2. Ускорение точки плоской фигуры:
a – ускоренное движение;
b – замедленное движение

центр скоростей расположен в точке касания катящегося тела с неподвижной поверхностью (рис. 2.1, *e*).

Ускорение любой точки *M* плоской фигуры при плоскопараллельном движении твердого тела представляется как сумма векторов – ускорения полюса и ускорения точки *M* при вращении фигуры вокруг полюса. Учитывая, что ускорение точки вращающегося тела представляется как сумма нормального и касательного ускорений, получим:

$$\vec{a}_M = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA},$$

где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса *A*; $\vec{a}^{\tau}_{MA}$, $\vec{a}^{n}_{MA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *M* при вращении фигуры вокруг полюса *A*.

Вектор нормального ускорения $\vec{a}^{n}_{MA}$ всегда направлен от точки *M* к полюсу *A*. Вектор касательного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{MA}$ направлен перпендикулярно отрезку *AM* в сторону вращения, если оно ускоренное (рис. 2.2, *a*), и против вращения, если оно

замедленное (рис. 2.2, *b*). Численно величины касательного и нормального составляющих ускорения точки *M* определяются по формулам:

$$a^{\tau}_{MA} = \varepsilon \cdot AM \ , \ \ a^{n}_{MA} = \omega^2 \cdot AM \ ,$$

где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела (плоской фигуры); AM – расстояние от точки *M* до полюса *A* (см. рис. 2.2).

Если при движении плоской фигуры известны траектории движения полюса *A* и точки *M*, то для определения ускорения точки *M* используется векторное равенство

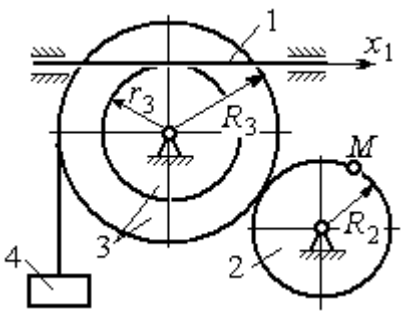
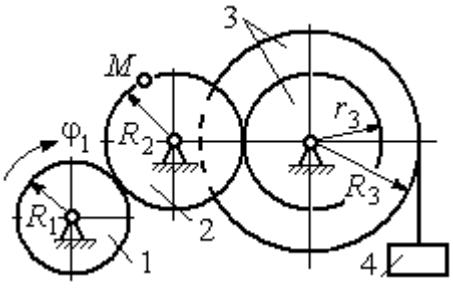
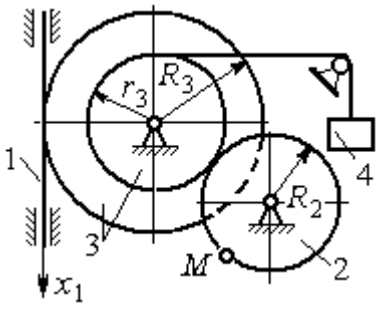
$$\vec{a}^{\tau}_{M} + \vec{a}^{n}_{M} = \vec{a}^{\tau}_{A} + \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA},$$

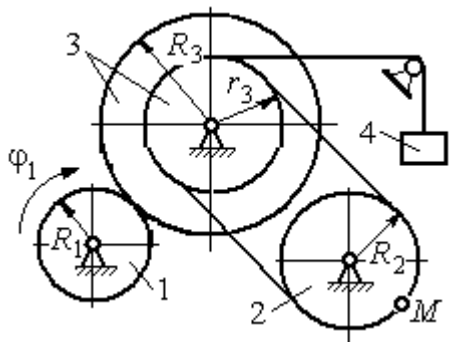
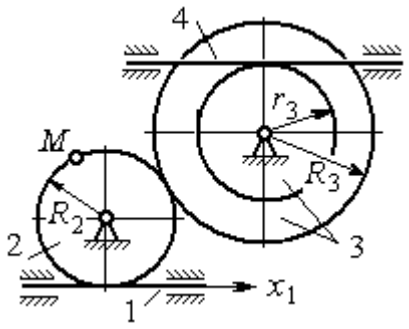
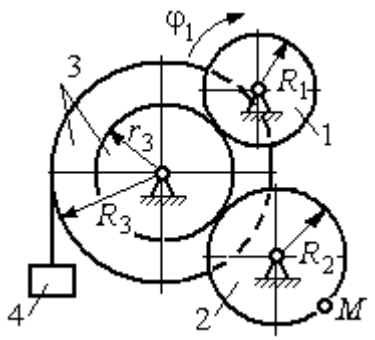
где $\vec{a}^{\tau}_{M}$, $\vec{a}^{n}_{M}$, $\vec{a}^{\tau}_{A}$, $\vec{a}^{n}_{A}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки *M* и полюса *A* при движении их по заданным траекториям.

2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек твердого тела при поступательном и вращательном движениях

По заданному движению одного из звеньев механизма $x_1 = x_1(t)$ (варианты 1, 3, 5, 7, 9) или $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ (варианты 2, 4, 6, 8, 10) найти в момент времени t_1 скорость, касательное, нормальное и полное ускорения точки *M* звена механизма, совершающего вращательное движение, а также скорость и ускорение звена 4, совершающего поступательное движение.

Варианты заданий даны на рис. 2.3, 2.4. Исходные данные представлены в табл. 2.1.

Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**	**Варианты № 3, 13, 23**
		

Варианты № 4, 14, 24	Варианты № 5, 15, 25	Варианты № 6, 16, 26
		

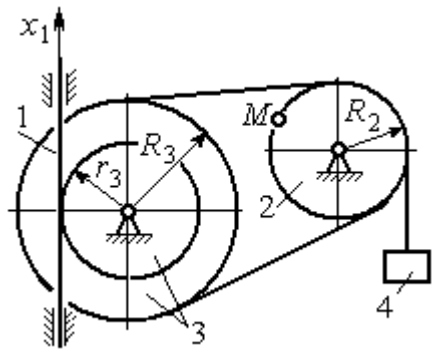
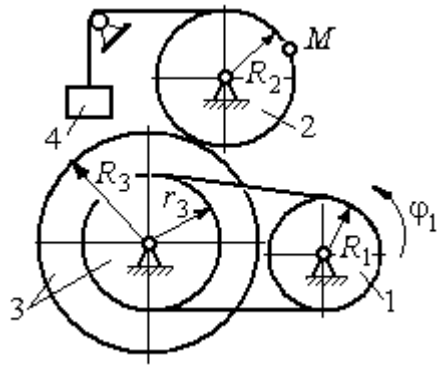
Варианты № 7, 17, 27	Варианты № 8, 18, 28
	

Рис. 2.3. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела. Номера вариантов задания 1 – 8, 11 – 18, 21 – 28

Окончание вариантов задания К1

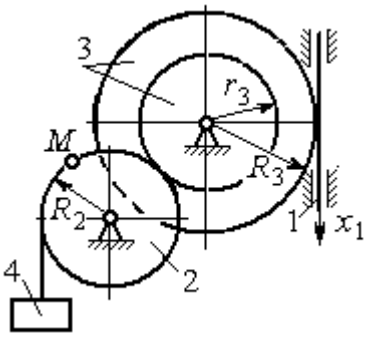
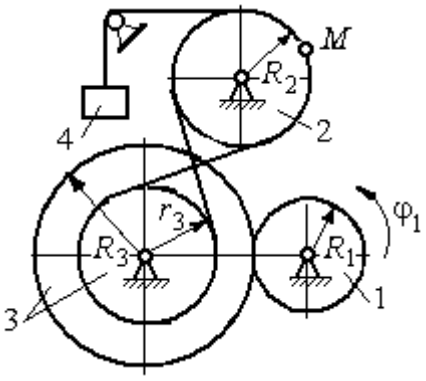
Варианты № 9, 19, 29	Варианты № 10, 20, 30
	

Рис. 2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Таблица 2.1

Исходные данные вариантов задания К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела

Номер варианта задания	R_1,см	R_2, см	R_3, см	r_3, см	$x_1(t)$, см $\varphi_1(t)$, рад	t_1, с
1	–	40	45	35	$x_1(t) = (3t-1)^2$	2
2	10	20	38	18	$\varphi_1(t) = t^2 + 6\cos(\pi t/6)$	3
3	–	30	42	18	$x_1(t) = 5t^2 - 2\cos(\pi t/2)$	1
4	15	30	45	20	$\varphi_1(t) = 5t^2 + \cos(\pi t/2)$	2
5	–	30	40	20	$x_1(t) = 6t - \cos(\pi t/3)$	3
6	10	20	30	10	$\varphi_1(t) = t^3 - \cos(\pi t/2)$	1
7	–	30	40	30	$x_1(t) = 2\sin(\pi t/2) + \cos(\pi t/2)$	2
8	8	10	30	25	$\varphi_1(t) = 5t + \cos(\pi t/2)$	2
9	–	18	30	18	$x_1(t) = 5t + \cos(\pi t/3)$	3
10	15	30	50	20	$\varphi_1(t) = 2t^2 + \sin(\pi t/4)$	2
11	–	30	40	25	$x_1(t) = (t^2 - 3t)$	2
12	12	20	40	28	$\varphi_1(t) = 3t^2 + 6\sin(\pi t/6)$	3
13	–	25	60	42	$x_1(t) = 2t^2 + \cos(\pi t/2)$	1
14	10	30	45	30	$\varphi_1(t) = 3t^2 + 2\cos(\pi t/2)$	2

Окончание табл. 2.1

Номер варианта задания	R_1,см	R_2, см	R_3, см	r_3, см	$x_1(t)$, см $\varphi_1(t)$, рад	t_1, с
15	–	20	30	20	$x_1(t)=3t^2-\cos(\pi t/3)$	3
16	12	18	40	20	$\varphi_1(t)=2t^3+\cos(\pi t/2)$	1
17	–	20	35	15	$x_1(t)=2\sin(\pi t/2)-\cos(\pi t/2)$	2
18	15	18	40	25	$\varphi_1(t)=5t+\cos(\pi t/2)$	1
19	–	22	50	18	$x_1(t)=t^2+\cos(\pi t/3)$	3
20	10	20	45	10	$\varphi_1(t)=2t^2+\sin(\pi t/4)$	4
21	–	20	40	20	$x_1(t)=t+(3t-4)^2$	2
22	8	18	42	18	$\varphi_1(t)=2t^2+12\cos(\pi t/6)$	3
23	–	45	60	40	$x_1(t)=4t^2+\sin(\pi t/2)$	1
24	5	15	30	20	$\varphi_1(t)=2t^2+4\cos(\pi t/2)$	2
25	–	15	35	25	$x_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/3)$	3
26	18	20	35	20	$\varphi_1(t)=2t^3+\sin(\pi t/2)$	1
27	–	15	35	15	$x_1(t)=2\sin(\pi t/2)-\cos(\pi t/2)$	1
28	10	12	40	25	$\varphi_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/2)$	1
29	–	35	50	10	$x_1(t)=t^3-\cos(\pi t/2)$	1
30	10	20	40	10	$\varphi_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/4)$	4

Пример выполнения задания К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела

По заданному уравнению движения звена 1 механизма (рис. 2.5, *а*) определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки M на момент времени t_1, а также скорость и ускорение звена 4, если значения радиусов колес механизма и закон движения звена 1: $R_2=20$ см, $r_2=5$ см, $R_3=8$ см, $r_3=4$ см, $x_1=2t^2-5t$ см, $t_1=1$ с.

Решение

Отметим на схеме положительные направления отсчета углов поворота дисков 2 и 3, соответствующие заданному положительному направлению движения звена 1.

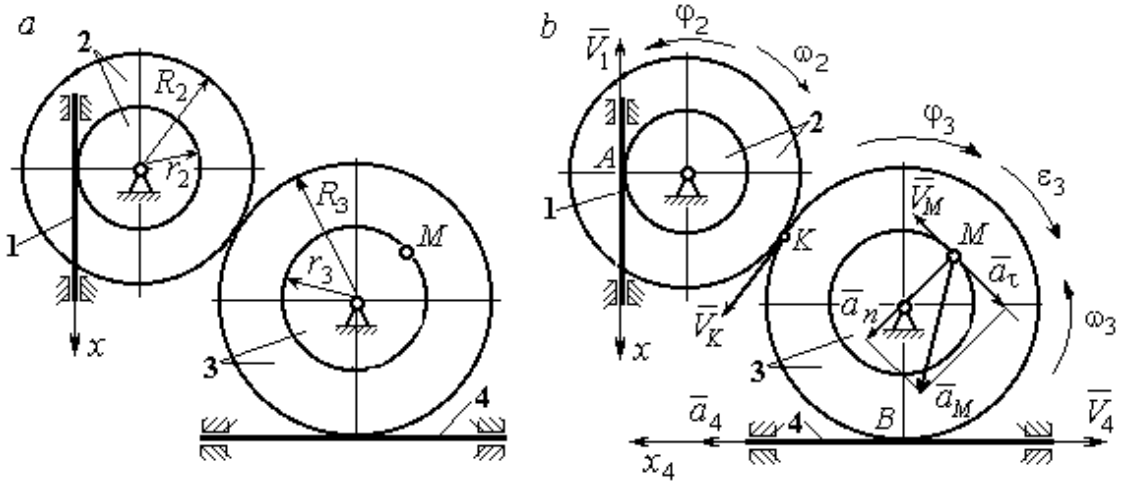


Рис. 2.5. Кинематика вращательного движения твердого тела:
a – схема механизма; *b* – расчетная схема для определения скоростей и ускорений точек механизма

Направления показаны на рис 2.5, *b* дуговыми стрелками φ_2, φ_3, а положительное направление движения звена 4 – направлением оси x_4.

Звено 1 движется поступательно. Движение задано координатным способом в виде закона изменения координаты x. Дифференцируем по времени уравнение движения: $\dot{x} = 4t - 5$ см/с. В момент времени $t_1 = 1$ с значение производной: $\dot{x}(1)$ = –1 см/с. Отрицательное значение производной $\dot{x}$ показывает, что в данный момент времени звено 1 движется в отрицательном направлении оси *x*. Скорость звена 1 равна модулю производной: $V_1 = |\dot{x}|$. На рис. 2.5, *b* направление движения звена 1 в момент времени $t_1 = 1$ с показано вектором скорости $\vec{V}_1$, направленным в сторону, противоположную положительному направлению оси *x*. Эту же скорость будет иметь точка *A* – точка контакта звена 1 с диском 2, лежащая на расстоянии r_2 от оси вращения диска. Следовательно, $V_1 = V_A = \omega_2 r_2$, где ω_2 – угловая скорость диска 2. Отсюда угловая скорость диска: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{r_2} = \dfrac{|4t-5|}{5} = |\dot{\varphi}_2|$ рад/с.

При $t_1 = 1$ с значение производной отрицательно: $\dot{\varphi}_2(1)$ = – 0,2 рад/с. Это означает, что в заданный момент времени вращение диска 2 с угловой скоростью

$\omega_2(1)=\left|\dot{\varphi}_2(1)\right|$ = 0,2 рад/с происходит в отрицательном для диска 2 направлении. На рис. 2.5, *b* направление вращения диска 2 показано дуговой стрелкой ω_2 в сторону, противоположную положительному направлению отсчета угла φ_2. При передаче вращения диска 2 диску 3 величины угловых скоростей дисков обратно пропорциональны радиусам дисков, которым принадлежит точка контакта: $\frac{\omega_2}{\omega_3}=\frac{R_3}{R_2}$. Тогда, угловая скорость диска 3 $\omega_3=\omega_2\frac{R_2}{R_3}=\left|2t-2{,}5\right|=\left|\dot{\varphi}_3\right|$ рад/с.

В момент времени $t_1=1$с значение производной $\dot{\varphi}_3$ отрицательно: $\dot{\varphi}_3(1)=-0{,}5$ рад/с, и, следовательно, вращение диска 3 в данный момент времени с угловой скоростью $\omega_3(1)=\left|\dot{\varphi}_3(1)\right|=0{,}5$ рад/с происходит в сторону, противоположную положительному направлению отсчета угла φ_3, как показано на рис. 2.5, *b*. Величина (модуль) скорости точки *M* рассчитывается по формуле: $V_M=\omega_3 r_3$. В момент времени $t_1=1$ с модуль скорости $V_M(1)=2$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ расположен по касательной к траектории движения точки *M* (окружности) и направлен в сторону вращения диска 3 (см. рис. 2.5, *b*).

Звено 4 движется поступательно. Скорость звена 4 равна скорости точки касания его с диском 3: $V_4=V_B=\omega_3 R_3=\left|2t-2{,}5\right|\cdot 8=\left|\dot{x}_4\right|$. В момент времени $t_1=1$ с значение производной от координаты движения звена 4 отрицательно: $\dot{x}_4(1)=-4$ см/с. В результате, вектор скорости $\vec{V}_4(1)$, равный по модулю $V_4(1)=4$ см/с, направлен вдоль оси x_4 в сторону, противоположную ее положительному направлению (см. рис. 2.5, *b*).

Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3(t)=\left|\dot{\omega}_3\right|=\left|\ddot{\varphi}_3\right|=2$ рад/с^2. Из того, что угловая скорость ω_3 и угловое ускорение $\dot{\omega}_3$ диска 3 имеют разные знаки, следует, что вращение диска 3 замедленное. Угловое ускорение диска направлено в сторону положительного направления отсчета угла поворота φ_3, диска 3 (см. рис. 2.5, *b*).

Касательное ускорение a_τ точки *M* рассчитывается по формуле $a_\tau=\varepsilon_3 r_3$ и в момент времени $t_1=1$ с: $a_\tau=8$ см/с^2. Так как вращение диска 3 замедленное,

вектор касательного ускорения точки M $\vec{a}_\tau(t)$ направлен в сторону, противоположную вектору скорости $\vec{V}_M(1)$ (см. рис. 2.5, *b*). Нормальное ускорение a_n точки M рассчитывается как $a_n = \omega_3^2 r_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с величина нормального ускорения: $a_n(1)$ = 1 см/с^2. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_n(1)$ направлен по радиусу к центру диска 3 (см. рис. 2.5, *b*). Полное ускорение точки M в заданный момент времени: $a_M(1) = \sqrt{a_\tau^2(1) + a_n^2(1)}$ = 8,06 см/с^2. Вектор полного ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$.

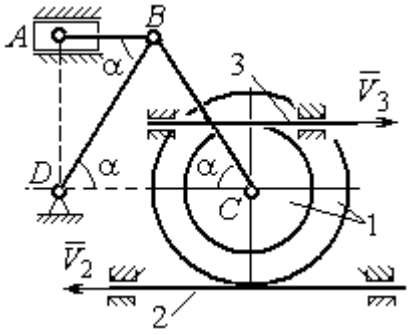
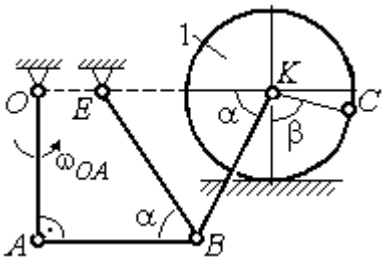
Ускорение a_4 звена 4 находится из условия, что звено 4 движется поступательно и прямолинейно. При прямолинейном движении нормальная составляющая ускорения равна нулю. Тогда $a_4 = a_{4\tau} = \dot{V}_4 = = \dot{V}_B = |\dot{\omega}_3| R_3 = \varepsilon_3 R_3$.

Так как угловое ускорение диска 3 является постоянной величиной, ускорение a_4 не зависит от времени: a_4 = 16 см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_4$ направлен вдоль оси x_4 в сторону положительных значений.

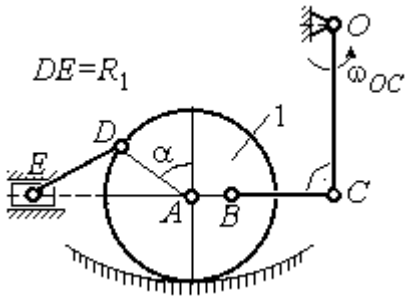
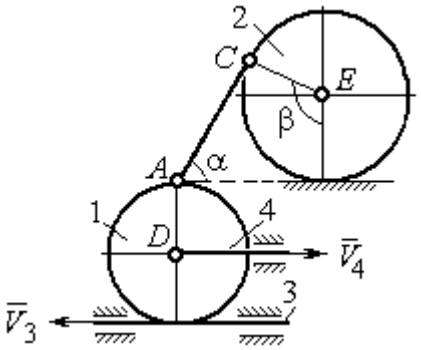
2.5. Задание К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Для заданного положения плоского механизма определить скорости точек и угловые скорости звеньев механизма.

Варианты заданий показаны на рис. 2.6 – 2.8. Исходные данные вариантов заданий выбираются из таблиц, приведённых на рисунках схем механизмов.

Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**
 Найти: $V_A, V_B, V_C, \omega_{AB}, \omega_{BC}, \omega_1, \omega_{BD}$	 Найти: V_A, V_B, V_K, $\omega_1, \omega_{AB}, \omega_{OA}$, ω_{BE}, ω_{BK}

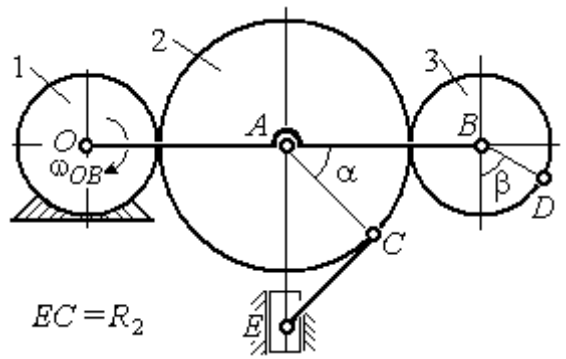
Номер варианта задания	R_1, см	r_1, см	AD, см	α, град	V_2, см/с	V_3, см/с	Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	OE, см	α, град	β, град	V_C, см/с
1	10	5	20	30	8	10	**2**	3	5	4	30	60	10
11	12	8	25	45	10	4	**12**	4	8	6	45	90	8
21	10	6	15	60	5	5	**22**	5	12	2	60	120	12

Варианты № 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
 Найти: V_A, V_B, V_C, V_D, V_E, $\omega_{BC}, \omega_1, \omega_{DE}$	 Найти: V_A, V_C, V_E, $\omega_1, \omega_2, \omega_{AC}$

Номер варианта задания	R_1, см	OC, см	AB, см	BC, см	α, град	ω_{OC}, рад/с	Номер варианта задания	R_1, см	R_2, см	α, град	β, град	V_3, см/с	V_4, см/с
3	12	18	10	35	60	4	**4**	10	15	30	60	8	4
13	10	15	10	25	90	8	**14**	6	10	45	90	4	6
23	15	20	5	20	120	6	**24**	10	12	60	120	3	3

Рис. 2.6. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

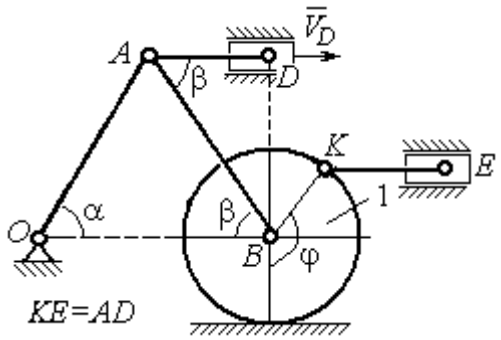
Варианты № 5, 15, 25



Найти: V_A, V_B, V_C, V_D, V_E, ω_2, ω_3, ω_{EC}

Номер варианта задания	R_1, см	R_2, см	R_3, см	α, град	β, град	ω_{OB}, рад/с
5	10	20	12	60	0	6
15	6	18	10	90	90	8
25	20	25	15	120	180	4

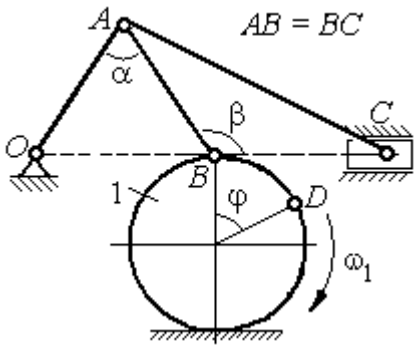
Варианты № 6, 16, 26



Найти: V_A, V_B, V_K, V_E, ω_1, ω_{OA}, ω_{AB}, ω_{AD}, ω_{KE}

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	α, град	β, град	φ, град	V_D, см/с
6	10	20	30	60	60	12
16	12	26	30	30	90	8
26	15	30	60	60	120	15

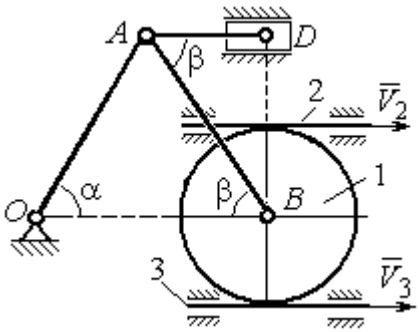
Варианты № 7, 17, 27



Найти: V_A, V_B, V_C, ω_1, ω_{OA}, ω_{AB}, ω_{AC}

Номер варианта задания	R_1, см	AB, см	α, град	β, град	φ, град	V_D, см/с
7	10	20	30	60	60	12
17	12	25	60	120	90	16
27	8	16	30	60	120	10

Варианты № 8, 18, 29

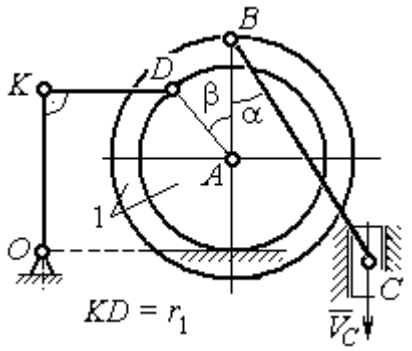
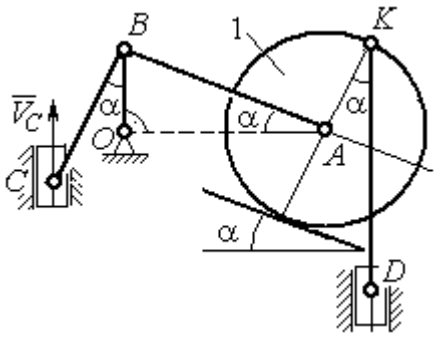


Найти: V_A, V_B, V_D, ω_1, ω_{OA}, ω_{AB}, ω_{AD}

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	α, град	β, град	V_2, см/с	V_3, см/с
8	10	20	30	60	12	4
18	12	26	30	30	8	2
28	15	30	60	60	6	3

Рис. 2.7. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 5 – 8, 15 – 18, 25 – 28

Окончание вариантов задания К2

Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
 Найти: $\omega_{OK}, \omega_{KD}, \omega_{BC}, \omega_1,$ V_A, V_B, V_K, V_D	 Найти: $V_A, V_B, V_D, V_K, \omega_{CB}, \omega_1,$ $\omega_{OB}, \omega_{AB}, \omega_{KD}$

Номер варианта задания	R_1, см	r_1, см	α, град	β, град	BC, см	V_C, см/с	Номер варианта задания	R_1, см	CB, см	OB, см	KD, см	α, град	V_C, см/с
9	20	12	45	60	60	8	**10**	10	20	30	60	30	4
19	24	16	60	90	50	4	**20**	12	26	30	50	45	2
29	16	10	30	120	40	6	**30**	15	30	60	60	60	3

Рис. 2.8. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Пример выполнения задания К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Задача 1. Плоский механизм (рис. 2.9) состоит из стержня OC и подвижных дисков 2 и 3 радиусами r_2, r_3, шарнирно закрепленными на стержне, соответственно, в точках A и C. Стержень OC вращается вокруг неподвижного центра O с угловой скоростью ω_{OC}. Диск 2, увлекаемый стержнем OC, катится без проскальзывания по неподвижной поверхности диска 1 радиусом r_1. Диск 3, также увлекаемый стержнем OC, катится без проскальзывания по подвижному диску 2. В точке D, расположенной на краю диска 3, шарнирно прикреплен стержень 4, к которому в точке E шарнирно

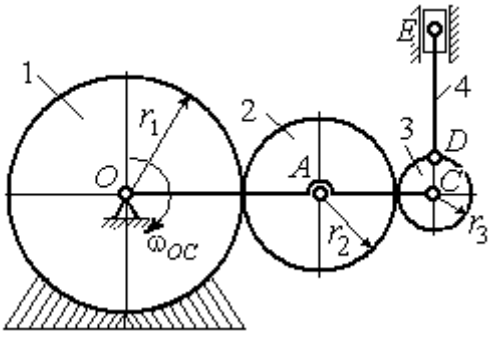


Рис. 2.9. Схема плоского механизма

прикреплен поршень *E*, способный совершать только вертикальное перемещение. Для заданного положения механизма (см. рис. 2.9), когда стержень *OC* горизонтален, стержень *DE* направлен по линии вертикального диаметра диска 3, найти скорости точек *A*, *C*, *D*, *E*, угловые скорости дисков 2, 3 и стержня 4, если: r_1 = 6 см, r_2 = 4 см, r_3 = 2 см, *DE* = 10 см, ω_{OC} = 1 рад/с.

Решение

Определим скорость точки *A*, общей для стержня *OC* и диска 2: $V_A = \omega_{OC}(r_1 + r_2)$ = 10 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ перпендикулярен стержню *OC* и направлен в сторону его вращения (рис. 2.10).

Диск 2 катится по неподвижной поверхности диска 1. Точка касания диска 2 с неподвижным диском 1 является мгновенным центром скоростей диска 2. На рис. 2.10 центр скоростей диска 2 обозначен точкой P_2. В этом случае скорость точки *A* может быть определена через угловую скорость диска ω_2 следующим образом: $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = 4\omega_2$. Так как V_A = 10 см/с, получим ω_2 = 2,5 рад/с.

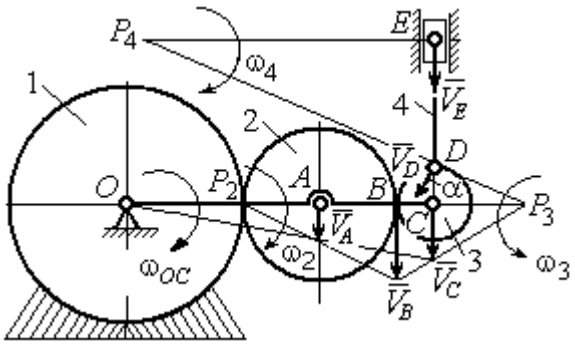


Рис. 2.10. Расчетная схема для определения скоростей точек механизма и угловых скоростей его звеньев

Для того чтобы найти угловую скорость диска 3, необходимо определить положение его мгновенного центра скоростей. С этой целью вычислим скорости точек *B* и *C*. Скорость точки *B* может быть найдена через угловую скорость диска 2: $V_B = \omega_2 \cdot BP_2$ = 20 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен отрезку BP_2 и направлен в сторону мгновенного вращения диска 2 вокруг своего центра скоростей P_2.

Скорость точки *C* определяется через угловую скорость стержня *OC*: $V_C = \omega_{OC}(r_1 + 2r_2 + r_3)$ = 16 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен стержню *OC* и направлен в сторону его вращения (см. рис. 2.10).

Построение мгновенного центра скоростей P_3 диска 3 по известным скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ показано на рис. 2.10. Его положение определяется из условия, что отношение скоростей двух точек тела, совершающего плоскопараллельное движение, равно отношению расстояний от этих точек до мгновенного центра скоростей: $\frac{V_B}{V_C} = \frac{r_3 + CP_3}{CP_3}$. Разрешая пропорцию относительно неизвестной величины CP_3, получим: $CP_3 = 8$ см. Скорость точки *C* выражается через угловую скорость диска 3 $V_C = \omega_3 \cdot CP_3$. Отсюда величина угловой скорости диска 3: $\omega_3 = \frac{V_C}{CP_3} =$ 2 рад/с. Направление мгновенного вращения диска 3 вокруг своего центра скоростей определяется известными направлениями скоростей точек *C* и *B*, принадлежащих диску 3 (см. рис. 2.10). Скорость точки *D* $V_D = \omega_3 \cdot DP_3 = = 2 \cdot \sqrt{2^2 + 8^2}$ = 16,5 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен отрезку DP_3 и направлен в сторону мгновенного вращения диска 3 вокруг центра P_3.

Для определения скорости поршня *E* воспользуемся теоремой о проекциях скоростей точек плоской фигуры, согласно которой проекции скоростей двух точек плоской фигуры на ось, проходящую через эти точки, равны между собой. Проведем ось через точки *D* и *E*. По построению, угол α между вектором $\vec{V}_D$ и осью *DE* равен углу $\angle DP_3C$ (см. рис. 2.10). Тогда, $\cos\alpha = \frac{CP_3}{DP_3} = \frac{8}{\sqrt{2^2 + 8^2}} = 0{,}97$, откуда $\alpha = 14^\circ$. На основании теоремы о проекциях скоростей точек плоской фигуры имеем равенство: $V_D \cos\alpha = V_E \cos 0$, откуда скорость точки *E*: V_E=16 см/с.

Мгновенный центр скоростей стержня 4 – точка P_4 – определяется как точка пересечения перпендикуляров к векторам скоростей $\vec{V}_D$ и $\vec{V}_E$, восстановленных, соответственно, из точек *D* и *E* (см. рис. 2.10). Угловая скорость стержня 4, совершающего мгновенный поворот вокруг своего центра скоростей, равна: $\omega_4 = \frac{V_E}{EP_4}$, где EP_4 – расстояние от точки *E* до мгновенного центра скоростей звена 4,

$EP_4 = DE \cdot \mathrm{ctg}\alpha$ = 40 см. В результате, ω_4 = 0,4 рад/с. Направление мгновенного вращения звена 4 вокруг своего центра скоростей определяется направлением скорости точки *D*.

Задача 2. В плоском стержневом механизме (рис. 2.11) кривошипы *OA* и *ED* вращаются вокруг неподвижных центров *O* и *E*. В крайней точке *D* кривошипа *ED* к нему прикреплён шатун *DB*, второй конец которого в точке *B* прикреплён к кривошипу *OA*. Шатун *AC* прикреплён в точке *A* к кривошипу *AO*, а другим своим концом – к ползуну *C*, способному совершать только вертикальное движение. Все соединения шарнирные. В заданном положении механизма кривошип *OA* вертикален, шатун *DB* расположен горизонтально, кривошип *ED* наклонен под углом 60° к горизонтали, а шатун *AC* отклонён на угол 30° от вертикального положения кривошипа *AO*. Найти скорости всех отмеченных на схеме точек и угловые скорости всех звеньев, если линейные размеры звеньев механизма *AC* = 6 см, *AB* = 2 см, *BO* = 8 см, *DB* = 10 см и скорость ползуна в данный момент V_C = 4 см/с.

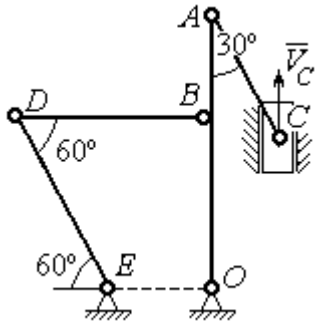


Рис. 2.11. Стержневой механизм

Решение

Кривошипы *OA* и *ED* совершают вращательные движения вокруг неподвижных центров. Скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ точек *A* и *B* перпендикулярны кривошипу *OA*, а скорость $\vec{V}_D$ точки *D* перпендикулярна кривошипу *ED*. Направления векторов скоростей точек показаны на рис. 2.12.

Шатун AC совершает плоскопараллельное движение. Его мгновенный центр скоростей P_1 находится как точка пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$. Угловая скорость звена AC равна $\omega_{AC} = \frac{V_C}{P_1C} = \frac{V_C}{AC \cdot \sin 30^\circ} = \frac{4}{3}$ рад/с. Далее, полагая, что точка A принадлежит шатуну AC, найдем её скорость:

$$V_A = \omega_{AC} \cdot P_1A = \frac{4}{3} AC \cdot \cos 30^\circ = 4\sqrt{3} \text{ см/с.}$$

Теперь, исходя из того, что точка A принадлежит как шатуну AC, так и кривошипу OA, найдём его угловую скорость: $\omega_{AO} = \frac{V_A}{AO} = 0{,}4\sqrt{3}$ рад/с. Скорость точки B кривошипа $V_B = \omega_{AO} \cdot OB = 3{,}2\sqrt{3}$ см/с.

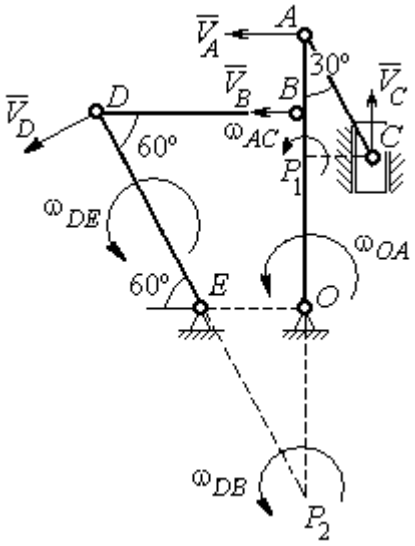


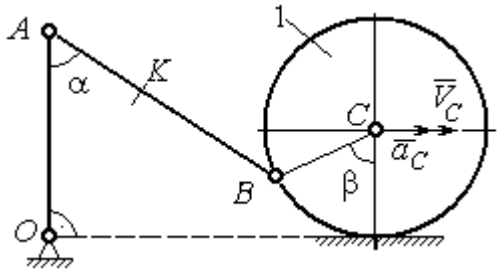
Рис. 2.12. Расчётная схема определения скоростей точек механизма и угловых скоростей его звеньев

Шатун DB совершает плоскопараллельное движение. Зная направления скоростей точек B и D, построим мгновенный центр скоростей P_2 звена DB как точку пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_D$ (см. рис. 2.12). Тогда, угловая скорость шатуна DB $\omega_{DB} = \frac{V_B}{P_2B} = \frac{3{,}2\sqrt{3}}{DB \cdot \operatorname{tg} 60^\circ} = 0{,}32$ рад/с. Скорость точки D $V_D = \omega_{DB} \cdot P_2D = 0{,}32 \frac{DB}{\sin 30^\circ} = 6{,}4$ см/с. Угловая скорость кривошипа DE $\omega_{DE} = \frac{V_D}{DE} = \frac{6{,}4}{(OB / \sin 60^\circ)} = 0{,}69$ рад/с.

2.6. Задание К3. Определение ускорений точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Для заданного положения плоского механизма определить ускорения точек звеньев механизма и угловые ускорения звеньев. Варианты заданий и исходные данные приведены на рис. 2.13 – 2.15.

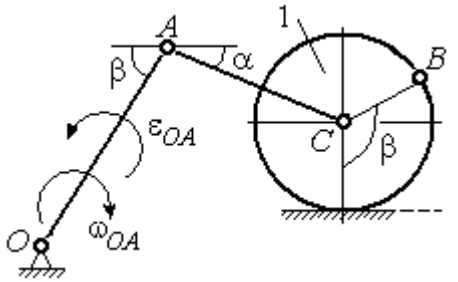
Варианты № 1, 11, 21



Найти: $a_A, a_K, \varepsilon_{AB}$

Номер варианта задания	AB, см	AK, см	α, град	β, град	R_1, см	V_C, см/с	a_C, см/с^2
1	16	10	60	120	10	12	6
11	20	16	30	60	8	10	8
21	18	10	60	180	6	8	4

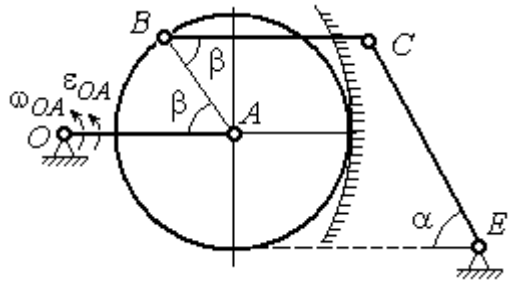
Варианты № 2, 12, 22



Найти: $a_C, a_B, \varepsilon_{AC}$

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	AC, см	α, град	β, град	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
2	5	10	12	30	60	2	4
12	8	24	20	30	120	1	2
22	6	12	15	60	90	2	3

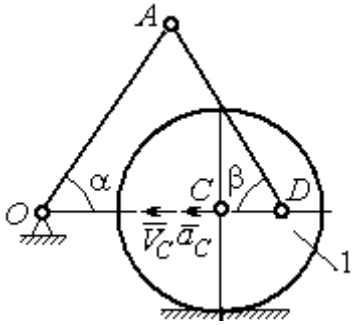
Варианты № 3, 13, 23



Найти: a_C, a_B, ε_{BC}

Номер варианта задания	BC, см	AO, см	α, град	β, град	R_1, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
3	16	15	60	90	10	2	3
13	18	12	90	60	8	3	2
23	14	12	30	120	10	2	4

Варианты № 4, 14, 24

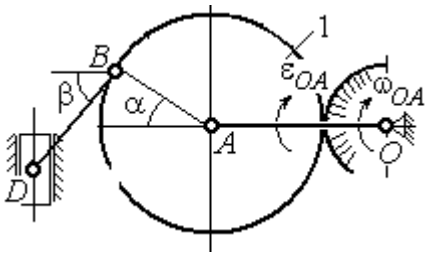


Найти: $a_A, a_D, \varepsilon_{DA}$

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	DC, см	α, град	β, град	V_C, см/с	a_C, см/с^2
4	10	28	5,78	60	30	10	2
14	8	24	4,62	30	90	8	3
24	6	20	6	45	45	12	2

Рис. 2.13. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

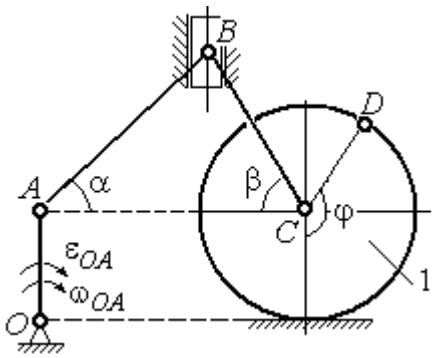
Варианты № 5, 15, 25



Найти: $a_D, a_B, \varepsilon_{BD}$

Номер варианта задания	OA, см	BD, см	α, град	β, град	R_1, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
5	16	10	60	30	10	4	3
15	18	8	90	45	12	2	4
25	14	12	30	60	8	3	2

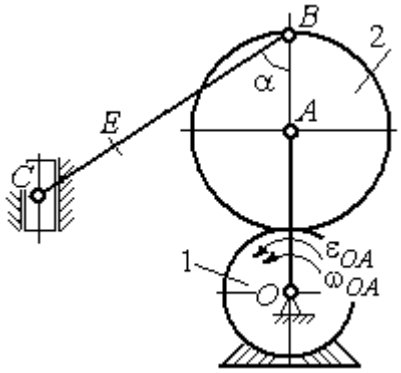
Варианты № 6, 16, 26



Найти: $a_B, a_D, \varepsilon_{BC}$

Номер варианта задания	R_1, см	AB, см	φ, град	α, град	β, град	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
6	6	18	60	30	30	2	3
16	8	20	90	60	30	2	4
26	5	16	120	30	60	3	4

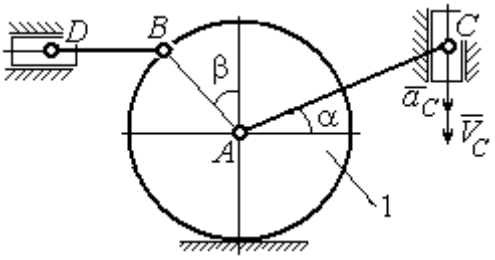
Варианты № 7, 17, 27



Найти: $a_E, a_C, \varepsilon_{BC}$

Номер варианта задания	BC, см	BE, см	α, град	R_1, см	R_2, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
7	22	10	60	2	10	2	3
17	28	15	30	3	6	3	4
27	20	8	45	4	8	2	2

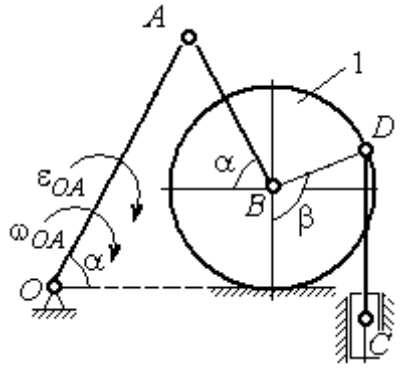
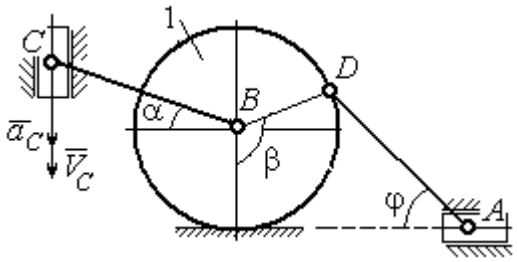
Варианты № 8, 18, 28



Найти: $a_D, a_B, \varepsilon_{BD}$

Номер варианта задания	R_1, см	BD, см	AC, см	α, град	β, град	V_C, см/с	a_C, см/с^2
8	4	5	12	60	60	12	5
18	6	10	16	45	90	10	8
28	8	8	16	30	120	8	6

Рис. 2.14. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 5 – 8, 15 – 18, 25 – 28

Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
 Найти: $a_C, a_B, \varepsilon_{AB}$	 Найти: $a_A, a_B, \varepsilon_{CB}$

Номер варианта задания	OA, см	DC, см	α, град	β, град	R_1, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2	Номер варианта задания	R_1, см	BC, см	φ, град	α, град	β, град	V_C, см/с	a_C, см/с^2
9	18	10	30	120	4	2	3	**10**	6	14	60	30	120	15	3
19	20	12	60	60	6	3	4	**20**	5	18	45	60	90	10	5
29	18	8	60	90	4	2	3	**30**	4	16	30	45	60	12	4

Рис. 2.15. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Примеры решения задания К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении

Задача 1. Ступенчатый барабан 1 с радиусами ступенек $R = 0{,}5$ м и $r = 0{,}3$ м катится окружностью малой ступеньки по горизонтальной поверхности без скольжения (рис. 2.16). Барабан приводится в движение шатуном AC, один конец которого соединён с центром барабана в точке A, а другой – с ползуном C, перемещающимся вертикально. В положении механизма, когда шатун AC отклонён от вертикали на угол 60°, найти ускорение точки B барабана, лежащей на его горизонтальном диаметре, если заданы скорость и ускорение ползуна C: $V_C = 9$м/с, $a_C = 4$ м/с^2.

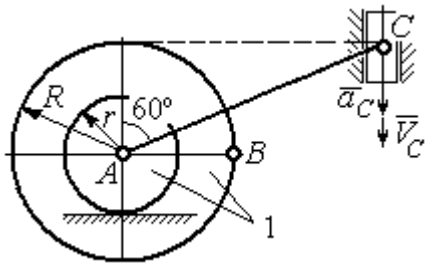


Рис. 2.16. Схема движения плоского механизма

Решение

Найдём угловые скорости ω_{AC}, ω_1 шатуна AC и барабана 1. Шатун совершает плоское движение. Его мгновенный центр скоростей P_2 находится на пересечении перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$ (рис. 2.17). По условию, скорость точки C направлена вертикально вниз. Точка A принадлежит как шатуну AC, так и барабану 1. При качении барабана по горизонтальной поверхности скорость его центра – точки A параллельна поверхности качения барабана.

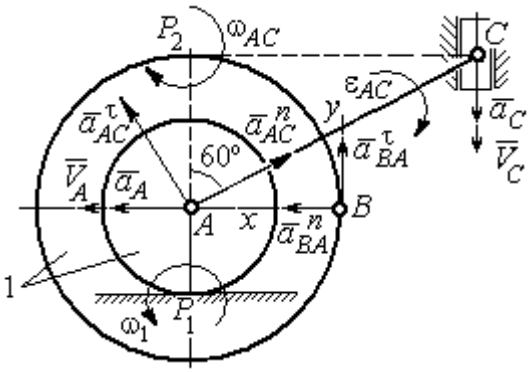


Рис. 2.17. Расчётная схема определения скоростей и ускорений точек механизма

Угловая скорость шатуна $\omega_{AC} = \dfrac{V_C}{CP_2} = \dfrac{9}{R\mathrm{tg}60^\circ} = 6\sqrt{3}$ рад/с. Скорость точки A шатуна $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_2 = 3\sqrt{3}$ м/с. Угловая скорость барабана 1 $\omega_1 = \dfrac{V_A}{AP_1} = 10\sqrt{3}$ рад/с. При расчёте угловой скорости барабана учтено, что качение барабана по неподвижной поверхности представляет собой плоское движение, при котором мгновенный центр скоростей находится в точке касания с поверхностью (в точке P_1 на рис. 2.17).

Выразим ускорение $\vec{a}_A$ точки A через полюс C на основании векторного равенства: $\vec{a}_A = \vec{a}_C + \vec{a}_{AC}^{\tau} + \vec{a}_{AC}^{n}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение точки C, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}_{AC}^{\tau}$, $\vec{a}_{AC}^{n}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки A при вращении шатуна AC вокруг полюса C. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_{AC}^{n}$ направлен вдоль шатуна AC от точки A к полюсу C и равен по величине $a_{AC}^{n} = \omega_{AC}^2 \cdot AC = (6\sqrt{3})^2 \cdot 2R = 108$ м/с^2. Вектор касательного ускорения $\vec{a}_{AC}^{\tau}$, модуль которого вычисляется по формуле $a_{AC}^{\tau} = \varepsilon_{AC} \cdot AC$, направлен перпендикулярно отрезку AC.

На данном этапе величина вектора касательного ускорения не может быть вычислена, поскольку угловое ускорение шатуна AC ε_{AC} неизвестно. На рис. 2.17 направление вектора касательного ускорения $\vec{a}_{AC}^{\tau}$ выбрано из предположения, что

вращение шатуна ускоренное и направление углового ускорения совпадает с направлением его угловой скорости.

Направление вектора $\vec{a}_A$ ускорения точки A определяется из того, что центр барабана движется по прямой, параллельной горизонтальной поверхности качения. На рис. 2.17 направление вектора ускорения $\vec{a}_A$ выбрано из предположения, что качение барабана ускоренное.

Выберем ось x вдоль линии AC (рис. 2.18) и спроектируем векторное равенство $\vec{a}_A = \vec{a}_C + \vec{a}^{\tau}_{AC} + \vec{a}^{n}_{AC}$ на эту ось. При таком выборе оси проекция неизвестного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{AC}$ обращается в нуль. Получим $a_A \cos 30^\circ = a_C \cos 60^\circ - a^n_{AC}$. Отсюда найдём ускорение центра барабана $a_A = \dfrac{1}{\cos 30^\circ}\left(a_C \cos 60^\circ - a^n_{AC}\right) = -122{,}4$ м/с^2. Отрицательное значение ускорения точки A означает, что на рис. 2.17, 2.18 вектор ускорения $\vec{a}_A$ должен иметь противоположное направление. Таким образом, вектор ускорения $\vec{a}_A$ направлен в сторону, противоположную вектору скорости $\vec{V}_A$, и движение барабана замедленное.

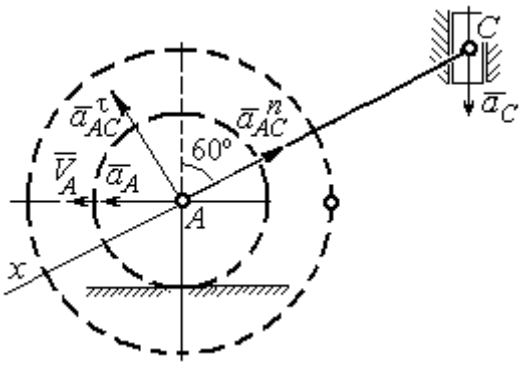


Рис. 2.18. Схема для определения ускорения центра барабана

Для того чтобы найти ускорение точки B, выразим его через полюс A на основании векторного равенства $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение точки A, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}^{\tau}_{BA}$, $\vec{a}^{n}_{BA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки B при вращении барабана вокруг полюса A.

Модуль вектора нормального ускорения $\vec{a}^{n}_{BA}$ равен по величине $a^n_{BA} = \omega_1^2 \cdot BA = (10\sqrt{3})^2 \cdot R = 150$ м/с^2. Вектор направлен вдоль радиуса барабана от точки B к полюсу A (см. рис. 2.17).

Модуль вектора касательного ускорения $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ вычисляется по формуле $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_1 \cdot BA$, где ε_1 – угловое ускорение барабана. Значение углового ускорения катящегося барабана (в отличие от углового ускорения ε_{AC} шатуна AC) может быть найдено. Расчёт основан на том, что при движении барабана расстояние AP_1 от точки A до центра скоростей барабана P_1 остаётся постоянным, равным r. Тогда выражение $V_A = \omega_1 \cdot AP_1 = \omega_1 \cdot r$ для расчёта скорости точки A можно продифференцировать. Получим $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_1}{dt} \cdot r$. Так как точка A движется по прямой, производная от скорости точки равна её полному ускорению, а производная от угловой скорости барабана равна его угловому ускорению. Тогда имеем: $a_A = \varepsilon_1 \cdot r$, откуда находим угловое ускорение $\varepsilon_1 = \frac{a_A}{r} = 40{,}8$ рад/с^2, а затем и модуль вектора касательного ускорения $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_1 \cdot BA = 20{,}4$ м/с^2.

Заметим, что для вычисления углового ускорения ε_{AC} шатуна AC подобные рассуждения неприменимы. Формулу $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_2$ невозможно продифференцировать, так как при движении механизма расстояние AP_2 от точки A до центра скоростей P_2 шатуна AC является неизвестной функцией времени.

Выберем систему координат xBy как показано на рис. 2.17, и спроецируем на эти оси векторное равенство $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{BA} + \vec{a}^{n}_{BA}$. Полагая, что движение барабана ускоренное (т. е. вектора ускорений $\vec{a}_A$ и $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ направлены, как показано на рис. 2.17), получим значения составляющих ускорения точки B: $a_{Bx} = a_A + a^{n}_{BA}$, $a_{By} = a^{\tau}_{BA}$. Подставляя значения ускорений, найдём $a_{By} = 20{,}4$ м/с^2, $a_{Bx} = -122{,}4 + 150 = 27{,}6$ м/с^2. Вектор полного ускорения точки B направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_{Bx}$, $\vec{a}_{By}$. Величина ускорения точки B: $a_B = \sqrt{a^2_{Bx} + a^2_{By}} = 34{,}32$ м/с^2.

Задача 2. В плоском механизме (рис. 2.19) кривошип *OA* вращается вокруг оси *O* с угловой скоростью ω_{OA} и угловым ускорением ε_{OA}. Диск 2, шарнирно присоединённый к кривошипу в точке *A*, катится без проскальзывания по неподвижному диску 1. Радиусы дисков R_1 и R_2. На краю диска 2 в точке *B* шарнирно прикреплен стержень *BC*, соединенный с центром *C* диска 3. Радиус диска 3 равен радиусу диска 2: $R_3 = R_2$. Диск 3 катится без скольжения по горизонтальной поверхности, по прямой. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.19, определить ускорение точки *D* и угловое ускорение стержня *BC*, если $\omega_{OA} = 4$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с^2, $R_1 = 4$ см, $R_2 = 8$ см. Длина стержня $BC = 20$ см.

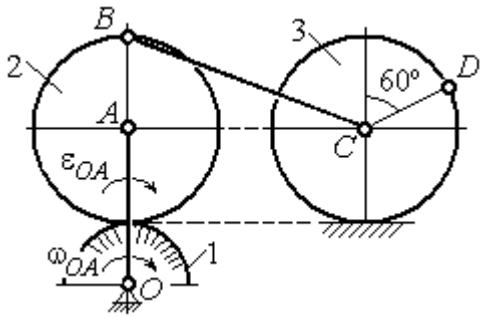


Рис. 2.19. Схема движения плоского механизма

Решение

Определение угловых скоростей звеньев механизма.

Рассмотрим вращательное движение кривошипа *OA*. Скорость точки *A*: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 48$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу *OA* в сторону движения кривошипа (рис. 2.20).

При движении диска 2 точка P_2 соприкосновения второго диска с неподвижным первым является мгновенным центром скоростей диска 2. Угловая скорость диска 2: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = \dfrac{48}{8} = 6$ рад/с.

Скорость точки *B* диска 2: $V_B = \omega_2 BP_2 = 6 \cdot 16 = 96$ см/с.

Для определения угловой скорости стержня BC заметим, что скорости двух точек стержня $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ параллельны, но точки B и C не лежат на общем перпендикуляре к скоростям. В этом случае мгновенный центр скоростей стержня BC отсутствует (бесконечно удалён), угловая скорость стержня равна нулю: $\omega_{BC} = 0$, а стержень совершает мгновенное поступательное движение. В результате имеем: $V_C = V_B = 96$ см/с.

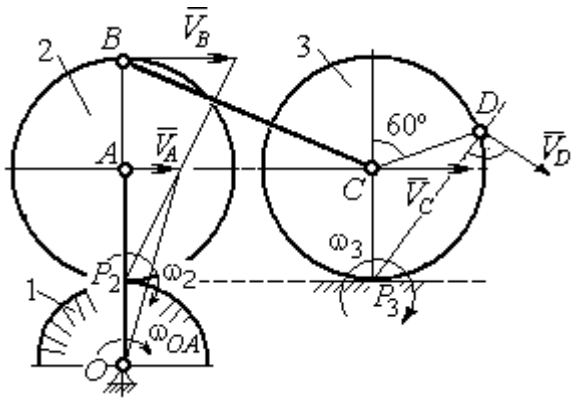


Рис. 2.20. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

При качении диска 3 по неподвижной поверхности без проскальзывания точка P_3 касания его с поверхностью является мгновенным центром скоростей. Тогда угловая скорость диска 3: $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} = 12$ рад/с. Скорость точки D диска 3: $V_D = \omega_3 \cdot DP_3$. Величину DP_3 находим из треугольника P_3DC. В результате $DP_3 = 2R_3\cos 30^\circ = 13{,}8$ см и $V_D = 165{,}6$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ направлен в сторону движения диска 3 перпендикулярно линии DP_3 и (см. рис. 2.20).

Определение ускорений точек механизма.

Представим ускорение $\vec{a}_C$ точки C векторной суммой $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение точки B, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки C при вращении стержня BC вокруг полюса B, $a^n_{CB} = \omega^2_{CB} \cdot CB$, $a^\tau_{CB} = \varepsilon_{CB} \cdot CB$.

Нормальная составляющая ускорения точки C $a^n_{CB} = 0$, так как стержень CB совершает мгновенное поступательное движение и $\omega_{BC} = 0$.

Направление касательной составляющей $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ неизвестно, так как неизвестно направление углового ускорения стержня ε_{CB}. Для определённости выберем направление углового ускорения стержня *BC* в сторону против хода часовой стрелки. На рис. 2.21 это направление показано дуговой стрелкой ε_{CB}.

В соответствии с выбранным направлением углового ускорения вектор $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ строится перпендикулярно линии стержня *BC* в сторону углового ускорения ε_{CB} (см. рис. 2.21).

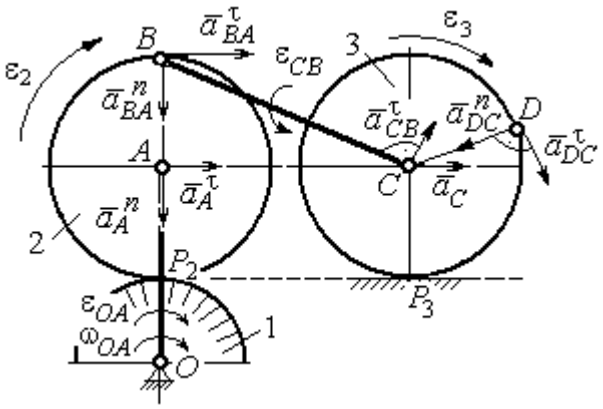


Рис. 2.21. Расчетная схема для определения ускорений точек механизма и угловых ускорений его звеньев

Выразим ускорение точки *B* через полюс *A*: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса *A*; $\vec{a}^{n}_{BA}$, $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки *B* при вращении диска 2 вокруг полюса *A*. Величина нормальной составляющей ускорения точки *B* $a^{n}_{BA} = \omega_2^2 \cdot BA = 288$ см/с^2. Вектор $\vec{a}^{n}_{BA}$ направлен вдоль радиуса *BA* от точки *B* к полюсу *A* (см. рис. 2.21). Касательное ускорение точки *B* при вращении диска 2 вокруг полюса *A* вычисляется по формуле $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_2 \cdot BA$. Для определения углового ускорения ε_2 диска 2 заметим, что во время движения диска 2 расстояние AP_2 остается постоянным, равным R_2. Дифференцируя равенство $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = \omega_2 R_2$, получим: $\dfrac{dV_A}{dt} = \dfrac{d\omega_2}{dt} R_2$, или $a^{\tau}_A = \varepsilon_2 R_2$, откуда $\varepsilon_2 = \dfrac{a^{\tau}_A}{R_2}$.

Для того чтобы найти величину a^{τ}_A, рассмотрим вращательное движение кривошипа *OA* вокруг неподвижной оси *O*. Ускорение точки *A* представляется в виде векторного равенства $\vec{a}_A = \vec{a}^{n}_A + \vec{a}^{\tau}_A$, где $\vec{a}^{n}_A$ и $\vec{a}^{\tau}_A$ – известные нормальная и касательная составляющие ускорения точки *A* кривошипа *OA*:

$a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA = 192$ см/с^2, $a_A^\tau = \varepsilon_{OA} \cdot OA = 24$ см/с^2. Направления векторов нормального ускорения $\vec{a}_A^{\,n}$ и касательного ускорения $\vec{a}_A^{\,\tau}$ показаны на рис. 2.21.

Теперь найдём величину углового ускорения диска 2 и модуль касательного ускорения a_{BA}^τ точки B при вращении диска 2 вокруг полюса A: $\varepsilon_2 = \dfrac{a_A^\tau}{R_2} =$ $= 3$ рад/с^2, $a_{BA}^\tau = \varepsilon_2 \cdot BA = 24$ см/с^2.

Для определения ускорения точки C имеем векторное равенство $\vec{a}_C = \vec{a}_A^{\,n} + \vec{a}_A^{\,\tau} + \vec{a}_{BA}^{\,n} + \vec{a}_{BA}^{\,\tau} + \vec{a}_{CB}^{\,\tau}$. Выберем оси Cx, Cy, как показано на рис. 2.22, – вдоль отрезка BC и перпендикулярно ему и спроецируем на них имеющееся векторное равенство. Получим:

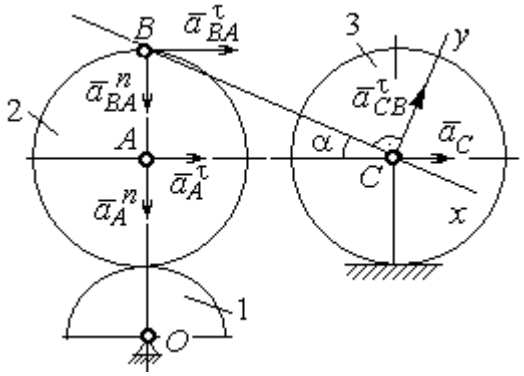


Рис. 2.22. Расчетная схема для вычисления ускорения точки С

$$a_C \cos\alpha = a_A^n \sin\alpha + a_A^\tau \cos\alpha + a_{BA}^n \sin\alpha + a_{BA}^\tau \cos\alpha;$$

$$a_C \sin\alpha = a_A^n \cos\alpha + a_A^\tau \sin\alpha + a_{BA}^n \cos\alpha + a_{BA}^\tau \sin\alpha + a_{CB}^\tau,$$

где α – угол между стержнем BC и линией центров AC; $\sin\alpha = \dfrac{AB}{BC} = 0{,}4$; $\cos\alpha = 0{,}92$. Решая систему, найдём: $a_C = 256{,}7$ см/с^2, $a_{CB}^\tau = -358{,}12$ см/с^2.

Модуль углового ускорения стержня BC: $\varepsilon_{CB} = \dfrac{\left|a_{CB}^\tau\right|}{BC} = 17{,}9$ рад/с^2.

Знак «минус» величины a_{CB}^τ означает, что вектор касательного ускорения $\vec{a}_{CB}^{\,\tau}$ на рис. 2.21 – 2.22 следует направить в противоположную сторону. Направление углового ускорения стержня BC, показанное на рис. 2.21 дуговой стрелкой ε_{CB}, также следует заменить на противоположное.

Выразим ускорение точки *D* через полюс *C*: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^n_{DC} + \vec{a}^\tau_{DC}$, где $\vec{a}_C$ – известное ускорение точки *C*; $\vec{a}^n_{DC}$, $\vec{a}^\tau_{DC}$ – нормальное и касательное составляющие ускорения точки *D* при вращении диска 3 вокруг полюса *C*. Величина нормального ускорения точки *D*: $a^n_{DC} = \omega_3^2 \cdot DC = 1152$ см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}^n_{DC}$ направлен по радиусу от точки *D* к полюсу *C* (рис. 2.23).

Для расчёта касательной составляющей a^τ_{DC} ускорения точки *D* найдём угловое ускорение диска 3. Продифференцируем по времени равенство $V_C = \omega_3 \cdot CP_3 = \omega_3 R_3$. Получим: $\frac{dV_C}{dt} = \frac{d\omega_3}{dt} R_3$, или $a_C = \varepsilon_3 R_3$. Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3 = \frac{a_C}{R_3} = 32{,}09$ рад/с^2. Тогда величина касательной составляющей ускорения точки *D*: $a^\tau_{DC} = \varepsilon_3 \cdot DC = 256{,}7$ см/с^2. Направление вектора $\vec{a}^\tau_{DC}$ соответствует ускоренному движению диска 3.

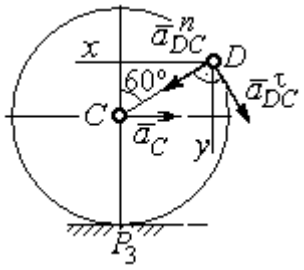


Рис.2.23. Расчетная схема для определения ускорения точки *D*

Проведём оси *Dx* и *Dy*, как показано на рис. 2.23, и спроецируем векторное равенство ускорения точки *D* на оси:

$$a_{Dx} = -a_C + a^n_{DC}\cos 30^\circ - a^\tau_{DC}\cos 60^\circ, \quad a_{Dy} = a^n_{DC}\cos 60^\circ + a^\tau_{DC}\cos 30^\circ.$$

Решая систему, находим значения проекций модуля ускорения $a_{Dx} = 612{,}5$ см/с^2, $a_{Dy} = 798{,}3$ см/с^2. Величина ускорения точки *D*:

$$a_D = \sqrt{a^2_{Dx} + a^2_{Dy}} = 1006{,}2 \text{ см/с}^2.$$

3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

3.1. Основные понятия сложного движения точки

В неподвижной системе координат рассматривается подвижное твердое тело и точка, перемещающаяся относительно тела.

Траектория точки в её движении относительно тела называется **относительной траекторией.** Скорость точки в этом движении называют **относительной скоростью**, ускорение – **относительным ускорением**.

Траектория точки, перемещающейся вместе с телом, называется переносной траекторией точки, скорость точки при таком её движении – **переносной скоростью**, а ускорение – **переносным ускорением**.

Суммарное движение точки вместе с телом и относительно тела называется **сложным движением**. Траектория точки относительно неподвижной системы координат называется **абсолютной траекторией точки**, скорость и ускорение – **абсолютной скоростью и абсолютным ускорением.**

При вычислении абсолютной скорости используется теорема о сложении скоростей: **при сложном движении абсолютная скорость точки равна геометрической сумме относительной и переносной скоростей:** $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$, где $\vec{V}$, $\vec{V}_e$, $\vec{V}_r$ – вектора абсолютной, переносной и относительной скоростей точки.

В случае, когда относительное движение точки задается естественным способом в виде закона изменения пути $S = S(t)$, величина относительной скорости точки равна модулю производной: $V_r = \left|\dot{S}_r\right|$. Если переносное движение точки есть вращение тела вокруг неподвижной оси, скорость точки в переносном движении будет: $V_e = \omega_e h_e$, где ω_e – величина угловой скорости вращения тела; h_e – кратчайшее расстояние от места положения точки на теле до оси вращения тела.

При вычислении абсолютного ускорения используется теорема Кориолиса о сложении ускорений: **при сложном движении абсолютное ускорение точки равно геометрической сумме трех ускорений – относительного, переносного и ускорения Кориолиса** $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_к$, где $\vec{a}$ – вектор абсолютного ускорения точки; $\vec{a}_e, \vec{a}_r$ – вектора соответственно переносного и относительного ускорений точки; $\vec{a}_к$ – вектор ускорения Кориолиса. (Иногда его называют поворотным ускорением.)

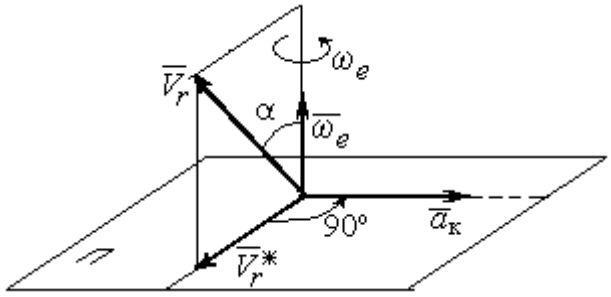


Рис. 3.1. Определение направления ускорения Кориолиса по правилу Жуковского

Вектор ускорения Кориолиса определяется векторным произведением $\vec{a}_к = 2(\vec{\omega}_e \times \vec{V}_r)$, где $\vec{\omega}_e$ – вектор угловой скорости переносного движения; $\vec{V}_r$ – вектор относительной скорости точки. Модуль ускорения Кориолиса: $|\vec{a}_к| = 2|\vec{\omega}_e| \cdot |\vec{V}_r| \sin\alpha$, где α – угол между вектором угловой скорости переносного движения и вектором относительной скорости точки (см. рис. 3.1). Направление вектора ускорения Кориолиса может быть получено по правилу построения вектора векторного произведения.

На рис. 3.1 показана последовательность выбора направления вектора ускорения Кориолиса по правилу Н. Е. Жуковского. Правило состоит в следующем: пусть имеется точка, движущаяся с относительной скоростью $\vec{V}_r$. Построим плоскость П, перпендикулярную вектору переносной угловой скорости $\vec{\omega}_e$, и спроецируем вектор $\vec{V}_r$ на эту плоскость. Проекцию обозначим $\vec{V}_r^*$ (см. рис. 3.1). Чтобы получить направление ускорения Кориолиса, следует вектор проекции относительной скорости $\vec{V}_r^*$ повернуть на 90° в плоскости П вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Если сложное движение точки происходит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, направление ускорения Кориолиса можно получить

простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Относительное ускорение $\vec{a}_r$ представляется как сумма векторов относительного касательного $\vec{a}_r^{\tau}$ и относительного нормального $\vec{a}_r^{n}$ ускорений: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n}$. Переносное ускорение точки $\vec{a}_e$ тела имеет своими составляющими переносное касательное $\vec{a}_e^{\tau}$ и переносное нормальное $\vec{a}_e^{n}$ ускорения так, что $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n}$.

Таким образом, абсолютное ускорение точки в сложном движении можно представить в виде векторного равенства

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n} + \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

Модули относительного касательного и относительного нормального ускорений при естественном способе задания относительного движения точки равны: $a_r^{\tau} = \left|\dot{V}_r\right|$, $a_r^{n} = \dfrac{V_r^2}{\rho}$, где ρ – радиус кривизны относительной траектории. При движении точки по окружности радиус кривизны равен радиусу окружности, при движении по прямой – бесконечности, и в этом случае $a_r^{n} = 0$.

При вращательном переносном движении точки значения переносного касательного и нормального ускорений вычисляются по формулам: $a_e^{\tau} = \varepsilon_e h_e$, $a_e^{n} = \omega_e^2 h_e$, где ε_e – угловое ускорение вращательного переносного движения, $\varepsilon_e = \left|\dot{\omega}_e\right|$; h_e – расстояние от точки до оси вращения тела; ω_e – величина угловой скорости вращения тела.

Вектора ускорений строятся по общим правилам построения векторов нормального и касательного ускорений.

При поступательном переносном движении ускорение Кориолиса и переносное нормальное ускорение равны нулю: $a_{\text{к}} = 0$, $a_e^{n} = 0$. Абсолютное ускорение точки при поступательном переносном движении можно представить в виде векторного равенства $\vec{a} = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n} + \vec{a}_e^{\tau}$.

3.2. Задание К4. Определение скорости и ускорения точки при сложном движении

Задание включает две задачи с вращательным и поступательным видами переносного движения точки.

Задача 1. Вращение тела относительно неподвижной оси задается законом изменения угла поворота: $\varphi_e = \varphi_e(t)$ или законом изменения его угловой скорости: $\omega_e = \omega_e(t)$. Движение точки относительно тела отсчитывается от её начального положения в точке C и задается законом изменения длины дуги окружности или отрезка прямой линии: $CM = S_r = S_r(t)$.

Определить абсолютные скорость и ускорение точки в заданный момент времени t_1.

Задача 2. Поступательное движение тела, несущего точку, задается законом изменения координаты $x_e = x_e(t)$. Движение точки относительно тела отсчитывается от её начального положения в точке C и задается законом изменения длины дуги окружности или отрезка прямой линии: $CM = y_r = y_r(t)$.

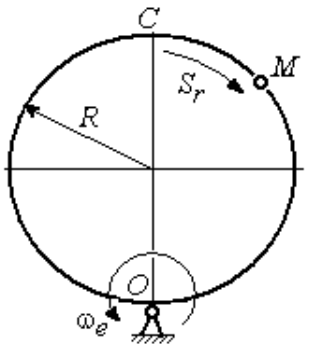
Определить абсолютные скорость и ускорение точки в момент времени t_2, который либо задаётся в исходных данных задачи, либо на схемеописаны условия, из которых он находится.

Номера вариантов заданий даны на рис. 3.2 – 3.5.

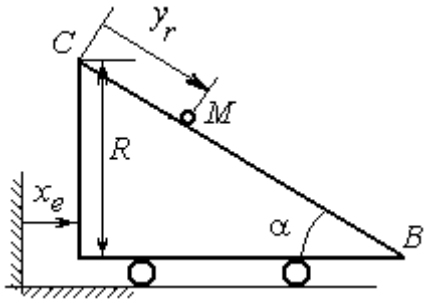
Варианты исходных данных приведены в табл. 3.1.

Варианты № 1, 11, 21

Задача 1



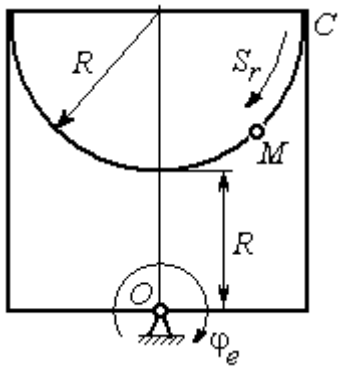
Задача 2



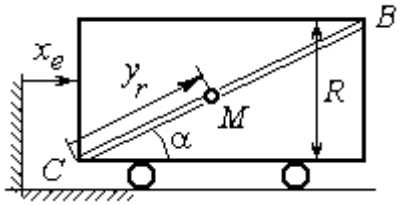
В момент $t = t_2$ точка M прошла половину пути CB

Варианты № 2, 12, 22

Задача 1



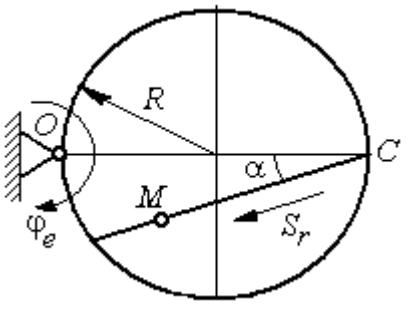
Задача 2



В момент $t = t_2$ точка M прошла 2/3 пути CB

Варианты № 3, 13, 23

Задача 1



Задача 2

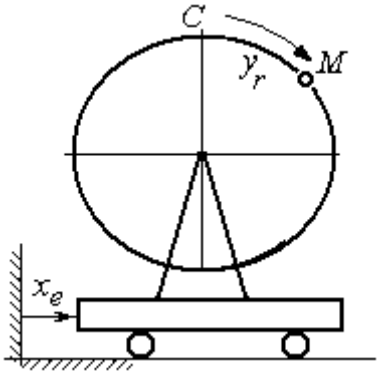
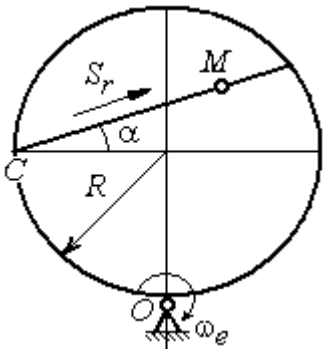


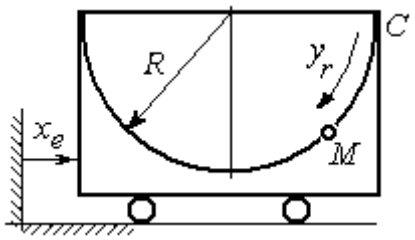
Рис. 3.2. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

Варианты № 4, 14, 24

Задача 1

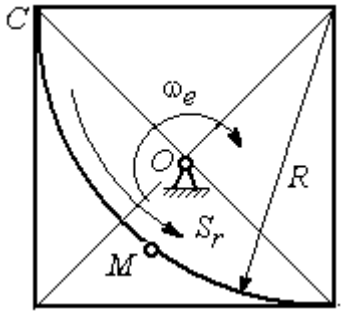


Задача 2

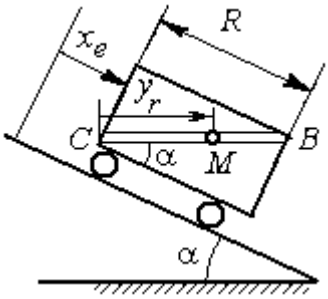


Варианты № 5, 15, 25

Задача 1



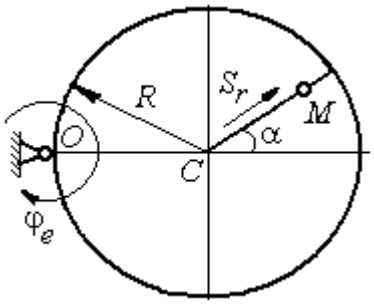
Задача 2



В момент $t = t_2$ точка *M* прошла путь *CB*

Варианты № 6, 16, 26

Задача 1



Задача 2

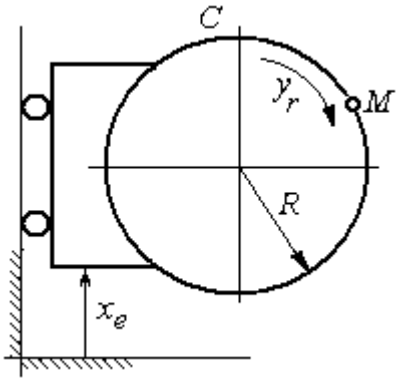
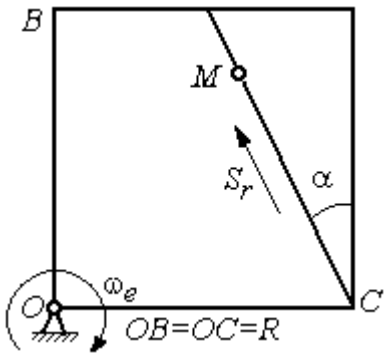


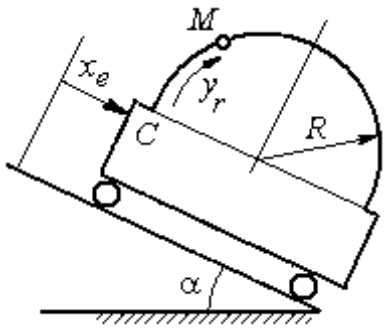
Рис. 3.3. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 4 – 6, 14 – 16, 24 – 26

Варианты № 7, 17, 27

Задача 1

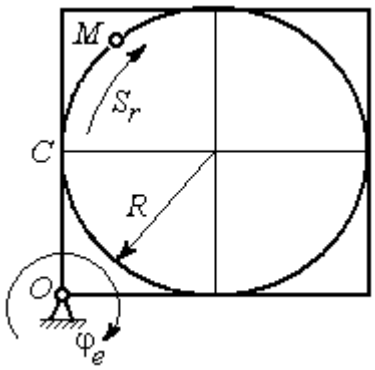


Задача 2

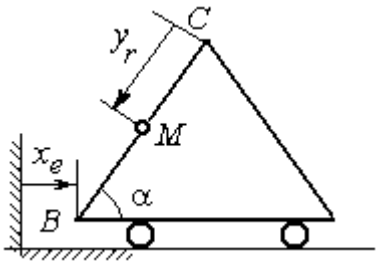


Варианты № 8, 18, 28

Задача 1



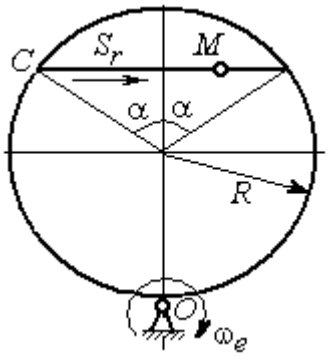
Задача 2



В момент $t = t_2$ точка M прошла половину пути $CB = R$

Варианты № 9, 19, 29

Задача 1



Задача 2

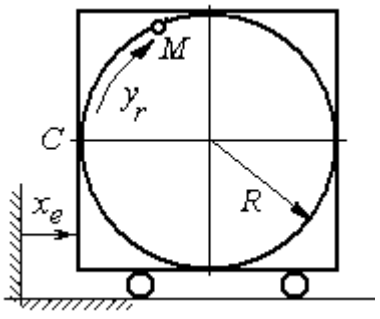


Рис. 3.4. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

Окончание вариантов задания К4

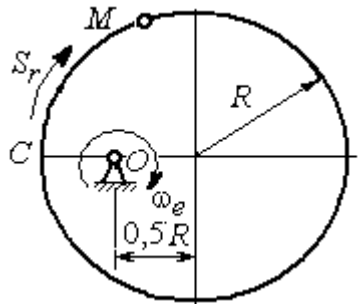
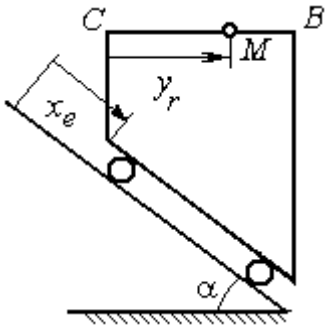
Варианты № 10, 20, 30	
Задача 1	Задача 2
	 В момент $t = t_2$ точка M прошла половину пути $CB = R$

Рис. 3.5. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 10, 20, 30

Таблица 3.1

Исходные данные для заданий по сложному движению точки

Номер варианта задания	Номер задачи	R, см	α, град	$C\breve{M} = S_r(t)$, см $C\breve{M} = y_r(t)$, см	$\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с $x_e(t)$, см	t_1, с t_2, с
1	1	3	–	$S_r = 2\pi\sin(\pi t/6)$	$\omega_e = 4t^2$	1
	2	4	30	$y_r = 4t^2$	$x_e = 2\cos(\pi t/6)$	–
2	1	2	–	$S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/6)$	$\varphi_e = 6\cos(\pi t/3)$	1
	2	3	60	$y_r = t^2 + t$	$x_e = 1 + \cos(\pi t)$	–
3	1	4	30	$S_r = 2\sqrt{3}\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$	$\varphi_e = 4t - t^2$	1
	2	6	–	$y_r = \pi\left[2t + \sin\pi t\right]$	$x_e = 5t - t^2$	1
4	1	4	60	$S_r = 2(t^3 + t)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	3	–	$y_r = \pi\left[2t + \cos(\pi t/2)\right]$	$x_e = t^3 - 4t$	1
5	1	6	–	$S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/6)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/3)$	1
	2	2	30	$y_r = t^2 + 2t$	$x_e = t^2 - 4t$	–
6	1	6	60	$S_r = t + 10\sin(\pi t/6)$	$\varphi_e = 2t^2 - 5t$	1
	2	3	–	$y_r = 4\pi\sin(\pi t/6)$	$x_e = \left[1 - \cos(\pi t/4)\right]$	1
7	1	8	30	$S_r = 2(t^3 + 3t)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	4	30	$y_r = 2\pi t^2$	$x_e = t^3 - 5t$	1

Продолжение табл. 3.1

Номер варианта задания	Номер задачи	R, см	α, град	$C\breve{M} = S_r(t)$, см $C\breve{M} = y_r(t)$, см	$\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с $x_e(t)$, см	t_1, с t_2, с
8	1	8	–	$S_r = 2\pi\left[t^2 + \sin\pi t\right]$	$\varphi_e = t^2 - 5t$	2
	2	6	30	$y_r = t(t+1)$	$x_e = \cos\pi t$	–
9	1	8	30	$S_r = 2t^2$	$\omega_e = \cos(\pi t/8)$	2
	2	3	–	$y_r = 4\pi\sin^2(\pi t/4)$	$x_e = (3-2t)^2$	1
10	1	6	–	$S_r = \pi(2t^3 + \sin\pi t)$	$\omega_e = 5t - 2t^3$	1
	2	4	30	$y_r = t^2 + 2t$	$x_e = 1 + \cos\pi t$	–
11	1	6	–	$S_r = 8\pi\sin(\pi t/12)$	$\omega_e = 2 + \cos(\pi t/4)$	2
	2	6	60	$y_r = 4\sin\pi t$	$x_e = t^2 - 2t$	–
12	1	18	–	$S_r = \pi(2t^2 + 2t)$	$\varphi_e(t) = 3t - t^2$	2
	2	6	30	$y_r = 2t^2 + t$	$x_e = 1 + \cos(\pi t)$	–
13	1	10	60	$S_r = t^3 + t$	$\varphi_e = 6\cos(\pi t/6)$	2
	2	6	–	$y_r = 6\pi\cos(\pi t/3)$	$x_e = t(t+1)$	1
14	1	4	30	$S_r = 8\sqrt{3}\sin(\pi t/12)$	$\omega_e = (3-2t)^2$	2
	2	3	–	$y_r = 2\pi\sin(\pi t/6)$	$x_e = 2t^2 - 5t$	1
15	1	8	–	$S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/4)$	$\omega_e = 2 + \cos(\pi t/4)$	1
	2	5	60	$y_r = 5t + t^2$	$x_e = \cos(\pi t/6)$	–
16	1	12	90	$S_r = 3\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$	$\varphi_e = 2t - 3t^2$	1
	2	15	–	$y_r = \pi(4t + t^2)$	$x_e = 6\sin(\pi t/3)$	1
17	1	6	45	$S_r = 3\sqrt{2}\left[t^2 + 2\sin\pi t\right]$	$\omega_e(t) = 4t^2 - 6$	1
	2	6	60	$y_r = 8\pi\sin(\pi t/12)$	$x_e = \sqrt{2}\sin(\pi t/8)$	2
18	1	8	–	$S_r = 4\pi\sqrt{2}\sin(\pi t/8)$	$\varphi_e = 18t - 4t^2$	2
	2	8	60	$y_r = 3t + 2t^2$	$x_e = \sin\pi t$	–
19	1	8	60	$S_r = 2\sqrt{3}\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$	$\omega_e = 5t - t^2$	1
	2	9	–	$y_r = 6\pi\cos(\pi t/3)$	$x_e = \cos(\pi t/6)$	1
20	1	4	–	$S_r = 4\pi\sin(\pi t/6)$	$\omega_e = 3t - 5$	1
	2	6	60	$y_r = 3t + 2t^2$	$x_e = \pi\sin\pi t$	–
21	1	3	–	$S_r = 4\pi\sqrt{2}\sin(\pi t/8)$	$\omega_e = 6t - 14$	2
	2	8	45	$y_r = (t^2 + 3t)$	$x_e = t + 2\sin\pi t$	–

Окончание табл. 3.1

Номер варианта задания	Номер задачи	R, см	α, град	$C\breve{M} = S_r(t)$, см $C\breve{M} = y_r(t)$, см	$\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с $x_e(t)$, см	t_1, с t_2, с
22	1	4	–	$S_r = 2\pi(t^2 + 2t)$	$\varphi_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	9	60	$y_r = 8\sin\pi t$	$x_e = 5t - t^2$	–
23	1	6	45	$S_r = 12\sin(\pi t/8)$	$\varphi_e = t^2 + \cos(\pi t/4)$	2
	2	6	–	$y_r = 6\pi[t + \sin(\pi t/6)]$	$x_e = 5t - t^2$	1
24	1	6	45	$S_r = 12\sin(\pi t/8)$	$\omega_e = t + 4\cos(\pi t/4)$	2
	2	6	–	$y_r = \pi(t^2 + 2t)$	$x_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
25	1	6	–	$S_r = 2\pi t^2$	$\omega_e = 3\sin(\pi t/3)$	1
	2	4	45	$y_r = 2t(t + 3t)$	$x_e = 2(t^3 - 3t)$	–
26	1	6	120	$S_r = t^2 + t$	$\varphi_e = 12\cos(\pi t/12)$	2
	2	9	–	$y_r = \pi\sqrt{3}\sin(\pi t/3)$	$x_e = 2(t^2 - 3t)$	1
27	1	10	60	$S_r = \sqrt{3}(t^2 + t)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$	2
	2	9	30	$y_r = \sqrt{3}\pi\sin(\pi t/3)$	$x_e = t + 4\cos(\pi t/4)$	1
28	1	2	–	$S_r = 6\pi\sin(\pi t/6)$	$\varphi_e = 2t + \cos(\pi t/2)$	1
	2	6		$y_r = 2t + 3t^2$	$x_e = t + \sin\pi t$	–
29	1	8	30	$S_r = (t^2 + 2t)$	$\omega_e = 6\sin(\pi t/12)$	2
	2	3	–	$y_r = 2\pi\sqrt{3}\sin(\pi t/3)$	$x_e = 5t - t^2$	1
30	1	2	–	$\pi(t^2 + 2t)$	$\omega_e(t) = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	3	60	$y_r = t + t^2$	$x_e = t + \sin\pi t$	–

Пример выполнения задания К4. Сложное движение точки

Задача 1. Фигура, состоящая из половины диска и равнобедренного треугольника (рис. 3.6), вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости фигуры и проходящей через вершину *A* треугольника. Вращательное движение задается законом изменения угла поворота фигуры $\varphi_e = 5t - 2t^2$ рад.

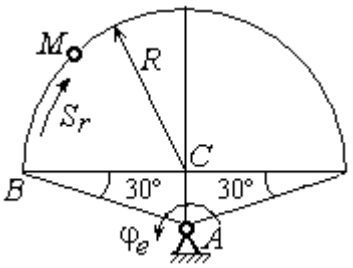


Рис. 3.6. Схема сложного движения точки

Положительное направление вращения отмечено на схеме дуговой стрелкой φ_e. По ободу диска от точки *B* движется точка *M*. Движение точки относительно диска задается законом изменения длины дуги окружности: $\overset{\cup}{BM} = S_r = 9\pi t^2$ см. Положительное направление движения точки *M* на рис. 3.6 показано дуговой стрелкой S_r. Радиус диска R = 9 см.

Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки *M* в момент времени t_1 = 1с.

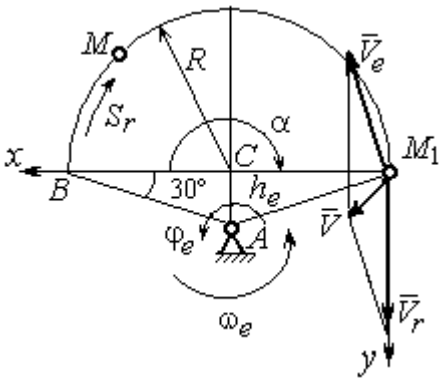


Рис. 3.7. Расчетная схема для вычисления абсолютной скорости точки при сложном движении

Решение

Вращение фигуры будет для точки *M* переносным движением. Относительное движение точки *M* – её движение по окружности обода диска.

Для определения **положения точки** *M* на ободе диска вычислим расстояние, которое она прошла на заданный момент времени. Длина дуги окружности, пройденной точкой за 1 с: $S_r(1) = 9\pi$ см. Положение точки *M* определяется центральным углом $\alpha = \dfrac{S_r(1)}{R} = \dfrac{9\pi}{9} = \pi$. Положение точки в момент времени t_1 = 1 с отмечено на рис. 3.7 точкой M_1.

Для определения **скорости переносного движения** точки вычисляем значение производной: $\dot{\varphi}_e = 5 - 4t$. Угловая скорость вращения фигуры: $\omega_e = |\dot{\varphi}_e|$. При t_1 = 1 с $\dot{\varphi}_e(1) = 1$ рад/с. Положительная величина производной $\dot{\varphi}_e(1)$ показывает,

что вращение фигуры в данный момент происходит в положительном направлении, что отмечено дуговой стрелкой ω_e на рис. 3.7.

В момент времени $t_1 = 1$ с точка M находится в положении M_1. Скорость V_e переносного движения точки в момент времени $t_1 = 1$ с $V_e(1) = \omega_e(1)h_e$, где расстояние от точки M_1 до оси вращения фигуры $h_e = AM_1 = \dfrac{R}{\cos 30^\circ} = 6\sqrt{3}$ см. Тогда $V_e(1) = 6\sqrt{3}$ см/с.

Вектор скорости переносного движения точки $\vec{V}_e$ перпендикулярен линии AM_1 и направлен в сторону вращения фигуры (см. рис. 3.7).

Относительное движение точки задано естественным способом, как закон изменения длины дуги BM. В этом случае **скорость относительного движения** точки $V_r = \left|\dot{S}_r\right| = |18\pi t|$. При $t_1 = 1$ с $V_r(1) = \left|\dot{S}_r(1)\right| = 18\pi = 56{,}5$ см/с. Положительное значение производной $\dot{S}_r(1)$ указывает, что относительное движение точки в положении M_1 происходит в положительном направлении, указанном на рис. 3.7 дуговой стрелкой S_r. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки в положении M_1 направлен по касательной к траектории относительного движения в сторону положительного направления движения (см. рис. 3.7).

Абсолютную скорость точки находим по теореме сложения скоростей $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Направление вектора абсолютной скорости, полученное по правилу сложения векторов, показано на рис. 3.5. Для определения величины абсолютной скорости выбираем прямоугольные оси координат M_1xy (см. рис. 3.7) и проецируем обе части векторного равенства теоремы сложения скоростей на эти оси. Получим:

$$V_x = V_e\cos 60^\circ = 3\sqrt{3} = 5{,}2 \text{ см/с};$$

$$V_y = -V_e\cos 30^\circ + V_r = -6\sqrt{3}\cdot\frac{\sqrt{3}}{2} + 56{,}5 = 29{,}5 \text{ см/с}.$$

Модуль абсолютной скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{5{,}2^2 + 29{,}5^2} = 29{,}95$ см/с.

Абсолютное ускорение точки определяем по теореме Кориолиса, которая при вращательном переносном движении имеет вид:

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n} + \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

Относительное касательное ускорение a_r^{τ} вычисляется по формуле: $a_r^{\tau} = \left|\ddot{S}_r\right|$. По условию задачи вторая производная $\ddot{S}_r = 18\pi$ = 56,5 см/с^2 – постоянная величина. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r^{\tau}$ направлен по касательной к траектории относительного движения в точке M_1 в сторону положительного направления относительного движения, отмеченного дуговой стрелкой S_r.

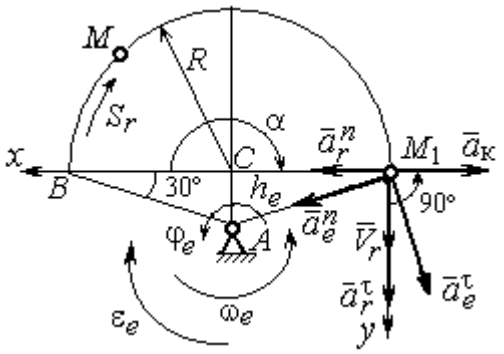


Рис. 3.8. Расчетная схема для определения абсолютного ускорения точки

Относительное нормальное ускорение точки вычисляется по формуле $a_r^{n} = \dfrac{V_r^2}{R}$ и в момент $t_1 = 1$ с равно: $a_r^{n}(1) = \dfrac{V_r^2(1)}{R} = \dfrac{(18\pi)^2}{9}$ = 355,3 см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_r^{n}$ направлен по радиусу диска к центру C (см. рис. 3.8).

Переносное касательное ускорение вычисляется по формуле: $a_e^{\tau} = \varepsilon_e h_e$, где угловое ускорение $\varepsilon_e = \left|\ddot{\varphi}_e\right|$. Вычислим производную $\ddot{\varphi}_e = -4$ рад/с^2. Угловое ускорение $\varepsilon_e = \left|\ddot{\varphi}_e\right|$ = 4 рад/с^2 постоянно и не зависит от времени.

Отрицательное значение производной $\ddot{\varphi}_e < 0$ при условии, что расчетная величина угловой скорости положительна: $\dot{\varphi}_e > 0$, означает, что вращательное движение замедленное и переносное угловое ускорение ε_e направлено в сторону, противоположную направлению вращения.

Вектор $\vec{a}_e^{\tau}$ переносного касательного ускорения точки в её положении M_1 перпендикулярен линии AM_1 и направлен противоположно вектору переносной

скорости $\vec{V}_e$ (см. рис. 3.8). Модуль переносного касательного ускорения: a_e^{τ} = $a_e^{\tau} = \varepsilon_e h_e = 24\sqrt{3}$ = 41,6 см/с^2.

Переносное нормальное ускорение a_e^n рассчитывается по формуле: $a_e^n = \omega_e^2 h_e$ и в момент времени t_1 = 1 с $a_e^n(1) = \omega_e^2(1) h_e = 6\sqrt{3}$ = 10,4 см/с^2. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^{\,n}$ направлен по линии AM_1 к оси вращения (см. рис. 3.8).

По условию задачи вектор скорости относительного движения точки $\vec{V}_r$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, то есть перпендикулярен вектору угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}_e$. Тогда модуль **ускорения Кориолиса** при t_1 = 1 с $a_{\text{к}} = 2\omega_e V_r$ = $2 \cdot 1 \cdot 18\pi$ = 113,1 см/с^2.

Так как вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r \perp \vec{\omega}_e$, то по правилу Жуковского для определения направления ускорения Кориолиса достаточно повернуть вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r$ на 90° в сторону переносного движения вокруг оси, параллельной оси вращения и проходящей через точку M_1 (см. рис. 3.8). Для определения абсолютного ускорения спроецируем на прямоугольные оси xM_1y (см. рис. 3.8) векторное равенство $\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_{\text{к}}$. Получим: $a_y = a_e^{\tau}\cos 30^\circ + a_e^n \cos 60^\circ + a_r^{\tau}$ = 97,9 см/с^2,

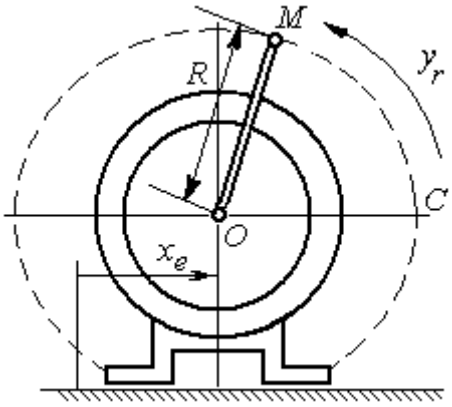


Рис. 3.9. Схема движения точки стержня, укреплённого на электромоторе

$a_x = -a_e^{\tau}\cos 60^\circ + a_e^n \cos 30^\circ + a_r^n - a_{\text{к}}$=228,4 см/с^2. Модуль абсолютного ускорения: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ = 248,5 см/с^2.

Задача 2. К вращающемуся валу электромотора прикреплён стержень OM длины R = 6 см. Во время работы электромотора точка M стержня из начального положения C перемещается по дуге окружности согласно уравнению $CM = y_r = \pi t^2$ см.

При этом электромотор, установленный без креплений, совершает горизонтальные гармонические колебания на фундаменте по закону $x_e = 5\sin(\pi t/3)$ см. Определить абсолютное ускорение точки M в момент времени $t_1 = 1$ с.

Решение

Точка M совершает сложное движение – относительно электромотора и вместе с ним. Относительным движением точки будет её движение по дуге окружности радиуса R, переносным – поступательное горизонтальное, прямолинейное движение электромотора.

Найдём положение точки относительно электродвигателя в заданный момент времени. Угол α, отсчитываемый стержнем OM от начального положения OC, в момент времени $t_1 = 1$ с составляет $\alpha = \dfrac{y_r(t_1)}{R} = \dfrac{\pi}{6} = 30°$. Положение точки в момент времени $t_1 = 1$ с отмечено на рис. 3.10 буквой M_1.

Относительное движение точки задано естественным способом, как закон изменения длины дуги. Относительная скорость $V_r = \dot{y}_r = 2\pi t$. В момент времени $t_1 = 1$ с $V_r = 6{,}28$ см/с. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости направлен перпендикулярно стержню OM_1.

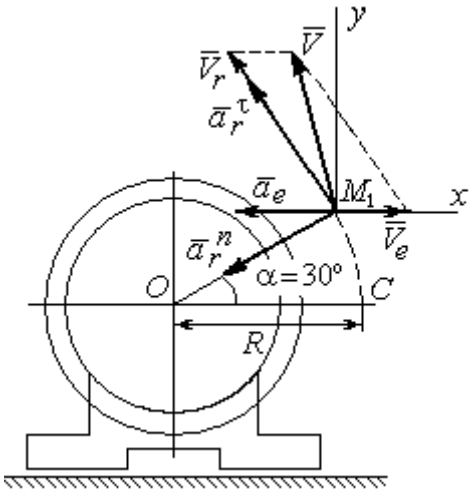


Рис. 3.10. Расчётная схема вычисления абсолютной скорости и абсолютного ускорения точки

Скорость точки в переносном движении – это скорость горизонтального движения электродвигателя:

$$V_e = \dot{x}_e = \frac{5\pi}{3}\cos(\pi t/3).$$

В момент времени $t_1 = 1$с $V_e = \dfrac{5\pi}{3}\cos 60^\circ = 2{,}62$ см/с. Вектор $\vec{V}_e$ переносной скорости точки M направлен параллельно линии движения электродвигателя (см. рис. 3.10).

Абсолютная скорость точки определяется на основании теоремы сложения скоростей при сложном движении: $\vec{V}_M = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Для того чтобы найти величину

абсолютной скорости, выберем оси xM_1y, как показано на рис. 3.10, и спроецируем векторное равенство сложения скоростей на эти оси. Получим: $V_{Mx} = V_e - V_r\cos 60^\circ$ = – 0,52 см/с (проекция направлена в отрицательную сторону оси x), $V_{My} = V_r\cos 30^\circ$ = 5,44 см/с. Модуль абсолютной скорости $V_M = \sqrt{V_{Mx}^2 + V_{My}^2}$ = 5,46 см/с. Вектор абсолютной скорости направлен по диагонали параллелограмма, построенного на векторах $\vec{V}_e$ и $\vec{V}_r$.

При поступательном переносном движении точки ω_e = 0 и потому $a_к$ = 0. Относительное ускорение точки при движении по окружности раскладывается на две составляющие $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n}$, направленные вдоль стержня OM и перпендикулярно ему. Кроме того, при прямолинейном относительном движении $a_e^n = 0$. В результате, теорема о сложении ускорений принимает вид $\vec{a}_M = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e$, где модули векторов вычисляются по формулам $a_r^\tau = \dot{V}_r$, $a_r^n = \dfrac{V_r^2}{R}$, $a_e = a_e^\tau = \dot{V}_e$ = $-\dfrac{5\pi^2}{9}\sin(\pi t/3)$ и в момент времени $t_1 = 1$с равны a_r^τ = 6,28 см/с^2, a_r^n = 6,57 см/с^2, a_e = – 4,75 см/с^2. Направления векторов ускорений показаны на рис. 3.10. Для вычисления модуля абсолютного ускорения точки спроецируем векторное равенство сложения ускорений на оси выбранной ранее системы координат xM_1y. Получим:

$$a_{Mx} = -a_r^\tau\cos 60^\circ - a_r^n\cos 30^\circ - a_e = -4{,}08 \text{ см/с}^2;$$

$$a_{My} = a_r^\tau\cos 30^\circ - a_r^n\cos 60^\circ = 2{,}15 \text{ см/с}^2.$$

Величина абсолютного ускорения $a_M = \sqrt{a_{Mx}^2 + a_{My}^2}$ = 4,61 см/с^2.

4. ДИНАМИКА ТОЧКИ

4.1. Дифференциальные уравнения движения точки

Движение точки под действием системы сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, …, $\vec{F}_K$ в прямоугольной декартовой системе координат *Oxyz* описывается **дифференциальными уравнениями:** $m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F_{kx}$, $m\frac{d^2y}{dt^2} = \sum F_{ky}$, $m\frac{d^2z}{dt^2} = \sum F_{kz}$ или, обозначая вторые производные от координат по времени двумя точками, уравнениями: $m\ddot{x} = \sum F_{kx}$, $m\ddot{y} = \sum F_{ky}$, $m\ddot{z} = \sum F_{kz}$, где m – масса точки; x, y, z – текущие координаты точки; $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, $\ddot{z}$ – проекции вектора ускорения точки на оси координат; $\sum F_{kx}$, $\sum F_{ky}$, $\sum F_{kz}$ – алгебраические суммы проекций сил на оси координат.

Интегрирование дифференциальных уравнений производится в зависимости от их вида методами, известными из курса математики.

4.2. Задание Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки

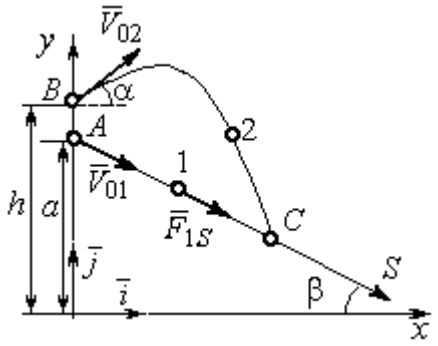
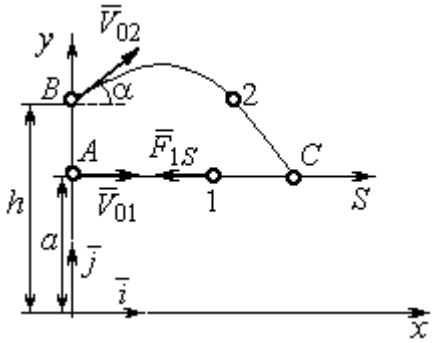
Две материальные точки движутся в вертикальной плоскости *xOy*. Точка 1 массой m_1, получив в начальном положении *A* скорость V_{01}, движется вдоль гладкой оси *AS*, наклоненной под углом β к горизонту. Во время движения на точку 1 действуют сила тяжести и постоянная сила $\vec{F}_1$, направленная вдоль оси *AS*. Направление вектора проекции силы на ось $\vec{F}_{1S}$ показано на схеме.

Одновременно с точкой 1 начинает движение точка 2 массой m_2 из положения *B* на оси *y*. На точку 2 действуют сила тяжести и постоянная сила $\vec{F}_2$. Направление вектора силы $\vec{F}_2$ определяется его разложением по единичным векторам $\vec{i}$, $\vec{j}$ координатных осей *x*, *y*.

Определить величину и направление (угол α) начальной скорости V_{02} точки 2, чтобы в момент времени t_1 точки 1 и 2 встретились на оси AS в точке *C*.

Момент времени t_1 задаётся в условиях задачи или определяется по дополнительным условиям встречи.

Варианты заданий представлены на рис. 4.1, 4.2. Исходные данные приведены в табл. 4.1.

Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**
 Встреча в точке C в момент, когда скорость точки 1 увеличилась в 1,5 раза относительно начальной	 Встреча в точке C в момент, когда точка 1 максимально удалилась от места старта

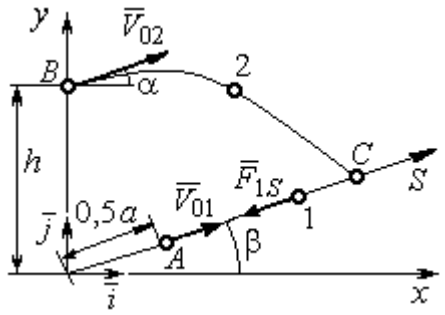
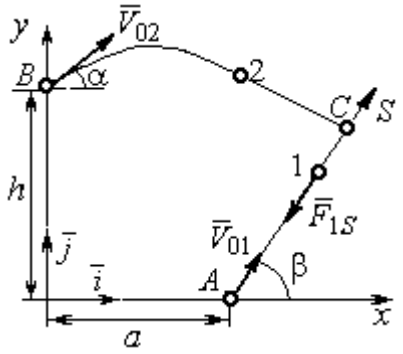
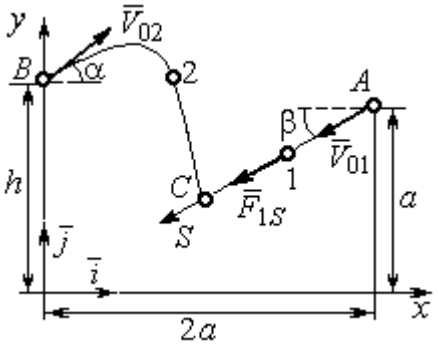
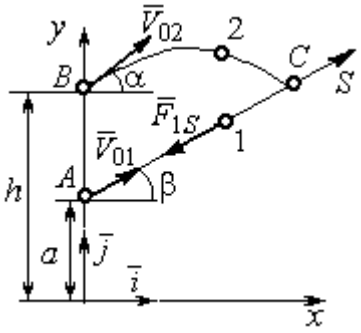
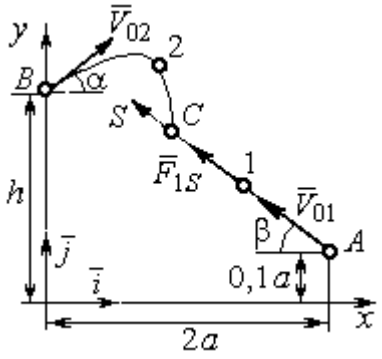
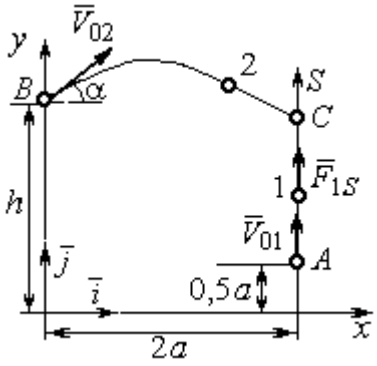
Варианты № 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
 Встреча в точке C в момент, когда скорость точки 1 уменьшилась в 2 раза относительно начальной	 Встреча в точке C в момент времени $t_1 = 0{,}5$ с

Рис. 4.1. Задание Д1. Интегрирование уравнений движения точки.
Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

Варианты № 5, 15, 25	**Варианты № 6, 16, 26**
	
Встреча в точке *C* в момент, когда скорость точки 1 увеличилась в 1,5 раза относительно начальной	Встреча в точке *C*, когда точка 1 максимально удалилась от места старта

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	
Встреча в точке *C* в момент времени $t_1 = 0{,}4$ с	Встреча в точке *C* в момент максимального подъёма точки 1

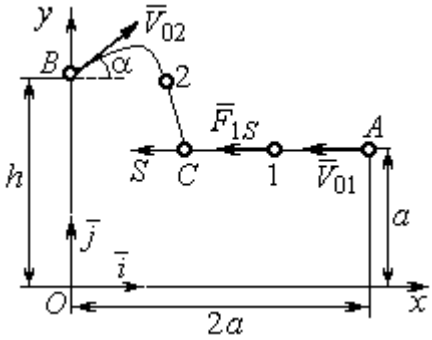
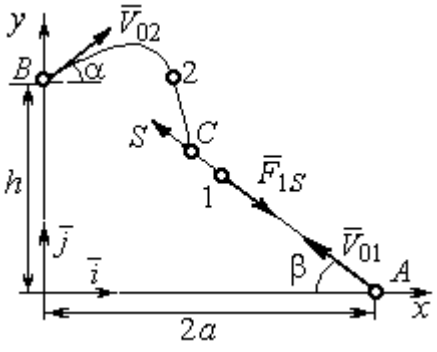
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	
Встреча в точке *C* в момент времени $t_1 = 0{,}6$ с	Встреча в точке *C* в момент, когда точка 1 достигла максимальной высоты подъёма

Рис. 4.2. Задание Д1. Интегрирование уравнений движения точки.
Номера вариантов задания 5 – 10, 15 – 20, 25 – 30

Таблица 4.1

Исходные данные задания Д1. Интегрирование уравнений движения точки

Номер варианта задания	m_1, кг	F_{1S}, Н	V_{01}, м/с	β, град	m_2, кг	$\vec{F}_2$, Н	a, м	h, м
1	1	3	3	30	2	$7\vec{i}$	2	4
2	3	6	2	0	2	$4\vec{i}+12\vec{j}$	1,5	1
3	2	5	4	35	1,5	$10\vec{i}+4\vec{j}$	2	2,5
4	1	10	2	60	2	$4\vec{i}+8\vec{j}$	2,2	2
5	1	3	3	30	2	$5\vec{i}$	3	4,5
6	0,8	6	6	50	3	$3\vec{i}+12\vec{j}$	1,5	4
7	2	5	4,5	40	1	$10\vec{i}+2\vec{j}$	3	2,5
8	1	2	3,5	90	2	$6\vec{i}+8\vec{j}$	1,2	2
9	2	4	4	0	1	$3\vec{i}+2\vec{j}$	2	2,5
10	1	3	3	55	1,5	$4\vec{i}$	1	1,5
11	0,5	2	3	60	2	$3\vec{i}+8\vec{j}$	1,5	2,5
12	0,2	3	4	0	1	$5\vec{i}-2\vec{j}$	1	2,5
13	1	2	6	50	1,5	$6\vec{i}-4\vec{j}$	0,8	2
14	0,5	6	4	35	1	$3\vec{i}-2\vec{j}$	2,5	2
15	0,2	3	3	50	2	$2\vec{i}-2\vec{j}$	3	4
16	2	4	6	40	2	$3\vec{i}+12\vec{j}$	1	1,5
17	1	6	5	60	1,5	$5\vec{i}+4\vec{j}$	3	2,5
18	1	2	2	90	2	$4\vec{i}+4\vec{j}$	2	2
19	1	3	2	2	2	$2\vec{i}+10\vec{j}$	1	1,5
20	5	4	2	30	1	$3\vec{i}-2\vec{j}$	1,5	1,5
21	0,2	4	4	45	1	$6\vec{i}-2\vec{j}$	1	3
22	0,4	3	2	0	2	$4\vec{i}+6\vec{j}$	1,5	2,5
23	1	3	8	60	2	$4\vec{i}+2\vec{j}$	1,2	1,5
24	0,5	8	3	30	2	$6\vec{i}+7\vec{j}$	2	1,5
25	2	4	4	60	1	$2\vec{i}-2\vec{j}$	3,5	4
26	1	3	5	50	2	$4\vec{i}+6\vec{j}$	0,5	1,5
27	1,5	3	6	30	2	$4\vec{i}+4\vec{j}$	2	2,5
28	2	5	3	90	2	$6\vec{i}+7\vec{j}$	2	1,5
29	2	4	4	0	1	$5\vec{i}-2\vec{j}$	1,5	2
30	1	3	2,5	70	2	$4\vec{i}+6\vec{j}$	1	1

Пример выполнения задания Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки

На рис. 4.3 представлена схема движения материальных точек в вертикальной плоскости *xOy*. Точка 1 массой $m_1 = 2$ кг, получив в начальном положении *A* скорость $V_{01} = 4$ м/с, движется вдоль гладкой оси *AS* с углом наклона $\beta = 30^{\circ}$. Во время движения на точку 1 действуют сила тяжести $\vec{P}_1$ и постоянная сила $\vec{F}_1$, проекция которой на ось *AS* равна $F_{1S} = 4{,}5$ Н. Направление вектора проекции силы $\vec{F}_{1S}$ на ось *AS* показано на рис. 4.3.

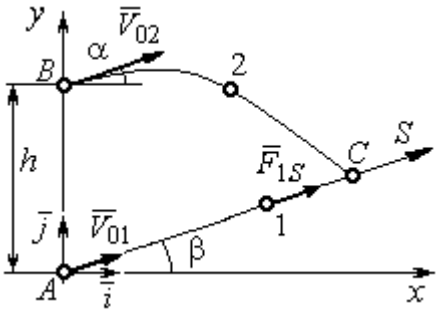


Рис. 4.3. Схема совместного движения точек

Одновременно с началом движения точки 1 из положения *B* на оси *y* высотой $h = 1$ м начинает движение точка 2 массой $m_2 = 1{,}2$ кг. На точку 2 действуют сила тяжести $\vec{P}_2$ и сила $\vec{F}_2$, направление которой определяется разложением по единичным векторам $\vec{i}$, $\vec{j}$ осей *x*, *y* декартовой системы координат: $\vec{F}_2 = 2{,}4\vec{i} + 4{,}5\vec{j}$, Н. Определить величину и направление (угол α) начальной скорости V_{02} точки 2, чтобы в момент времени t_1, когда скорость точки 1 уменьшилась в 2 раза по сравнению с начальным значением, обе они встретились на оси *AS* в точке *C*.

Решение

Рассмотрим движение точки 1. В текущий момент времени на точку 1 действует сила тяжести $\vec{P}_1$, нормальная реакция $\vec{N}_1$ наклонной оси *AS* и сила $\vec{F}_1$, величина проекции которой на ось *AS* равна F_{1S} (рис. 4.4). Дифференциальное уравнение движения точки 1 $m_1\ddot{S} = F_{1S} - P_1\sin\beta$, или $m_1\dfrac{dV_{1S}}{dt} = 4{,}5 - m_1 g\sin\beta$. С учетом исходных данных, полагая ускорение свободного падения $g = 9{,}81$ м/с^2, дифференциальное уравнение движения точки 1 приводится к виду: $\dfrac{dV_{1S}}{dt} = -2{,}66$. Разделим

переменные, представив дифференциальное уравнение в виде $dV_{1S} = -2{,}66dt$. Проинтегрировав его, получим зависимость скорости точки 1 от времени: $V_{1S} = -2{,}66t + C_1$. Для того чтобы определить закон движения точки 1, представим скорость точки как производную от координаты $V_{1S} = \dfrac{dS}{dt}$. Получим дифференциальное уравнение $\dfrac{dS}{dt} = -2{,}66t + C_1$, проинтегрировав которое, найдём уравнение движения точки 1: $S = -1{,}33t^2 + C_1 t + C_2$. Константы интегрирования C_1, C_2 находятся из начальных условий: при $t = 0$, $S = 0$, $\dot{S} = V_{1S} = V_{01} = 4$ м/с. Подставляя первое из условий в уравнение движения точки 1, получим $C_2 = 0$. Подставим начальное значение скорости в уравнение $\dot{S} = -2{,}66t + C_1$, выражающее зависимость скорости точки 1 от времени. Получим $C_1 = 4$. Таким образом, движение точки 1 вдоль оси AS описывается уравнением: $S = -1{,}33t^2 + 4t$.

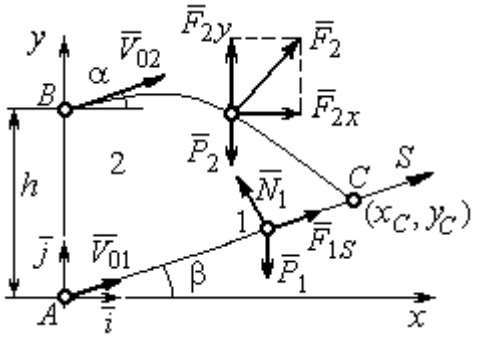


Рис. 4.4. Силы, действующие на точки 1 и 2, во время их движения

По условию задачи встреча двух точек происходит в момент времени t_1, когда скорость первой точки уменьшилась в 2 раза по сравнению с начальной: $V_{1S}(t_1) = \dfrac{V_{01}}{2} = 2$ м/с. Подставляя это условие в уравнение, выражающее зависимость скорости точки 1 от времени, получим: $2 = -2{,}66t_1 + 4$, откуда найдём момент времени встречи $t_1 = 0{,}75$ с. Расстояние AC, пройденное точкой 1 до встречи, определяется как путь, пройденный этой точкой за время $t_1 = 0{,}75$ с, $AC = S(t_1) = -1{,}33 \cdot 0{,}75^2 + 4 \cdot 0{,}75 = 2{,}25$ м. Координаты точки встречи x_C, y_C определяются из равенств: $x_C = S(t_1)\cos 30^\circ = 1{,}95$ м; $y_C = S(t_1)\sin 30^\circ = 1{,}12$ м.

Рассмотрим движение точки 2. В текущий момент времени на нее действует сила тяжести $\vec{P}_2$ и сила $\vec{F}_2 = 2{,}4\vec{i} + 4{,}5\vec{j}$, проекции которой на оси координат

$F_{2x} = 2{,}4$ Н, $F_{2y} = 4{,}5$ Н. Дифференциальные уравнения движения точки 2 в проекциях на оси координат *x*, *y* имеют вид:

$$m_2\ddot{x} = F_{2x} = 2{,}4, \quad m_2\ddot{y} = -P_2 + F_{2y} = -m_2 g + 4{,}5,$$

или после подстановки исходных данных: $\ddot{x} = 2$, $\ddot{y} = -6{,}06$.

Представим в первом уравнении проекцию ускорения точки 2 на ось *x* как производную от соответствующей проекции скорости $\ddot{x} = \frac{dV_{2x}}{dt}$. После разделения переменных получим дифференциальное уравнение $dV_{2x} = 2dt$. Проинтегрируем его и найдем зависимость горизонтальной составляющей скорости точки 2 от времени: $V_{2x} = 2t + C_3$. Заменим в этом уравнении проекцию скорости точки на ось *x* на производную от координаты $V_{2x} = \frac{dx}{dt}$. После интегрирования получим уравнение, описывающее движение точки 2 вдоль оси *x*, $x = t^2 + C_3 t + C_4$. Для того чтобы найти постоянные C_3 и C_4, воспользуемся граничными условиями движения точки 2 – известной начальной координатой движения точки и вычисленной координатой точки встречи, то есть при $t = 0$, $x = 0$, а при $t_1 = 0{,}75$ с $x(t_1) = x_C = 1{,}95$ м. Подставляя граничные условия в уравнение движения точки 2, получим $C_4 = 0$, $C_3 = 1{,}85$. Таким образом, уравнение движения точки 2 вдоль оси *x*: $x = t^2 + 1{,}85t$.

Закон движения точки 2 вдоль оси *y* находим путем интегрирования второго дифференциального уравнения. Его представим в виде: $\frac{dV_{2y}}{dt} = -6{,}06$. После разделения переменных и первого интегрирования получим зависимость проекции скорости точки 2 на ось *y* от времени: $V_{2y} = -6{,}06t + C_5$. Заменив проекцию скорости точки 2 на ось *y* производной от координаты $V_{2y} = \frac{dy}{dt}$, вторично проинтегрируем. В результате движение точки 2 вдоль оси *y* описывается уравнением: $y = -3{,}03t^2 + C_5 t + C_6$. Для определения констант C_5 и C_6 используем граничные условия: при $t = 0$ $y(0) = h = 1$ м, а при $t_1 = 0{,}75$ с $y(t_1) = y_C = 1{,}12$ м. Получим $C_6 = 1$

, C_5 = 2,43. Таким образом, точка 2 движется вдоль оси y по закону: $y = -3{,}03t^2 + 2{,}43t + 1$.

Проекции скорости точки 2 на оси координат как функции времени имеют вид: $V_{2x}(t) = \dot{x} = 2t + 1{,}85$, $V_{2y}(t) = \dot{y} = -6{,}06t + 2{,}43$. Значения проекций при $t = 0$: $V_{02x} = V_{2x}(0) = 1{,}85$ м/с, $V_{02y} = V_{2y}(0) = 2{,}43$ м/с. Величина начальной скорости: $V_{02} = \sqrt{{V_{02x}}^2 + {V_{02y}}^2} = 3{,}05$ м/с.

Угол наклона вектора скорости в начальный момент определяется из равенства: $\mathrm{tg}\alpha = \dfrac{V_{02y}}{V_{02x}} = \dfrac{2{,}43}{1{,}85} = 1{,}31$. Откуда $\alpha = 52{,}64^\circ$.

4.3. Колебания материальной точки

Силы, возникающие при отклонении материальной точки от положения равновесия и направленные так, чтобы вернуть точку в это положение, называются **восстанавливающими**. Восстанавливающие силы, линейно зависящие от расстояния от точки до положения её равновесия, называются **линейными восстанавливающими силами**. Так, сила упругости пружины $F = c\Delta\ell$, где c – коэффициент жесткости (или просто жёсткость) пружины; $\Delta\ell$ – удлинение пружины, является линейной восстанавливающей силой.

Дифференциальное уравнение движения материальной точки массой m вдоль оси Оx под действием линейной восстанавливающей силы, представляет собой уравнение гармонических колебаний и имеет вид:

$$m\ddot{x} + cx = 0, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,$$

где x – отклонение точки от положения равновесия, куда поместили начало координат; ω – угловая частота колебаний, $\omega^2 = \dfrac{c}{m}$. Единица измерения угловой частоты – рад/с.

Решение дифференциального уравнения свободных колебаний представляется суммой $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$, где постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных условий. **Амплитуда свободных колебаний** $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$. Промежуток времени, в течение которого точка совершает одно полное колебание, называется **периодом колебаний**: $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Величина, обратная периоду $\nu = \frac{1}{T}$ определяет число полных колебаний точки за 1 с и называется **частотой колебаний**. Частота колебаний измеряется в герцах (Гц). Частота, равная 1 Гц, соответствует одному полному колебанию в секунду. Угловая частота связана с частотой колебаний соотношением $\omega = 2\pi\nu$.

Если на материальную точку кроме восстанавливающей силы действует сила сопротивления движению, пропорциональная скорости точки, $\vec{R} = -\mu\vec{V}$, где μ – коэффициент сопротивления, то дифференциальное уравнение движения точки с сопротивлением относительно положения равновесия имеет вид $m\ddot{x} + \mu\dot{x} + cx = 0$, или $\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega^2 x = 0$, где n – коэффициент затухания, $n = \frac{\mu}{2m}$; ω – угловая частота собственных колебаний точки без учёта сопротивления, $\omega^2 = \frac{c}{m}$.

При $n < \omega$ движение точки представляет затухающие колебания. Общее решение дифференциального уравнения колебаний с сопротивлением $x = e^{-nt}(C_1\cos\omega_1 t + C_2\sin\omega_1 t) = Ae^{-nt}\sin(\omega_1 t + \alpha)$, где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования; ω_1 – угловая частота затухающих колебаний, $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - n^2}$; $A_1 = Ae^{-nt}$ – амплитуда затухающих колебаний, $A = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$; α – начальная фаза колебаний, $\mathrm{tg}\alpha = \frac{C_1}{C_2}$.

При $n > \omega$ движение точки апериодическое, затухающее. Общее решение дифференциального уравнения движения точки с таким сопротивлением имеет вид $x = e^{-nt}(C_1 e^{\omega_2 t} + C_2 e^{-\omega_2 t})$, где $\omega_2 = \sqrt{n^2 - \omega^2}$.

При $n = \omega$ движение точки происходит согласно уравнению $x = e^{-nt}(C_1 t + C_2)$.

Если кроме восстанавливающей силы на материальную точку действует переменная возмущающая сила, колебания точки называются **вынужденными.**

При действии гармонической возмущающей силы $F = H\sin pt$, где H, p – амплитуда и угловая частота колебаний возмущающей силы, дифференциальное уравнение вынужденных колебаний материальной точки относительно положения равновесия и при отсутствии сил сопротивления имеет вид

$$m\ddot{x} + cx = H\sin pt, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt,$$

где ω – угловая частота собственных гармонических колебаний, $\omega^2 = \frac{c}{m}$; h – относительная амплитуда возмущающей силы, $h = \frac{H}{m}$.

Общее решение неоднородного дифференциального уравнения вынужденных колебаний представляется как сумма общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного.

При отсутствии резонанса, когда частота собственных колебаний не совпадает с частотой возмущающей силы $p \neq \omega$, решение имеет вид: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \frac{h}{\omega^2 - p^2}\sin pt$, а в случае резонанса, когда $p = \omega$, – вид: $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t - \frac{ht}{2p}\cos pt$. Значения произвольных постоянных C_1 и C_2 определяются из общего решения неоднородного уравнения с учетом начальных условий движения. Амплитуда собственных колебаний груза $A_{\text{соб}} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$. Амплитуда вынужденных колебаний при отсутствии резонанса $A_{\text{вын}} = \frac{h}{\omega^2 - p^2}$.

При резонансе амплитуда вынужденных колебаний растет как линейная функция времени $A_{\text{вын}} = \dfrac{ht}{2p}$.

Если возмущающее воздействие заключается в **принудительном гармоническом колебании точки подвеса пружины**, например, по закону $S = a\sin pt$, где a, p – амплитуда и угловая частота колебаний точки подвеса пружины, дифференциальное уравнение вынужденных колебаний материальной точки относительно положения равновесия при отсутствии сил сопротивления имеет вид $\ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt$, где ω – угловая частота собственных гармонических колебаний, $\omega^2 = \dfrac{c}{m}$; h – относительная амплитуда возмущающего колебания, $h = \dfrac{ca}{m}$. Общее решение неоднородного дифференциального уравнения вынужденных колебаний при принудительном гармоническом колебании точки подвеса пружины может быть получено аналогично случаю возмущения гармонической силой.

Система пружин заменяется одной с эквивалентной жесткостью. Так, колебания груза на двух параллельных пружинах с коэффициентами жесткости c_1 и c_2 (рис. 4.5, *a*) можно рассматривать как колебания груза на одной пружине эквивалентной жесткости $c_{\text{экв}} = c_1 + c_2$, где $c_{\text{экв}}$ – коэффициент жесткости эквивалентной пружины. При последовательном соединении пружин (рис. 4.5, *b*) коэффициент жесткости эквивалентной пружины $c_{\text{экв}} = \dfrac{c_1 c_2}{c_1 + c_2}$. Если груз расположен между двумя пружинами (рис. 4.5, *c*), тогда $c_{\text{экв}} = c_1 + c_2$. Коэффициент жесткости эквивалентной пружины равен сумме коэффициентов жесткости пружин.

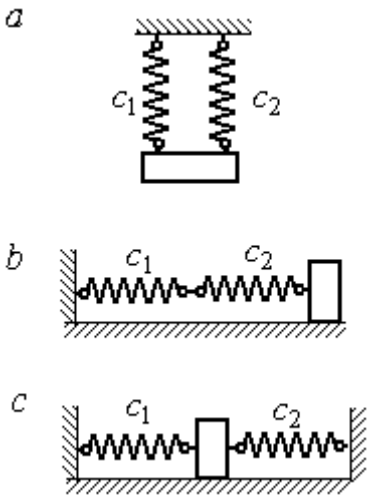


Рис. 4.5. Способы крепления груза на двух пружинах:
a – две параллельные пружины;
b – последовательно соединённые пружины; *c* – крепление груза между пружинами

4.4. Задание Д2. Исследование колебаний точки

Задание Д2 на исследование колебаний точки включает две задачи.

Задача 1. Исследование гармонических колебаний точки.

Найти уравнение движения груза массой m_1 (или одновременно двух грузов массой m_1 и m_2) на пружине жесткостью c_1 (или на двух пружинах жесткостью c_1 и c_2). Расположение грузов на пружине и описание условий, при которых начались колебания, приведено на схемах. Определить амплитуду и частоту колебаний.

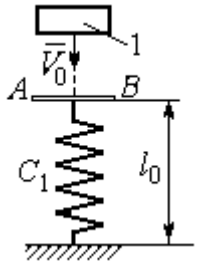
Задача 2. Исследование вынужденных колебаний точки.

Груз движется на пружинах, расположенных вертикально или горизонтально. При движении груза по горизонтальной поверхности трение не учитывается. Жёсткость пружин c_1 и c_2. Направление возмущающего усилия $F = F(t)$, приложенного к грузу, или возмущающего движения точки крепления пружин $S = S(t)$, а также описание условий начала колебаний приведено на схемах. В задачах, где на схемах присутствует амортизатор, создающий сопротивление движению груза, сила сопротивления пропорциональна скорости движения груза и находится по формуле: $\vec{R} = -\mu\vec{V}$ Н, где μ – коэффициент сопротивления; V – скорость груза. Определить уравнение колебаний груза, амплитуды собственных и вынужденных колебаний.

Варианты заданий даны на рис. 4.6 – 4.9. Исходные данные в табл. 4.2.

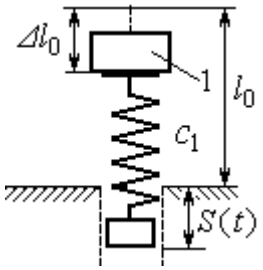
Варианты № 1, 11, 21

Задача 1



Невесомая пластина AB укреплена на нерастянутой пружине. Груз 1, получив начальную скорость V_0, падает вертикально вниз. Через 1 с после начала падения груз достигает пластины и продолжает движение вместе с ней

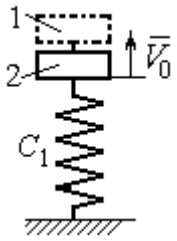
Задача 2



К верхнему концу пружины, сжатой на величину $\Delta\ell_0$, прикрепляют груз 1 и отпускают без начальной скорости. Одновременно нижний конец пружины начинает двигаться по закону $S = S(t)$

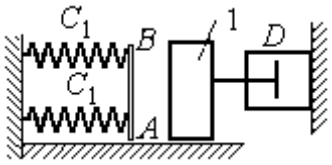
Варианты № 2, 12, 22

Задача 1



В положении статического равновесия двух грузов (1 и 2), установленных на пружине, груз 1 убрали, а грузу 2 сообщили скорость V_0, направленную вверх

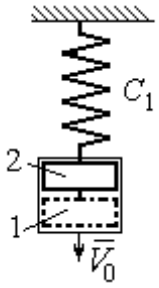
Задача 2



Груз 1 движется по гладкой горизонтальной поверхности с начальной скоростью V_0. Через 1 с груз упирается в площадку AB, укреплённую на недеформированных пружинах, соединённых параллельно, и продолжает движение вместе с ней. Во время движения (до упора в площадку AB и вместе с ней) груз испытывает сопротивление, создаваемое демпфером D

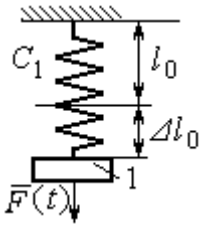
Варианты № 3, 13, 23

Задача 1



В положении статического равновесия груза 2, укреплённого на пружине, к нему присоединили груз 1 и оба груза толкнули вниз со скоростью V_0

Задача 2

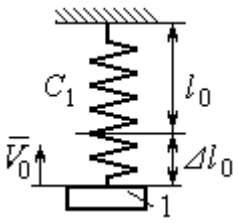


Недеформированную пружину оттянули вниз на расстояние $\Delta\ell_0$, подцепили груз 1 и отпустили без начальной скорости. Одновременно на груз стала действовать возмущающая сила $\vec{F}(t)$

Рис. 4.6. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

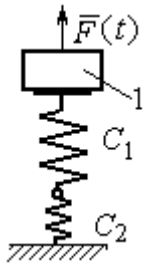
Варианты № 4, 14, 24

Задача 1



К недеформированной пружине подцепили груз 1, оттянули его вниз на расстояние $\Delta\ell_0$ и сообщили скорость V_0, направленную вверх

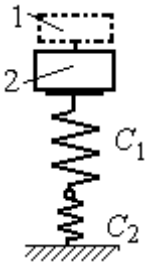
Задача 2



Грузу 1, укреплённому на двух последовательно соединённых пружинах в положении статического равновесия, сообщили начальную скорость V_0, направленную вниз. Одновременно на груз стала действовать возмущающая сила $\vec{F}(t)$

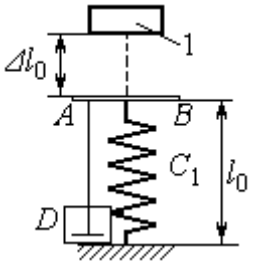
Варианты № 5, 15, 25

Задача 1



В положении статического равновесия грузов 1 и 2, укреплённых на двух вертикальных последовательно соединённых пружинах, убрали груз 1, а груз 2 отпустили без начальной скорости

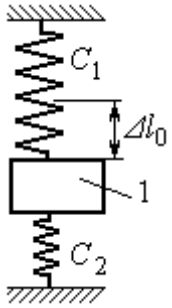
Задача 2



Груз 1 падает с высоты $\Delta\ell_0$ на площадку AB, установленную на недеформированной пружине, и продолжает движение вместе с ней. Демпфер D создаёт сопротивление движению груза на пружине

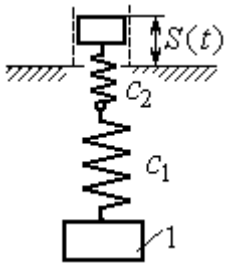
Варианты № 6, 16, 26

Задача 1



Груз 1 поместили между двумя недеформированными пружинами, затем оттянули вниз на расстояние $\Delta\ell_0$ и отпустили без начальной скорости

Задача 2

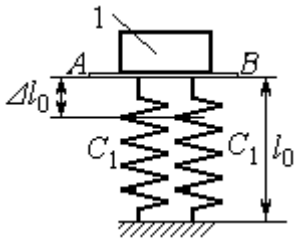


К недеформированным пружинам, соединённым последовательно, подцепили груз 1 и толкнули его вниз со скоростью V_0. Одновременно верхний конец пружины начинает двигаться по закону $S = S(t)$

Рис. 4.7. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 4 – 6, 14 – 16, 24 – 26

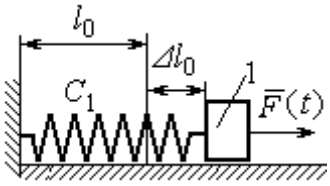
Варианты № 7, 17, 27

Задача 1



К недеформированным пружинам приложили груз 1, переместили его вниз на величину $\Delta\ell_0$ и сообщили скорость V_0, направленную вниз

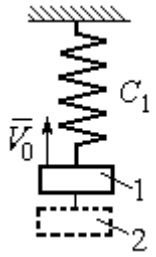
Задача 2



К нерастянутой пружине, расположенной на горизонтальной гладкой поверхности, подцепили груз 1, оттянули его на расстояние $\Delta\ell_0$ и отпустили. Одновременно на груз стала действовать горизонтальная возмущающая сила $\vec{F}(t)$

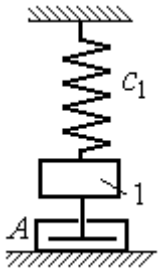
Варианты № 8, 18, 28

Задача 1



Грузы 1 и 2 находятся на пружине в положении статического равновесия. Груз 2 удаляют, а грузу 1 сообщают скорость V_0, направленную вверх

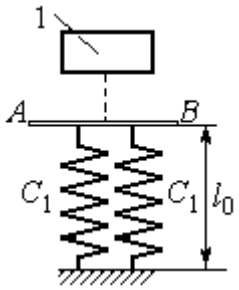
Задача 2



В положении статического равновесия груза 1 ему сообщили скорость V_0, направленную вниз. Демпфер A создаёт сопротивление движению груза

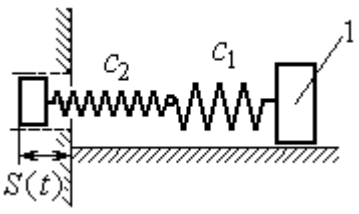
Варианты № 9, 19, 29

Задача 1



Груз 1 без начальной скорости падает вниз. Пройдя путь 1 м, груз достигает невесомой пластины AB, укреплённой на недеформированных, параллельно соединённых пружинах, и дальше движется вместе с ней

Задача 2



К двум горизонтальным пружинам, соединённым последовательно, в положении их нерастянутого состояния прицепили груз 1 и сообщили ему горизонтальную скорость V_0, направленную в сторону сжатия пружин. Одновременно левый конец пружинной системы начинает двигаться по закону $S = S(t)$

Рис. 4.8. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

Окончание вариантов задания Д2

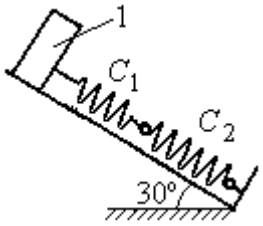
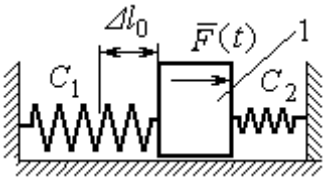
Варианты № 10, 20, 30	
Задача 1	Задача 2
 В положении статического равновесия груза 1, укреплённого на двух последовательно соединённых пружинах, сообщили скорость V_0, направленную вниз по наклонной плоскости	 Между двумя горизонтальными недеформированными пружинами на гладкую поверхность поместили груз 1, оттянули его влево на расстояние $\Delta\ell_0$ и отпустили без начальной скорости. Одновременно на груз стала действовать возмущающая сила $\vec{F}(t)$

Рис. 4.9. Задание Д2. Исследование колебаний точки.
Варианты задания 10, 20, 30

Таблица 4.2

Исходные данные задания Д2. Исследование колебаний точки

Номер варианта задания	Номер задачи	m_1, кг	m_2, кг	V_0, м/с	c_1, Н/м	c_2, Н/м	$\Delta\ell_0$, м	μ, Н·с/м	$F(t)$, Н	$S(t)$, м
1	1	2,5	–	2,0	200	–	–	–	–	–
	2	2,0	–	–	210	–	0,1	–	–	0,02sin12t
2	1	1,5	2,0	4	250	–	–	–	–	–
	2	2,0	–	4	220	–	–	1,0	–	–
3	1	2,0	1,5	3	250	–	–	–	–	–
	2	1,2	–	–	200	–	0,14	–	12sin5t	–
4	1	2,0	–	3	180	–	0,1	–	–	–
	2	1,5	–	2	150	120	–	–	8sin12t	–
5	1	1,0	2,0	–	120	100	–	–	–	–
	2	1,0	–	–	50	–	0,5	18	–	–
6	1	1,2	–	–	120	180	0,12	–	–	–
	2	1,4	–	2,4	120	180	–	–	–	0,03sin14t
7	1	1,6	–	3,2	140	–	0,15	–	–	–
	2	1,5	–	–	120	–	0,12	–	12sin6t	–
8	1	1,0	2,0	3,0	150	–	–	–	–	–
	2	2,0	–	3,5	120	–	–	15	–	–

Продолжение табл. 4.2

Номер вари-анта задания	Номер задачи	m_1, кг	m_2, кг	V_0, м/с	c_1, Н/м	c_2, Н/м	$\Delta\ell_0$, м	μ, Н·с/м	$F(t)$, Н	$S(t)$, м
9	1	1,5	–	–	100	–	–	–	–	–
	2	1,4	–	2,0	100	110	–	–	–	0,015sin8t
10	1	2,5	–	2,5	110	100	–	–	–	–
	2	2,0	–	–	110	52	0,08	–	5sin9t	–
11	1	2,0	–	4,0	300	–	–	–	–	–
	2	1,0	–	–	200	–	0,12	–	–	0,01sin4t
12	1	1,8	2,4	4	220	–	–	–	–	–
	2	1,0	–	5	240	–	–	0,6	–	–
13	1	1,5	1,5	2	200	–	–	–	–	–
	2	1,8	–	–	180	–	0,08	–	10sin10t	–
14	1	2,0	–	2	200	–	0,12	–	–	–
	2	2,0	–	2	150	120	–	–	10sin8t	–
15	1	1,5	2,0	–	120	250	–	–	–	–
	2	1,5	–	–	120	–	0,4	4	–	–
16	1	2,0	–	–	150	75	0,1	–	–	–
	2	2,0	–	2,5	150	75	–	–	–	0,01sin5t
17	1	1,5	–	2,1	160	–	0,11	–	–	–
	2	1,8	–	–	150	–	0,1	–	8sin12t	–
18	1	2,0	1,0	2,5	80	–	–	–	–	–
	2	1,5	–	2,5	50	–	–	21	–	–
19	1	1,6	–	–	120	–	–	–	–	–
	2	1,2	–	2,0	85	120	–	–	–	0,015sin7t
20	1	2,0	–	2,0	90	100	–	–	–	–
	2	2,5	–	–	100	90	0,12	–	6sin10t	–
21	1	2,0	–	1,6	220	–	–	–	–	–
	2	2,5	–	–	250	–	0,14	–	–	0,01sin10t
22	1	2,2	1,5	3	180	–	–	–	–	–
	2	1,5	–	4	280	–	–	0,8	–	–
23	1	2,2	1,2	2	220	–	–	–	–	–
	2	1,6	–	–	200	–	0,12	–	5sin7t	–

Окончание табл. 4.2

Номер варианта задания	Номер задачи	m_1, кг	m_2, кг	V_0, м/с	c_1, Н/м	c_2, Н/м	$\Delta\ell_0$, м	μ, Н·с/м	$F(t)$, Н	$S(t)$, м
24	1	1,6	–	2,4	160	–	0,13	–	–	–
	2	1,0	–	3	150	300	–	–	6sin10t	–
25	1	0,8	1,2	–	120	80	–	–	–	–
	2	0,8	–	–	180	–	0,4	12	–	–
26	1	1,4	–	–	100	120	0,15	–	–	–
	2	1,8	–	2,2	150	120	–	–	–	0,015sin8t
27	1	2	–	4,0	150	–	0,12	–	–	–
	2	2	–	–	162	–	0,13	–	5sin9t	–
28	1	1,5	2,0	2,0	140	–	–	–	–	–
	2	1,5	–	3,1	180	–	–	12	–	–
29	1	1,0	–	–	140	–	–	–	–	–
	2	2,0	–	2,4	75	150	–	–	–	0,08sin5t
30	1	1,6	–	3	75	150	–	–	–	–
	2	1,5	–	3	80	70	0,15	–	8sin10t	–

Пример выполнения задания Д2. Исследование колебаний точки

Задача 1. Груз 1 весом $P = 20$ Н, лежащий на гладкой наклонной плоскости, прикреплён к недеформированной пружине, расположенной параллельно плоскости (рис. 4.10). Угол наклона плоскости к горизонту 30º, коэффициент жесткости пружины $c = 400$ Н/м. В начальный момент груз переместили вверх по наклонной плоскости (сжали пружину) на расстояние $\Delta\ell_0 = 0{,}1$ м относительно нерастянутой пружины и отпустили без начальной скорости.

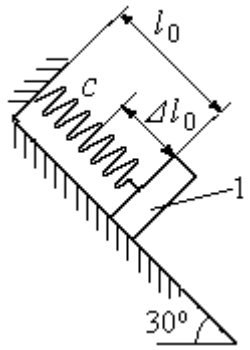


Рис. 4.10. Схема крепления груза и условия начала колебаний

Определить уравнение колебаний груза 1, а также частоту и амплитуду колебаний.

Решение

Расчетная схема колебаний груза 1 показана на рис. 4.11. Направим ось *Ox*, вдоль которой происходят колебания груза, вниз вдоль наклонной плоскости. Начало отсчёта координаты *x* выберем в положении статического равновесия груза (см. рис. 4.11) В произвольном положении груза, обозначенном координатой *x*, к нему приложены три силы: сила тяжести $\vec{P}$, реакция опоры наклонной плоскости $\vec{N}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$. Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*: $F_{\text{упр}\,x} = -c\Delta\ell$, где $\Delta\ell$ – удлинение пружины относительно её нерастянутого положения, включающее её растяжение *x* относительно выбранного начала координат и растяжение $\lambda_{\text{ст}}$ при статическом равновесии груза на наклонной плоскости.

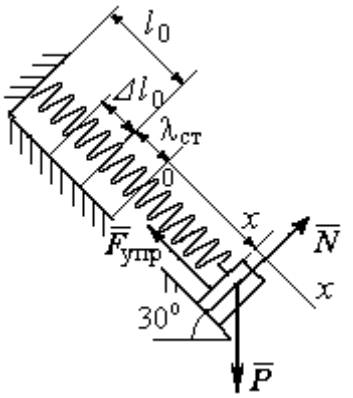


Рис. 4.11. Расчётная схема колебаний груза

С учетом выражения силы упругости получим дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*:

$$m\ddot{x} = P\sin 30^\circ - c(x + \lambda_{\text{ст}}).$$

В положении статического равновесия сила упругости уравновешивается силой, равной проекции силы тяжести на ось *x*: $P\sin 30^\circ - c\lambda_{\text{ст}} = 0$. Подставляя это выражение условия статического равновесия груза в уравнение движения, получим дифференциальное уравнение колебаний груза:

$$m\ddot{x} = -cx, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = 0,$$

где ω – угловая частота колебаний; $\omega = \sqrt{\dfrac{c}{m}} = 14{,}01$ рад/с.

Общее решение уравнения колебаний $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t$.

Для определения произвольных постоянных C_1 и C_2 вычислим координату x_0 начального положения груза на оси *Ox*.

Растяжение пружины в положении статического равновесия $\lambda_{ст} = \dfrac{P\sin 30^\circ}{c}$ = 0,025 м. Координата начального положения груза определяется величиной сжатия пружины и, поскольку начало отсчёта координаты *x* выбрано в положении статического равновесия груза, равна (со знаком!): $x_0 = -(\Delta\ell_0 + \lambda_{ст}) = -0{,}125$ м (см. рис. 4.11).

Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения колебаний при $t = 0$, получим $C_1 = -0{,}125$ м. Для определения второй константы вычислим скорость груза в произвольный момент времени: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t$. Подставим сюда начальное значение скорости груза при $t = 0$ $\dot{x} = V_0 = 0$, получим $C_2 = 0$. Окончательно уравнение движения груза 1 относительно положения статического растяжения пружины:

$$x(t) = -0{,}125\cos 14{,}01t \text{ м}.$$

Амплитуда колебаний груза $A = 0{,}125$ м.

Задача 2. Груз 1 весом $P = 20$ Н подвешен на недеформированной вертикальной пружине (рис. 4.12). Жесткость пружины $c = 800$ Н/м. В начальный момент груз был оттянут вниз в положение, при котором пружина растянулась на расстояние $\Delta\ell_0 = 0{,}1$ м, и в этом положении ему сообщена начальная скорость $V_0 = 2$ м/с, направленная вверх.

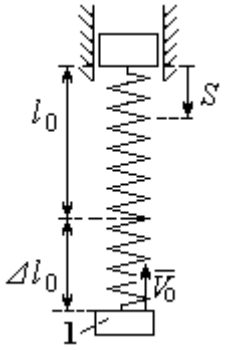


Рис. 4.12. Схема крепления груза и условия начала колебаний

Одновременно с началом движения груза верхний конец пружины стал совершать гармонические колебания по закону $S = a\sin 10t$, где $a = 0{,}02$ м.

Определить уравнение колебаний груза 1, а также частоту и амплитуду собственных колебаний.

Решение

Расчетная схема колебаний груза 1 показана на рис. 4.13. Направим ось *Ox*, вдоль которой происходят колебания груза, вертикально вниз. Начало отсчёта координаты *x* выберем в положении статического равновесия груза (см. рис. 4.13, *c*, *d*). В произвольном положении груза, обозначенном координатой *x*, к нему приложены две силы: сила тяжести $\vec{P}$ и сила упругости пружины $\vec{F}_{\text{упр}}$.

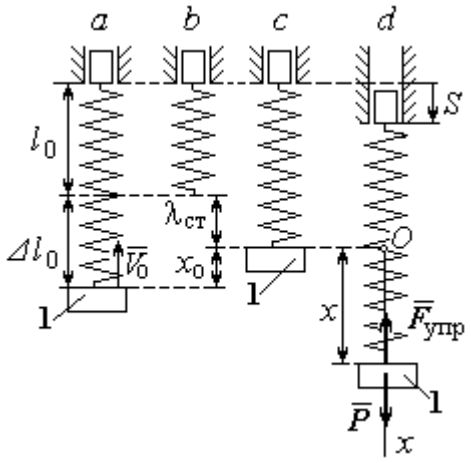


Рис. 4.13. Расчётная схема вынужденных колебаний груза: *a* – положение груза на начало колебаний; *b* – недеформированная пружина; *c* – статическое растяжение пружины под действием веса груза; *d* – положение груза в произвольный момент времени и перемещение точки подвеса пружины

Проекция силы упругости пружины на ось *Ox*

$$F_{\text{упр}\,x} = -c\Delta\ell = -c(x + \lambda_{\text{ст}} - S),$$

где $\Delta\ell$ – удлинение пружины, включающее её растяжение *x* относительно начала координат, растяжение $\lambda_{\text{ст}}$ при статическом равновесии груза и уменьшение растяжения при смещении верхнего конца, $\Delta\ell = (x + \lambda_{\text{ст}} - S)$.

С учетом выражения силы упругости получим дифференциальное уравнение движения груза в проекции на ось *Ox*:

$$m\ddot{x} = P - c(x + \lambda_{\text{ст}} - S).$$

В положении статического равновесия выполняется условие равенства сил: $P - c\lambda_{\text{ст}} = 0$.

После подстановки его в уравнение движения груза получаем дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$m\ddot{x} = -cx + cS, \text{ или } \ddot{x} + \omega^2 x = h\sin pt,$$

где ω – угловая частота собственных колебаний, $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$, ω = 19,81 рад/с; h – относительная амплитуда вынужденных колебаний, $h = \frac{ca}{m}$ = 7,85 м/с^2; p – угловая частота вынужденных колебаний, p = 10 рад/с.

При отсутствии резонанса (здесь $\omega \neq p$) общее решение уравнения вынужденных колебаний имеет вид $x = C_1\cos\omega t + C_2\sin\omega t + \frac{h}{\omega^2 - p^2}\sin pt$.

Для определения произвольных постоянных C_1 и C_2 вычислим координату x_0 начального положения груза на оси Ox. Координата начального положения груза (см. рис. 4.13, *b*) $x_0 = \Delta\ell_0 - \lambda_{ст}$. Растяжение пружины в положении статического равновесия $\lambda_{ст} = \frac{P}{c}$ = 0,02 м, тогда x_0 = 0,08 м. Подставляя значение координаты начального положения груза в общее решение уравнения вынужденных колебаний при t = 0, получим: $C_1 = x_0$ = 0,08 м.

Для определения второй константы вычислим скорость груза в произвольный момент времени: $\dot{x} = -C_1\omega\sin\omega t + C_2\omega\cos\omega t + \frac{hp}{\omega^2 - p^2}\cos pt$. Проекция скорости груза в начальный момент на ось Ox $V_{0x} = -V_0$. Подставив начальное значение скорости груза при $t = 0$ $\dot{x} = V_{0x} = -V_0$, получим: $C_2 = -\frac{V_0}{\omega} - \frac{hp}{\omega(\omega^2 - p^2)} = -0{,}11$ м.

Окончательно уравнение движения груза 1 относительно положения статического равновесия, м.

$$x(t) = 0{,}08\cos 19{,}82t - 0{,}11\sin 19{,}82t - 0{,}03\sin 10t.$$

Амплитуда вынужденных колебаний $A_{вын} = \frac{h}{\omega^2 - p^2}$ = 0,03 м. Амплитуда собственных колебаний груза $A_{соб} = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$ = 0,14 м.

4.5. Теорема об изменении кинетической энергии точки

Работой $A(\vec{F})$ силы $\vec{F}$, постоянной по модулю и направлению, на конечном прямолинейном перемещении S_1 точки приложения силы называется величина $A(\vec{F}) = FS_1\cos\alpha$. Если угол α острый, работа силы положительна. Если угол α тупой, – отрицательна. При $\alpha = 90°$ сила перпендикулярна перемещению точки и работа силы равна нулю.

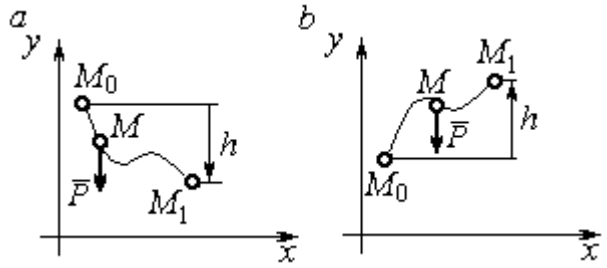


Рис. 4.14. Схема для вычисления работы силы тяжести:
a – перемещение точки сверху вниз;
b – перемещение точки снизу вверх

Работа силы тяжести материальной точки (вертикальной силы) при перемещении точки из положения M_0 в положение M_1 равна произведению модуля силы тяжести на вертикальное перемещение точки $A_{(M_0M_1)} = \pm Ph$, где P – величина силы тяжести точки; h – величина вертикального перемещения точки (рис. 4.14). Работа силы тяжести положительная, если начальная точка движения выше конечной, и отрицательная, – если ниже.

Работа силы упругости пружины на прямолинейном перемещении вдоль линии действия силы из положения недеформированной пружины на расстояние h определяется формулой $A(F_{\text{упр}}) = -\dfrac{ch^2}{2}$, где c – коэффициент жесткости (или просто жёсткость) пружины.

Кинетической энергией материальной точки называется скалярная величина $T = \dfrac{1}{2}mV^2$, где m – масса точки; V – её скорость. **Теорема об изменении кинетической энергии точки** заключается в том, что изменение кинетической энергии точки за конечный промежуток времени равно алгебраической сумме работ всех действующих на неё сил: $\dfrac{mV_1^2}{2} - \dfrac{mV_0^2}{2} = \sum A_{(M_0M_1)}$, где V_0, V_1 – скорость точки в начальном положении M_0 и в положении M_1; $\sum A_{(M_0M_1)}$ – сумма работ

всех сил, действующих на точку, при её перемещении из положения M_0 в положение M_1.

При несвободном движении точки сумма работ сил включает работу реакций связи. Если движение происходит без трения по неподвижной гладкой поверхности, то реакция связи направлена по нормали к поверхности и её работа при любом перемещении точки равна нулю.

Для определения реакций связи при несвободном движении точки используются уравнения движения точки в проекциях на оси естественной системы координат – касательную и нормальную: $m\frac{dV}{dt} = \sum F_\tau$, $m\frac{V^2}{\rho} = \sum F_n$, где $\sum F_\tau$, $\sum F_n$ – суммы проекций сил на касательную и нормальную оси естественной системы координат; ρ – радиус кривизны траектории точки.

4.6. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии

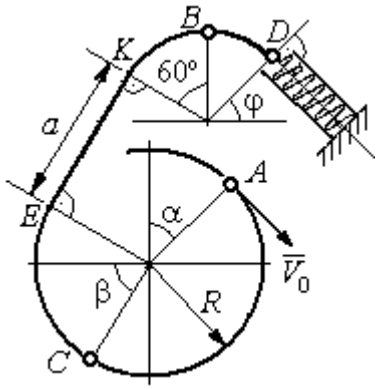
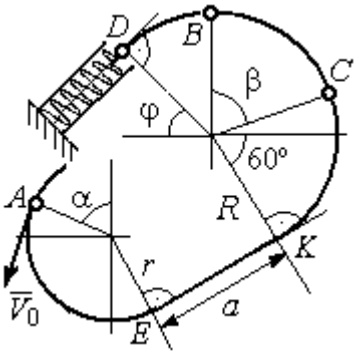
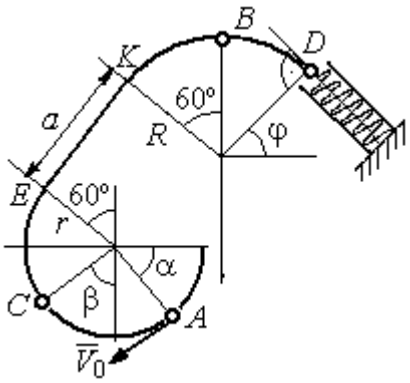
Тонкий стержень с надетым на него шариком массой *m* расположен в вертикальной плоскости и состоит из дуг окружностей радиусами *r* и *R* = 2*r*, соединённых прямолинейным отрезком *EK*, сопряжённым с дугами окружностей в точках *E* и *K*. В этих точках шарик переходит с одного участка стержня на другой, не изменяя величины и направления скорости. Длина отрезка *EK* = *a*.

В точке *A*, положение которой на дуге окружности определяется углом α, шарику сообщают начальную скорость V_0. По дугам окружностей шарик скользит без трения, а при движении по прямолинейному отрезку *EK* на него действует постоянная сила трения с коэффициентом трения *f*. На участках с вертикальным отрезком *EK* считать, что шарик прижимается к стержню силой, равной половине веса шарика.

Достигнув на дуге окружности точки *D*, шарик упирается в недеформированную пружину жёсткостью *c* и, продолжая движение по сопряженной прямой, сжимает её. Положение точки *D* определяется углом φ.

Определить величину максимального сжатия пружины, если шарик проходит наивысшее положении траектории – точку B со скоростью $V_B = kV_0$. При найденном значении начальной скорости рассчитать давление шарика на стержень в точке C, положение которой на дуге определяется углом β.

Варианты заданий приведены на рис. 4.15, 4.16. Исходные данные задания в табл. 4.3.

Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**	**Варианты № 3, 13, 23**
		

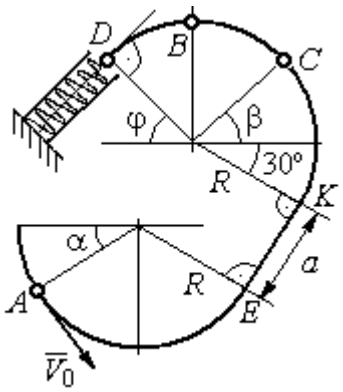
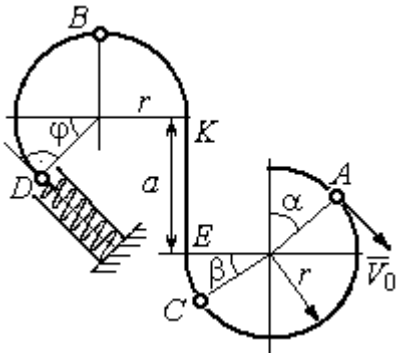
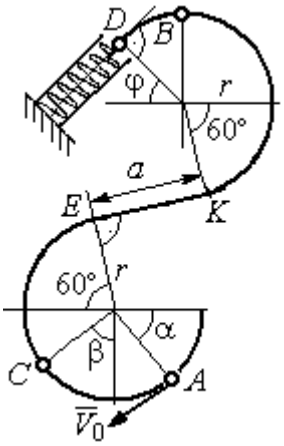
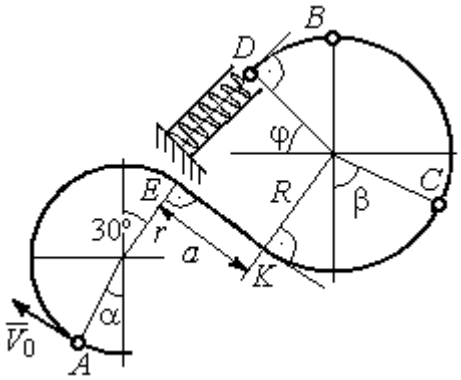
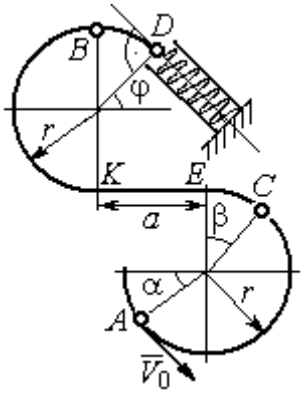
Варианты № 4, 14, 24	**Варианты № 5, 15, 25**	**Варианты № 6, 16, 26**
		

Рис. 4.15. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии.
Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

Окончание вариантов задания Д3

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	

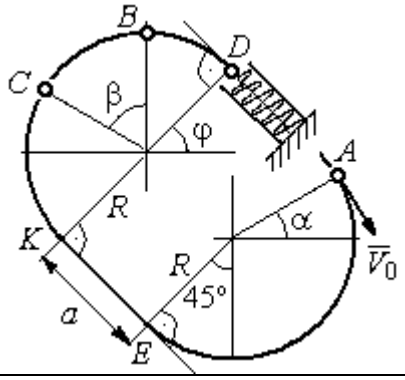
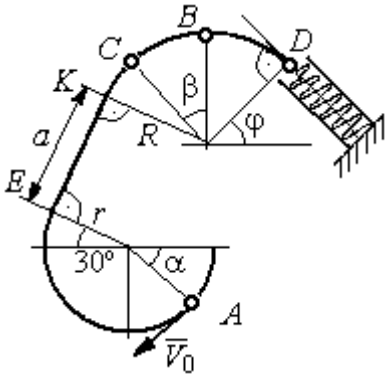
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	

Рис. 4.16. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 4.3

Исходные данные задания Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Номер варианта задания	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
m, кг	0,8	0,5	0,6	0,4	1,0	0,6	0,9	0,5	0,3	0,4	0,8	0,6	0,5	0,3	1,0
α, град	30	45	0	30	30	0	0	45	30	0	60	30	30	45	60
β , град	60	30	60	0	60	30	60	60	30	45	30	60	60	30	30
φ, град	0	60	30	0	0	30	45	0	30	45	30	30	0	30	45
r, м	0,4	0,4	0,5	0,3	0,6	0,5	0,3	0,6	0,4	0,5	0,3	0,5	0,4	0,5	0,8
a, м	0,5	0,6	0,9	1,4	0,8	1,2	0,5	0,5	1,4	0,5	0,8	0,5	0,8	0,6	0,6
f	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3	0,4	0,3
k	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4
c, Н/м	100	80	90	80	120	100	90	80	60	80	90	60	80	60	110

Окончание табл. 4.3

Номер варианта задания	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
m, кг	0,6	0,5	0,6	0,4	0,8	0,5	0,4	1,0	0,6	0,5	0,4	0,8	0,4	0,6	0,8
α, град	60	30	0	45	60	90	90	60	60	90	30	60	60	45	90
β, град	60	30	45	90	60	45	90	60	60	30	30	60	60	0	60
φ, град	45	60	60	60	30	90	0	90	45	60	60	90	30	60	0
r, м	0,6	0,4	0,8	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6	0,8	0,4	0,4	0,8	0,6	0,4
a, м	0,4	1,2	0,9	1,2	1,2	0,9	0,6	1,5	1,4	0,8	1,2	0,9	0,6	0,8	0,5
f	0,3	0,4	0,4	0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4
k	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
c, Н/м	80	60	90	60	100	90	80	110	80	60	60	80	60	80	100

Пример выполнения задания Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Тонкий стержень, расположенный в вертикальной плоскости, состоит из двух дуг окружностей, сопряженных в точках E и K с прямолинейным отрезком EK длиной $a = 0{,}6$ м (рис. 4.17). Радиусы окружностей $R = 1$ м и $r = 0{,}5$ м. Диаметры дуг окружностей, проведённые в точках E и K, составляют с горизонтом угол 30°. На стержень надет шарик массой $m = 0{,}5$ кг. В точке A, положение которой на дуге радиуса R определяется углом $\alpha = 60°$ (см. рис. 4.17), шарику сообщают начальную скорость V_0, после чего он начинает движение. По дугам окружностей шарик скользит без трения. При движении по прямой EK на него действует постоянная сила трения с коэффициентом трения $f = 0{,}2$. Достигнув точки D на верхней дуге, шарик упирается в пружину жесткостью $c = 100$ Н/м и, двигаясь по сопряжённой прямой без трения, сжимает её. Найти величину максимального сжатия пружины, если наивысшее положение на траектории (точку B) шарик проходит со скоростью $V_B = kV_0$ при $k = 0{,}3$. При найденном значении начальной скорости рассчитать давление шарика на стержень в точке C, положение которой на дуге определяется углом $\beta = 90°$.

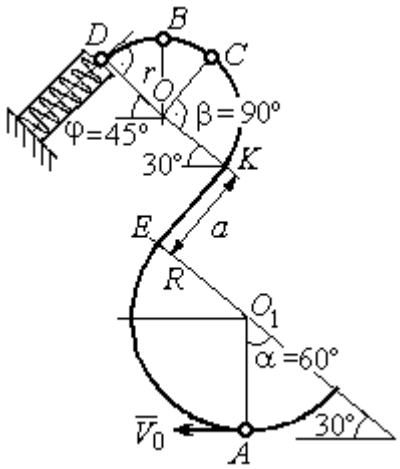


Рис. 4.17. Схема движения шарика

Решение

Рассмотрим движение шарика по стержню из начального положения A в наивысшее положение – точку B.

При движении шарика по дугам окружностей работу совершает только сила тяжести. Реакция гладкой поверхности стержня в любой момент времени перпендикулярна поверхности стержня, и потому её работа при перемещении шарика равна нулю.

На участке движении шарика по прямой EK на него действуют сила тяжести $\vec{P}$, нормальная реакция опоры $\vec{N}_{EK}$ и сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ (рис. 4.18, b). Работу совершают сила тяжести и сила трения. Работа реакции опоры стержня равна нулю.

Обозначим $h_{(AB)}$ – перепад высот точек A и B на траектории; V_A – начальная скорость шарика в точке A, $V_A = V_0$; V_B – его скорость в точке B, $V_B = 0{,}3V_0$. Для вычисления перепада высот точек A и B имеем выражение (рис. 4.18, a):

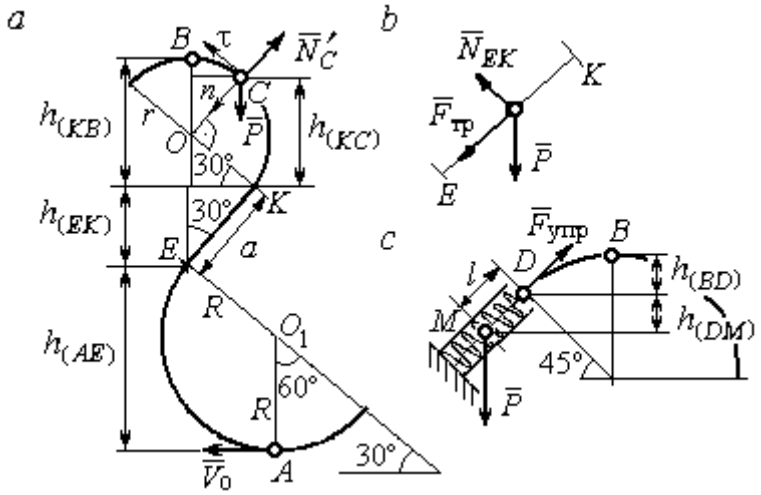


Рис. 4.18. Силы, действующие на шарик во время движения и перепады высот

$$h_{(AB)} = h_{(AE)} + h_{(EK)} + h_{(KB)} =$$

$$R(1+\sin 30^\circ) + a\cos 30^\circ +$$

$$r(1+\sin 30^\circ).$$

Будем считать шарик материальной точкой. Применяя теорему об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из положения A в положение B, получим: $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_A^2}{2} = A(\vec{P}) + A(\vec{F}_{\text{тр}})$, где $A(\vec{P}) = -Ph_{(AB)}$, $A(\vec{F}_{\text{тр}}) = -F_{\text{тр}}a$ – работы, соответственно, силы тяжести на участке движения AB и силы трения на отрезке EK. Сила трения равна $F_{\text{тр}} = f \cdot N_{EK} = f \cdot mg\cos 60^\circ$ (рис. 4.18, a, b).

В результате, теорема об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из начального положения A в конечное положение B принимает

вид: $\frac{m(0{,}3V_0)^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = -\,mg\left[(R+r)(1+\sin 30^\circ) + a(\cos 30^\circ + f\cdot\cos 60^\circ)\right]$. После подстановки данных задачи, получим: $0{,}91V_0^2 = 55{,}517$, откуда находим необходимое значение начальной скорости шарика: V_0 = 7,81 м/с.

Найдём давление шарика на стержень в точке *C*.

Проведём в точке *C* оси естественной системы координат – касательную $C\tau$ и нормаль Cn (рис. 4.18, *а*). Уравнение движения шарика в точке *C* в проекции на нормальную ось имеет вид: $m\frac{V_C^2}{r} = P\cos 30^\circ - N'_C$, где V_C – скорость шарика в точке *C*, N'_C – реакция стержня, приложенная к шарику. Направление реакции на рис. 4.18, *а* соответствует предположению, что шарик давит на стержень в направлении центра дуги окружности.

Для определения скорости шарика в точке *C* воспользуемся тем, что скорость шарика в точке *B* уже известна, и применим теорему об изменении кинетической энергии при движении шарика из начального положения *C* в конечное положение *B*. На этом участке движения работу совершает только сила тяжести шарика. Получим $\frac{mV_B^2}{2} - \frac{mV_C^2}{2} = -Ph_{(CB)}$, где V_C, V_B – значения скорости шарика в точках *C* и *B*; $h_{(CB)}$ – перепад высот точек *C* и *B*; $h_{(CB)} = r(1-\sin 30^\circ)$ = 0,5*r* (см. рис. 4.18, *а*). В результате теорема об изменении кинетической энергии принимает вид: $mV_C^2 = mV_B^2 + 2mgh_{(CB)}$ или $V_C^2 = V_B^2 + gr$. Отсюда, при условии $V_B = 0{,}3V_0$ = 2,34 м/с, найдём V_C = 3,22 м/с.

Реакция опоры шарика: $N'_C = P\cos 30^\circ - m\frac{V_C^2}{r}$ = – 6,12 Н.

Отрицательное значение реакции опоры шарика означает, что вектор реакции $\vec{N}'_C$ в точке *C* (см. рис. 4.18, *а*) направлен в противоположную сторону. Давление шарика на стержень в точке *C* равно модулю реакции опоры.

Найдём величину максимального сжатия пружины.

Рассмотрим движение шарика на участке от точки *B* до положения максимально сжатой пружины – точки *M*. Движение на этом участке происходит по дуге окружности *BD* и по прямой *DM*. При этом сила тяжести совершает работу на всём участке движения, а сила упругости – на отрезке сжатия пружины. Обозначим величину максимального сжатия пружины $MD = l$.

По теореме об изменении кинетической энергии точки при движении шарика из положения *B* в *M* получим: $\frac{mV_M^2}{2} - \frac{mV_B^2}{2} = A(\vec{P}) + A(\vec{F}_{\text{упр}})$, где V_M, V_B – скорость шарика в точках *M* и *B*. Работа силы тяжести $A(\vec{P}) = Ph_{(BM)} = $ $= P\left[h_{(BD)} + h_{(DM)}\right] = mg\left[r\left(1 - \cos 45^\circ\right) + l\cos 45^\circ \right]$. Работа силы упругости на прямолинейном участке *DM* длиной *l*: $A(\vec{F}_{\text{упр}}) = -\frac{cl^2}{2}$. Условие максимального сжатия пружины означает, что в точке *M* скорость шарика обращается в нуль: $V_M = 0$, тогда теорема об изменении кинетической энергии точки принимает вид: $-\frac{mV_B^2}{2} = mg\left[r\left(1 - \cos 45^\circ\right) + l\cos 45^\circ\right] - \frac{cl^2}{2}$. Подставляя данные задачи и с учётом того, что скорость шарика в наивысшей точке *B* найдена из предыдущих рассуждений $V_B = 2{,}34$ м/с, получим квадратное уравнение для определения величины максимального сжатия пружины $50l^2 - 3{,}468l - 2{,}085 = 0$. В качестве ответа принимается положительный корень уравнения $l = 0{,}24$ м.

. ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

5.1. Описание движений твёрдых тел на основе общих теорем динамики системы

Поступательное движение твердого тела описывается теоремой о движении центра масс механической системы. В проекциях на координатные оси дифференциальные уравнения поступательного движения твердого тела имеют вид: $m\ddot{x}_C = \sum F^e_{kx}$, $m\ddot{y}_C = \sum F^e_{ky}$, $m\ddot{z}_C = \sum F^e_{kz}$, где m – масса тела; x_C, y_C, z_C – координаты центра масс тела; F^e_{kx}, F^e_{ky}, F^e_{kz} – проекции на оси координат внешних сил, действующих на твердое тело.

Вращательное движение твердого тела относительно неподвижной оси z описывается теоремой об изменении кинетического момента.

Дифференциальное уравнения вращательного движения тела имеет вид:

$$J_z \frac{d\omega}{dt} = \sum M_z(\vec{F}^e_k) \quad \text{или} \quad J_z \ddot{\varphi} = \sum M_z(\vec{F}^e_k),$$

где ω – угловая скорость тела; $\omega = \dot{\varphi}$; φ – угол поворота тела; $\sum M_z(\vec{F}^e_k)$ – моменты внешних сил относительно оси z; J_z – момент инерции тела относительно оси z.

Уравнение вращательного движения можно представить в алгебраической форме: $J_z \varepsilon = \sum M_z(\vec{F}^e_k)$, где ε – угловое ускорение тела; $\varepsilon = \dot{\omega}$.

Плоскопараллельное движение твердого тела описывается на основании теорем о движении центра масс и изменении кинетического момента относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения. В проекции на координатные оси уравнения плоскопараллельного движения тела имеют вид:

$$ma_{Cx} = \sum F^e_{kx}, \quad ma_{Cy} = \sum F^e_{ky}, \quad J_{zC}\varepsilon = \sum M_{zC}(\vec{F}^e_k),$$

где a_{Cx}, a_{Cy} – проекции ускорения центра масс тела на координатные оси; F^e_{kx},

F_{ky}^{e} – проекции на оси координат внешних сил, действующих на тело; J_{zC} – момент инерции тела относительно оси *z*, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости движения; ε – угловое ускорение тела; $M_{zC}(\vec{F}_k^{e})$ – моменты внешних сил относительно оси, проходящей через центр масс.

Проводя динамический расчет механической системы, следует рассматривать движение тел системы в отдельности, предварительно освободив их от связей и заменив действие связей реакциями. Далее на основании общих теорем динамики системы следует составить уравнения движения каждого тела.

5.2. Задание Д4. Динамический расчет механической системы

Механизм состоит из трёх тел – груза 1, катка 2 и блока 3, соединенных нерастяжимыми нитями или невесомыми стержнями.

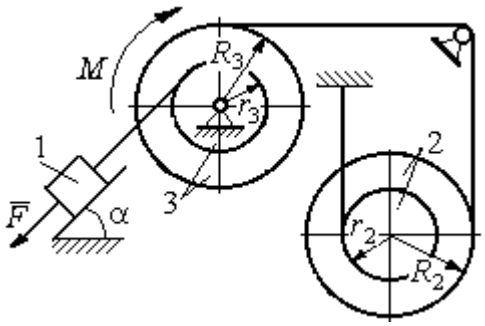
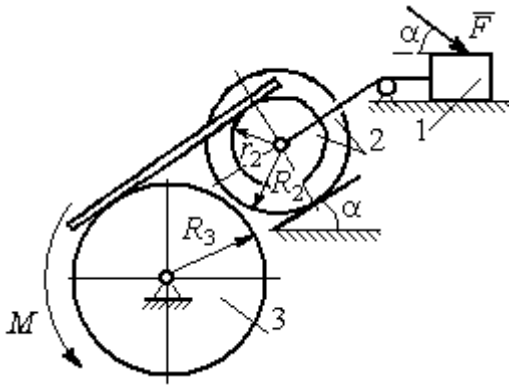
Движение механизма происходит в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом *M*. Направление действия силы $\vec{F}$ определяется углом α. Качение катка 2 происходит без скольжения. Проскальзывание между дисками и соединяющими их невесомыми стержнями или нитями отсутствует.

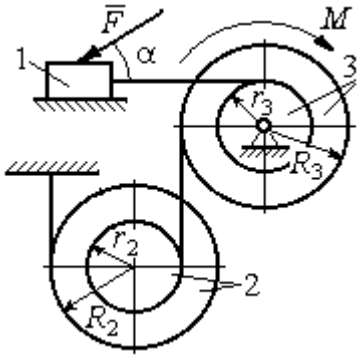
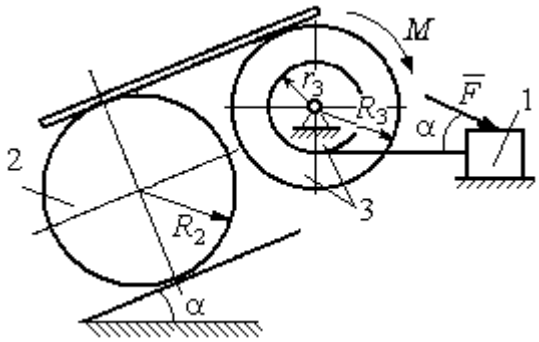
Радиусы ступеней катка 2 и блока 3 на схемах обозначены R_2, r_2 и R_3, r_3.

Сплошные диски считать однородными. Радиусы инерции неоднородных (ступенчатых) дисков относительно осей, проходящих через центры масс перпендикулярно плоскости движения, равны i_{z2}, i_{z3}.

Найти ускорение груза 1 и динамические реакции, действующие на ось блока 3.

Варианты заданий представлены на рис. 5.1, 5.2. Исходные данные приведены в табл. 5.1.

Варианты № 1, 11, 21	Варианты № 2, 12, 22
	

Варианты № 3, 13, 23	Варианты № 4, 14, 24
	

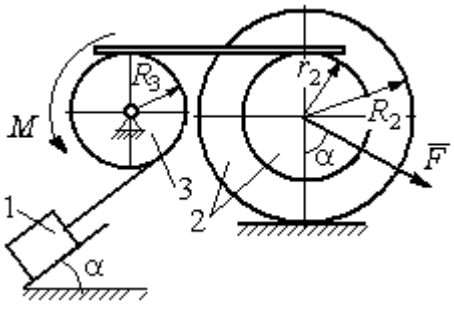
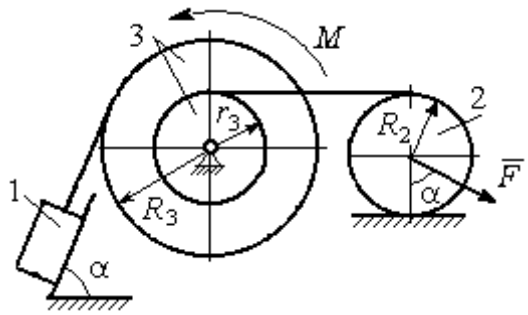
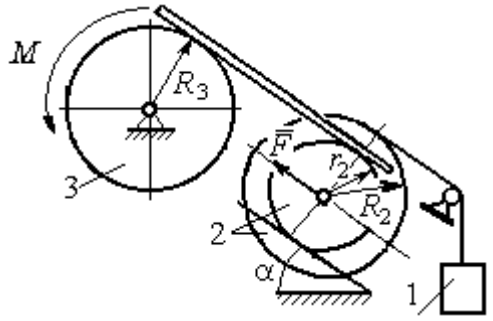
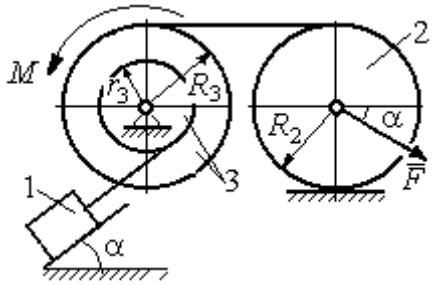
Варианты № 5, 15, 25	Варианты № 6, 16, 26
	

Рис. 5.1. Задание Д4. Динамический расчёт механической системы.
Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

Окончание вариантов задания Д4

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	

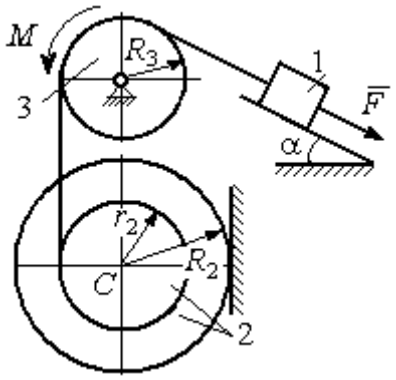
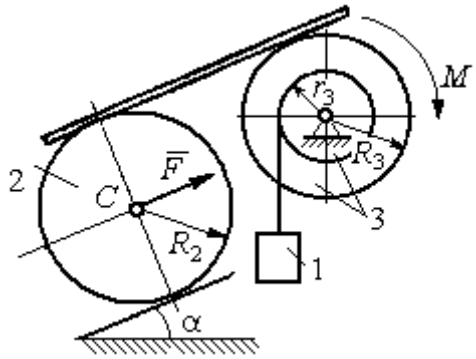
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	

Рис. 5.2. Задание Д4. Динамический расчёт механической системы.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 5.1

Исходные данные задания Д4. Динамический расчёт механической системы

Номер варианта задания	P_1, Н	P_2, Н	P_3, Н	F, Н	M, Н·м	α, град	R_2, м	r_2, м	R_3, м	r_3, м	i_{z2}, м	i_{z3}, м
1	P	P	$2P$	P	$2Pr$	60	$3r$	r	$2r$	r	$2r$	$r\sqrt{2}$
2	$3P$	P	$3P$	$3P$	Pr	30	$2r$	r	$2r$	–	$2r$	–
3	$4P$	$3P$	$4P$	$2P$	$2Pr$	60	$2r$	r	$2r$	r	$2r$	$2r$
4	$2P$	$2P$	$4P$	P	$4Pr$	45	$3r$	–	$3r$	r	–	$r\sqrt{2}$
5	P	$3P$	$3P$	$2P$	$3Pr$	30	$3r$	r	r	–	$2r$	–
6	P	$2P$	$4P$	$4P$	$6Pr$	60	$3r$	–	$3r$	r	–	$r\sqrt{2}$
7	P	$2P$	$3P$	$2P$	$3Pr$	45	$3r$	r	r	-	$r\sqrt{3}$	–

Окончание табл. 5.1

Номер варианта задания	P_1, Н	P_2, Н	P_3, Н	F, Н	M, Н·м	α, град	R_2, м	r_2, м	R_3, м	r_3, м	i_{z2}, м	i_{z3}, м
8	$2P$	$3P$	$3P$	P	$3Pr$	30	$2r$	–	$2r$	r	–	$r\sqrt{3}$
9	$3P$	P	$3P$	P	$2Pr$	30	$2r$	r	$2r$	–	$r\sqrt{2}$	–
10	P	P	$3P$	P	$2Pr$	60	$3r$	–	$3r$	r	–	$r\sqrt{3}$
11	P	P	$3P$	$2P$	$3Pr$	30	$3r$	$2r$	$2r$	r	$r\sqrt{2}$	$r\sqrt{2}$
12	$2P$	P	$2P$	$4P$	Pr	60	$3r$	r	$3r$	–	$r\sqrt{3}$	–
13	$3P$	P	$3P$	$3P$	$2Pr$	30	$3r$	$2r$	$2r$	r	$2r$	$r\sqrt{2}$
14	$2P$	P	$3P$	$2P$	$4Pr$	60	$2r$	–	$3r$	$2r$	–	$2r$
15	P	$2P$	$4P$	P	$4Pr$	45	$3r$	$2r$	$2r$	–	$r\sqrt{3}$	–
16	P	$3P$	$4P$	$2P$	$3Pr$	30	$2r$	–	$2r$	r	–	$r\sqrt{2}$
17	P	P	$3P$	$2P$	$6Pr$	60	$3r$	r	$3r$	-	$r\sqrt{3}$	
18	$2P$	$2P$	$3P$	P	$3Pr$	60	$2r$	–	$3r$	r	–	$r\sqrt{2}$
19	$2P$	P	$2P$	$3P$	$4Pr$	30	$3r$	r	$3r$	–	$2r$	–
20	P	P	$3P$	P	$2Pr$	45	$2r$	–	$2r$	r	–	$r\sqrt{3}$
21	$2P$	P	$4P$	$2P$	$4Pr$	60	$2r$	r	$3r$	r	$r\sqrt{2}$	$2r$
22	P	P	$2P$	$5P$	$2Pr$	45	$3r$	$2r$	$2r$	–	$2r$	–
23	$2P$	$2P$	$3P$	$3P$	$2Pr$	60	$3r$	r	$2r$	r	$2r$	$r\sqrt{2}$
24	$4P$	P	$3P$	P	$3Pr$	30	$2r$	–	$3r$	r	–	$r\sqrt{3}$
25	P	$3P$	$2P$	P	$2Pr$	60	$3r$	r	r	–	$r\sqrt{3}$	–
26	P	$3P$	$4P$	$3P$	$3Pr$	45	$2r$	–	$3r$	$2r$	–	$r\sqrt{3}$
27	P	P	$4P$	$2P$	$4Pr$	30	$2r$	r	$2r$	-	$r\sqrt{3}$	
28	$2P$	$3P$	$3P$	P	$6Pr$	30	$2r$	–	$3r$	$2r$	–	$r\sqrt{2}$
29	$2P$	P	$2P$	$2P$	$2Pr$	45	$2r$	r	r	–	$2r$	–
30	P	P	$4P$	P	$4Pr$	60	$3r$	–	$3r$	$2r$	–	$2r$

Пример выполнения задания Д4. Динамический расчёт механической системы

Механизм (рис. 5.3) состоит из груза 1, однородного диска – катка 2 и неоднородного диска – блока 3, соединённых друг с другом нерастяжимыми нитями. Система движется в вертикальной плоскости из состояния покоя.

Движение происходит под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, равных по модулю: $P_1 = 2P$, $P_2 = 2P$, $P_3 = 3P$, силы $\vec{F}$, приложенной в центре масс катка 2, равной по величине: $F = 3P$, и пары сил с моментом $M = Pr$, приложенных

к блоку 3. Механизм является неизменяемой механической системой. Радиус катка 2 $R_2 = 2r$. Качение катка по наклонной плоскости происходит без проскальзывания. Радиусы ступенчатого блока 3: $R_3 = 3r$, $r_3 = r$. Радиус инерции блока 3 $i_3 = r\sqrt{3}$.

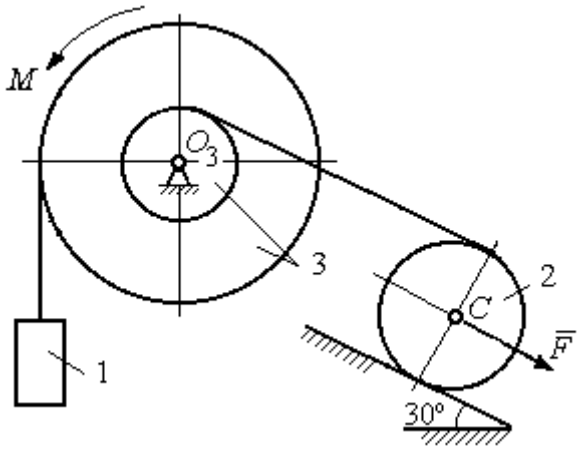


Рис. 5.3. Схема механической системы

Применяя метод динамического расчета механической системы найти ускорение груза 1 и динамические реакции, действующие на ось вращающегося блока 3.

Решение

Освобождаем систему от связей. На рис. 5.4 изображены внешние силы, действующие на каждое тело, после освобождения его от связей.

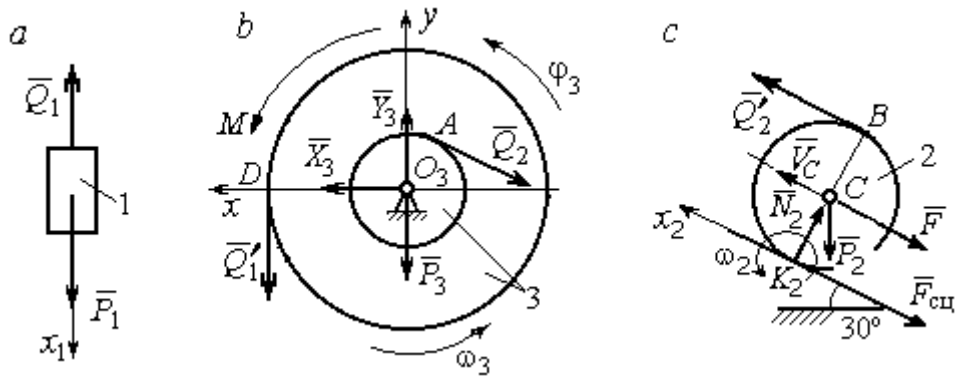


Рис. 5.4. Расчетные схемы для описания движения тел, входящих в систему:
a – поступательное движение груза 1; *b* – вращательное движение блока 3;
c – плоское движение катка 2

Груз 1 совершает поступательное движение. К нему приложены сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция нити $\vec{Q}_1$ (рис. 5.4, *a*). Предположим, груз 1 движется вниз, и направим ось x_1 в сторону движения груза.

Уравнение движения груза в проекции на ось x_1 в соответствии с теоремой о движении центра масс механической системы имеет вид:

$$m_1 a_1 = \sum F_{kx} = P_1 - Q_1 = 2P - Q_1,$$

где m_1, a_1 – соответственно, масса груза 1 и его ускорение, $m_1 = \frac{P_1}{g} = \frac{2P}{g}$.

Блок 3 вращается вокруг неподвижной оси *z*, проходящей через его центр масс O_3, перпендикулярно плоскости диска. Направление вращения блока, соответствующее выбранному движению вниз груза 1, показано на рис. 5.4, *b* дуговой стрелкой ω_3.

На блок действуют сила тяжести $\vec{P}_3$, силы реакции подшипника $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, момент *M* и реакции нитей $\vec{Q}_1'$ и $\vec{Q}_2$ (см. рис. 5.4, *b*). При составлении уравнения вращательного движения блока 3 моменты сил считаем положительными, если они поворачивают блок в сторону его вращения.

Уравнение вращения блока 3 имеет вид:

$$J_{zO_3}\varepsilon_3 = \sum M_{zO_3}(F_k) = Q_1'R_3 + M - Q_2r_3 = Q_1 3r + Pr - Q_2r,$$

где J_{zO_3} – момент инерции блока 3 относительно оси *z*; ε_3 – угловое ускорение диска 3, $J_{zO_3} = m_3 i_3^2 = \frac{P_3}{g}(r\sqrt{3})^2 = \frac{9Pr^2}{g}$.

Каток 2 совершает плоскопараллельное движение. К нему приложены сила тяжести $\vec{P}_2$, сила $\vec{F}$, реакция нити $\vec{Q}_2'$ и реакция наклонной плоскости, состоящая из нормальной реакции опоры $\vec{N}_2$ и силы сцепления катка с поверхностью $\vec{F}_{\text{сц}}$. Согласно принципу равенства действия и противодействия, модули сил $\vec{Q}_2$ и $\vec{Q}_2'$ равны. На рис. 5.4, *c* показаны направления действия сил, приложенных к диску 2. В соответствии с направлением движения груза 1, центр масс катка 2 движется вверх параллельно наклонной плоскости. Направление движения центра масс катка 2 показано направлением оси x_2. Направление вращения катка 2 показано дуговой стрелкой угловой скорости ω_2 (см. рис 5.4, *c*).

Плоскопараллельное движение катка 2 описывается уравнением движения его центра масс и уравнением вращения вокруг оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости диска. Составляя уравнение движения, получим:

$$m_2 a_C = Q_2' - F - F_{\text{сц}} - P_2\cos 60^\circ = Q_2 - 3P - F_{\text{сц}} - P,$$

$$J_C\varepsilon_2 = Q_2'R_2 + F_{\text{сц}}R_2 = Q_2 2r + F_{\text{сц}}2r,$$

где m_2 – масса катка 2, $m_2 = \dfrac{P_2}{g} = \dfrac{2P}{g}$; a_C, ε_2 – ускорение центра масс и угловое ускорение катка 2; J_C – момент инерции однородного катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости диска, $J_C = \dfrac{m_2 R_2^2}{2} = \dfrac{PR_2^2}{g} = \dfrac{4Pr^2}{g}$. В уравнении вращательного движения диска момент силы считается положительным, если создаваемый им поворот направлен в сторону вращения диска,

К системе четырех уравнений, описывающих движения тел в системе, необходимо добавить уравнения связей. Если предположить, что скорость центра масс катка 2 равна V_C, то угловая скорость катка определится по формуле: $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK_2} = \dfrac{V_C}{R_2}$, где CK_2 – расстояние от центра масс катка 2 до его мгновенного центра скоростей (см. рис. 5.4, *c*). Продифференцировав по времени последнее равенство, получим уравнение связи между ускорением центра масс катка 2 и его угловым ускорением: $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \dfrac{\dot{V}_C}{R_2} = \dfrac{a_C}{R_2} = \dfrac{a_C}{2r}$.

Скорость точки *B* катка 2 (см. рис. 5.4, *c*) $V_B = \omega_2 \cdot BK_2 = \dfrac{V_C}{R_2} 2R_2 = 2V_C$. Точка *B* катка 2 и точка *A* блока 3 соединены нитью (см. рис. 5.3), поэтому их скорости равны. Приравняв скорости точек *A* и *B*, получим равенство: $2V_C = V_B = V_A = \omega_3 r_3 = \omega_3 r$, откуда $\omega_3 = \dfrac{2V_C}{r}$. После дифференцирования последнего выражения найдём соотношение между ускорениями: $\varepsilon_3 = \dfrac{2a_C}{r}$.

Скорость груза 1 связана со скоростью центра масс диска 2 следующим образом: $V_1 = V_D = \omega_3 R_3 = \dfrac{2V_C}{r} 3r = 6V_C$. Тогда $a_1 = 6a_C$.

В результате получены четыре уравнения, описывающие движение тел в системе:

$$\frac{2P}{g}a_1 = 2P - Q_1, \quad \frac{9Pr^2}{g}\varepsilon_3 = Q_1 3r + Pr - Q_2 r;$$

$$\frac{2P}{g}a_C = Q_2 - 3P - F_{\text{сц}} - P, \quad \frac{4Pr^2}{g}\varepsilon_2 = Q_2 2r + F_{\text{сц}} 2r$$

и три уравнения связей: $\varepsilon_2 = \frac{a_C}{2r}$, $\varepsilon_3 = \frac{2a_C}{r}$, $a_1 = 6a_C$.

После подстановки уравнений связи в уравнения движения тел получим систему четырёх уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\frac{12P}{g}a_C = 2P - Q_1, \quad \frac{18P}{g}a_C = 3Q_1 + P - Q_2,$$

$$\frac{2P}{g}a_C = Q_2 - 4P - F_{\text{сц}}, \quad \frac{P}{g}a_C = Q_2 + F_{\text{сц}},$$

которая может быть решена любым известным из курса математики способом.

Например, исключив из первых двух уравнений величину Q_1, а из третьего и четвёртого уравнений – величину $F_{\text{сц}}$, получим систему двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\frac{54P}{g}a_C = 7P - Q_2, \; \frac{3P}{g}a_C = 2Q_2 - 4P,$$

откуда $a_C = \frac{10}{111}g$, $Q_2 = \frac{79}{37}P$. Величину натяжения нити Q_1 находим из первого уравнения исходной системы: $Q_1 = \frac{34}{37}P$.

Для вычисления динамической реакции R_3 оси блока 3 заметим, что центр масс блока 3 неподвижен и его ускорение равно нулю, $\vec{a}_{O_3} = 0$. Тогда уравнения движения центра масс блока 3 в проекциях на оси x, y имеют вид :

$$m_3 a_{O_3 x} = X_3 - Q_2 \cos 30^\circ = 0, \; m_3 a_{O_3 y} = Y_3 - Q_1 - P_3 - Q_2 \cos 60^\circ = 0,$$

где X_3, Y_3, – проекции реакции R_3 оси вращающегося блока 3 на оси x, y (см. рис. 5.4, *b*). Отсюда, с учетом значений $Q_1 = 0{,}919P$ и $Q_2 = 2{,}135P$, проекции динамической реакции оси блока 3: $X_3 = Q_2 \cos 30^\circ = 1{,}85P$, $Y_3 = Q_1 + P_3 + Q_2 \cos 60^\circ =$

4,98P. Полная величина динамической реакции оси блока 3: $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} =$ 5,31P.

5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы

Кинетическая энергия тела при поступательном движении: $T = \frac{1}{2} m V_C^2$, где m – масса тела; V_C – скорость центра масс тела. **Кинетическая энергия тела при вращательном движении** вокруг неподвижной оси z: $T = \frac{1}{2} J_z \omega^2$, где J_z – момент инерции тела относительно оси z; ω – угловая скорость тела. Для дисков с равномерно распределённой массой момент инерции относительно оси z, проходящей через центр масс: $J_z = \frac{1}{2} m R^2$, где R – радиус диска. Для тел с неравномерно распределённой массой $J_z = m i_z^2$, где i_z – радиус инерции. **Кинетическая энергия тела при плоскопараллельном движении:** $T = \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega^2$, где m – масса тела; V_C, ω – скорость центра масс и угловая скорость тела; J_{zC} – момент инерции тела относительно оси z, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

Работа постоянной по модулю и направлению силы $\vec{F}$ на конечном прямолинейном перемещении S точки приложения силы: $A(F) = FS\cos\alpha$, где α – угол между вектором силы и перемещением. Если угол α острый, работа положительна. Если тупой – отрицательна. При $\alpha = 90°$ сила перпендикулярна перемещению точки и работа силы равна нулю.

Работа пары сил с постоянным моментом M при повороте тела на конечный угол φ: $A = \pm M\varphi$, где φ – угол поворота тела. Работа считается положительной, если пара сил стремится повернуть тело в направлении его вращения, и отрицательной – в противном случае.

Мощностью силы $\vec{F}$ называют величину $N(F)$, равную скалярному произведению силы на скорость точки её приложения: $N(F) = \vec{F} \cdot \vec{V} = = F \cdot V\cos\alpha$, где V – скорость точки приложения силы; α – угол между вектором силы и вектором скорости точки приложения силы.

При плоском движении тела мощность силы выражается суммой скалярных произведений векторов: $N = \vec{F} \cdot \vec{V}_O + \vec{M}_O(\vec{F}) \cdot \vec{\omega} = F \cdot V_O\cos\alpha \pm Fh_O\omega$, где $\vec{V}_O$ – вектор скорости точки, выбранной полюсом; $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости тела; $\vec{M}_O$ – вектор момента силы $\vec{F}$ относительно полюса; h_O – плечо силы $\vec{F}$ относительно полюса *O*.

Теорема об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме. Производная по времени от кинетической энергии системы равна сумме мощностей внешних и внутренних сил $\frac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e) + \sum N(\vec{F}_k^i)$, где T – кинетическая энергия системы; $\sum N(\vec{F}_k^e)$, $\sum N(\vec{F}_k^i)$ – сумма мощностей, соответственно, внешних и внутренних сил.

Теорема об изменении кинетической энергии системы на конечном перемещении. Изменение кинетической энергии системы на её конечном перемещении равно сумме работ внешних и внутренних сил, действующих на систему $T - T_0 = \sum A(\vec{F}_k^e) + \sum A(\vec{F}_k^i)$, где T, T_0 – кинетическая энергия системы, соответственно, в текущем и начальном состояниях; $\sum A(\vec{F}_k^e)$, $\sum A(\vec{F}_k^i)$ – сумма работ внешних и внутренних сил при перемещении системы из начального состояния в текущее.

Механические системы, состоящие из абсолютно твердых тел, соединенных гибкими нерастяжимыми нитями, называются **неизменяемыми**. В неизменяемых системах сумма работ внутренних сил и, следовательно, сумма мощностей этих сил равны нулю. Поэтому для таких систем в теореме об изменении кинетической энергии достаточно учитывать только внешние силы.

5.4. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Неизменяемая механическая система состоит из ступенчатого и однородного дисков, соединённых нерастяжимой нитью или невесомым стержнем. Нити и стержни, соединяющие диски, параллельны плоскостям качения дисков. Качение дисков без скольжения. Скольжение между невесомым стержнем и дисками отсутствует.

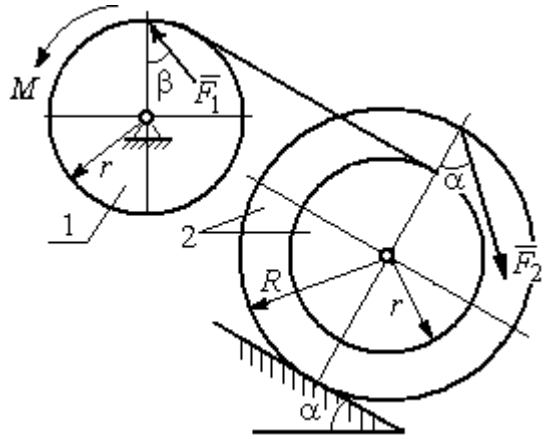
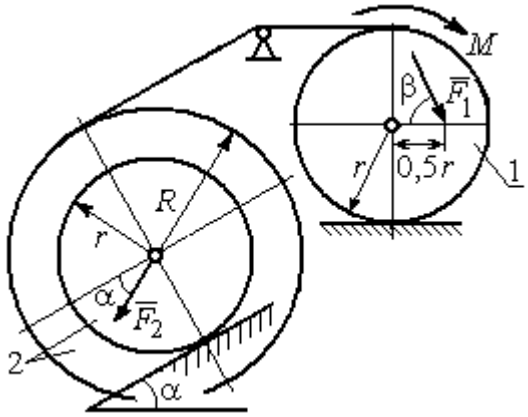
Вес дисков P_1 и P_2. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и пары сил с моментом *M*. Направления действия сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и наклон плоскости (если он есть) определяются углами α или β, показанными на схемах механизмов.

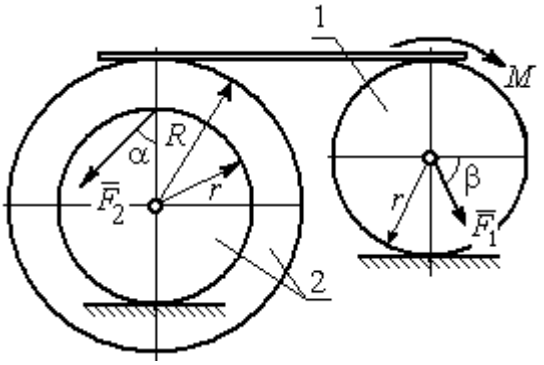
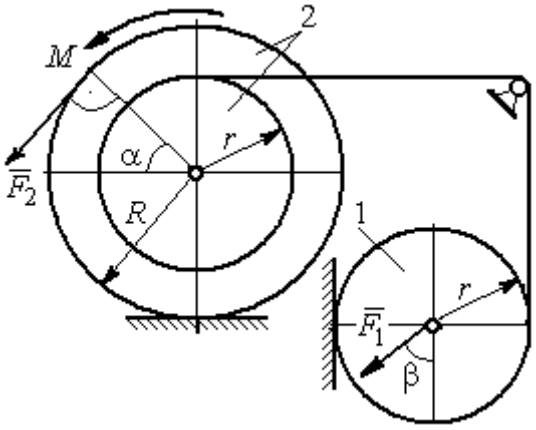
Радиус однородного диска *r*. Радиусы ступеней ступенчатого диска *R* и *r*. Радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, равен i_z.

1. Найти ускорение центра масс диска 2.

2. Найти реакцию опоры диска 2 на плоскость (её нормальную составляющую и силу сцепления диска с плоскостью).

Варианты задания приведены на рис. 5.5, 5.6, исходные данные представлены в табл. 5.2.

Варианты № 1, 11, 21	Варианты № 2, 12, 22
	

Варианты № 3, 13, 23	Варианты № 4, 14, 24
	

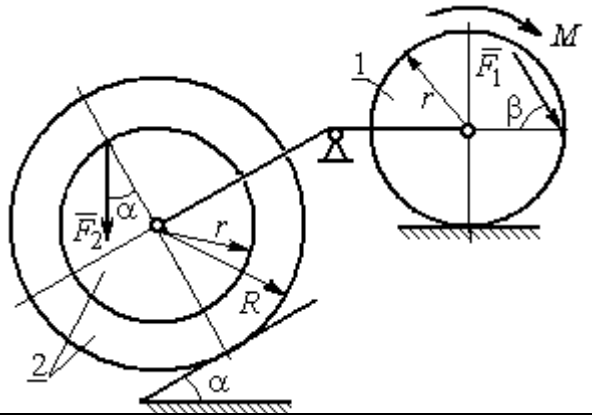
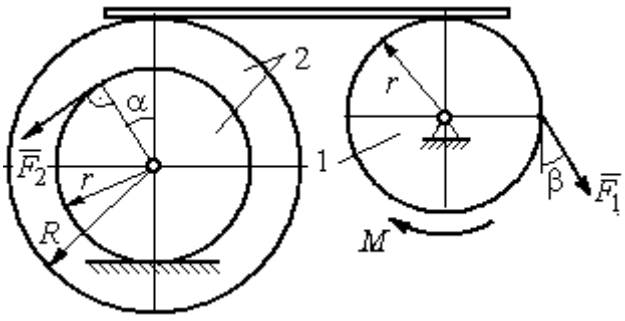
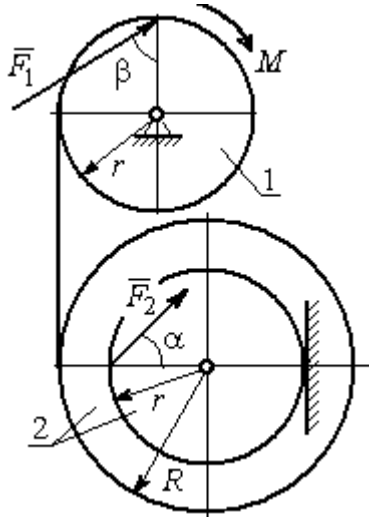
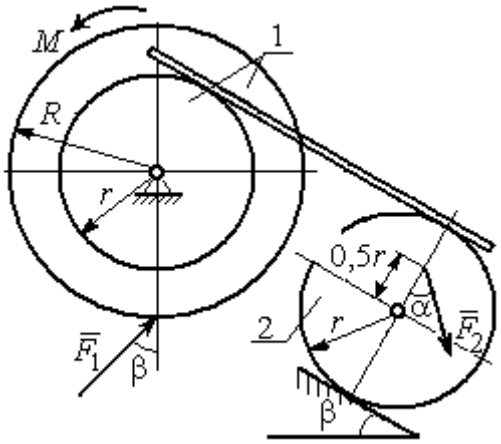
Вариант № 5, 15, 25	Варианты № 6, 16, 26
	

Рис. 5.5. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии. Варианты задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

Окончание вариантов задания Д5

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	

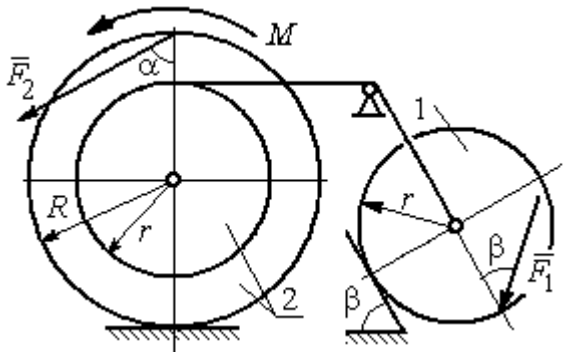
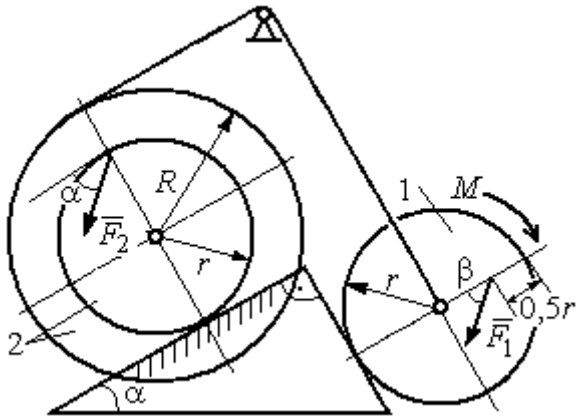
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты 10, 20, 30**
	

Рис. 5.6. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии. Варианты задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 5.2

Исходные данные задания Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Номер варианта задания	P_1, Н	P_2, Н	F_1, Н	F_2, Н	M, Н·м	α, град	β, град	R, м	r, м	i_z, м
1	10	20	15	20	25	30	60	0,4	0,3	0,3
2	20	30	10	20	20	60	30	0,6	0,3	0,4
3	10	15	12	20	25	60	60	1,2	0,6	0,8
4	12	25	20	25	35	30	30	1,5	0,5	1,2

Окончание табл. 5.2

Номер варианта задания	P_1, Н	P_2, Н	F_1, Н	F_2, Н	M, Н·м	α, град	β, град	R, м	r, м	i_z, м
5	15	20	10	20	30	60	30	0,8	0,4	0,7
6	18	20	18	22	22	45	60	1,2	0,4	0,9
7	15	25	10	8	20	45	45	0,9	0,6	0,7
8	25	22	10	12	30	45	60	1,0	0,8	0,9
9	12	25	18	10	32	30	30	0,8	0,6	0,7
10	10	15	8	10	28	60	30	1,4	0,7	1,2
11	15	22	20	25	30	60	45	0,6	0,4	0,5
12	20	25	15	40	30	30	60	0,8	0,4	0,6
13	10	20	10	25	30	45	30	1,0	0,5	0,9
14	12	15	18	15	25	30	30	0,9	0,3	0,8
15	20	25	20	20	30	45	60	1,0	0,5	0,8
16	10	15	10	15	16	60	45	1,2	0,4	1,1
17	18	25	12	10	30	30	30	1,5	0,9	1,3
18	25	20	10	15	20	60	60	0,8	0,5	0,7
19	12	25	10	10	32	60	60	1,2	0,9	1,1
20	15	20	8	20	25	30	45	0,8	0,4	0,7
21	10	25	25	15	30	45	30	0,7	0,5	0,6
22	18	20	20	20	35	60	45	1,4	0,7	0,9
23	10	15	10	30	30	30	30	1,4	0,7	0,8
24	10	15	12	20	20	30	30	1,2	0,4	0,8
25	12	18	20	18	30	60	30	1,2	0,6	1,1
26	10	12	12	15	15	30	30	0,9	0,3	0,8
27	15	22	10	12	20	45	60	0,8	0,6	0,7
28	22	20	8	16	8	30	45	0,6	0,2	0,4
29	18	25	10	8	32	60	60	1,2	0,8	1,1
30	20	25	8	20	28	30	30	0,8	0,4	0,6

Пример выполнения задания Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии

Механическая система состоит из ступенчатого и однородного дисков, соединённых невесомым стержнем (рис. 5.7). Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести, сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и пары сил с моментом M. Направления действия сил $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ определяются углами α и β.

Диск 1 вращается вокруг неподвижной оси O_1. Диск 2 катится прямолинейно по горизонтальной поверхности. Качение диска 2 без проскальзывания. Невесомый стержень, соединяющий диски, расположен горизонтально. Скольжение между стержнем и дисками отсутствует.

Определить ускорение центра масс диска 2, угловое ускорение дисков, усилие в стержне, динамическую реакцию шарнира O_1, реакцию опоры диска 2 (её нормальную составляющую и силу сцепления диска с поверхностью качения), если модули сил тяжести $P_1 = 40$ Н, $P_2 = 60$ Н, модули сил $F_1 = 80$ Н, $F_2 = 30$ Н, величина момента $M = 35$ Н·м, углы наклона сил $\alpha = 30°$, $\beta = 45°$, радиусы дисков $R = 0{,}8$ м, $r = 0{,}6$ м, радиус инерции диска 2 $i_z = 0{,}4$ м.

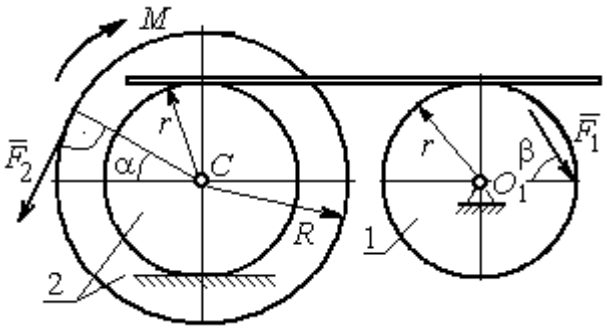


Рис. 5.7. Схема движения механической системы

Решение

Предположим, что во время движения системы диск 1 вращается по ходу часовой стрелки. Угловые скорости ω_1 и ω_2 дисков 1 и 2 и скорость центра масс диска 2 показаны на рис. 5.8.

На диск 1 действуют силы: $\vec{F}_1$, сила тяжести $\vec{P}_1$ и реакция шарнира O_1, разложенная на составляющие $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$. На диск 2: сила $\vec{F}_2$, сила тяжести $\vec{P}_2$, пара сил с моментом M, нормальная реакция опоры $\vec{N}$ и сила сцепления диска 2 с поверхностью $\vec{F}_{\text{сц}}$. Направления действия сил показаны на рис. 5.8.

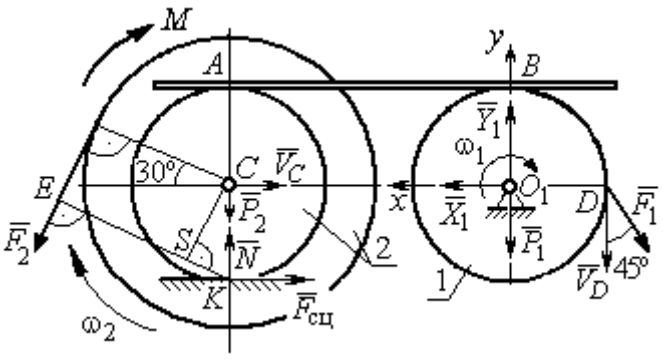


Рис. 5.8. Расчетная схема для исследования движения системы

Для решения задачи воспользуемся теоремой об изменении кинетической энергии системы в дифференциальной форме. По условию задачи рассматриваемая система неизменяемая и, следовательно, сумма мощностей внутренних сил равна нулю. В этом случае теорема об изменении кинетической энергии системы принимает вид $\dfrac{dT}{dt} = \sum N(\vec{F}_k^e)$, где T – энергия системы в текущем положении; $\sum N(\vec{F}_k^e)$ – суммарная мощность внешних сил.

Найдём кинетическую энергию системы и выразим её через скорость центра масс диска 2.

Кинетическая энергия вращательного движения диска 1: $T_1 = \frac{1}{2} J_{zO_1} \omega_1^2$, где ω_1 – угловая скорость диска 1; J_{zO_1} – осевой момент инерции диска 1, $J_{zO_1} = \frac{m_1 r^2}{2}$. Диск 2 движется плоскопараллельно. Его кинетическая энергия определяется по формуле: $T_2 = \frac{1}{2} m_2 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_2^2$, где V_C, ω_2 – скорость центра масс и угловая скорость диска 2; J_{zC} – момент инерции ступенчатого диска 2 относительно оси *z*, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости диска, $J_{zC} = m_2 i_z^2$.

У диска 2 мгновенный центр скоростей находится в точке касания его с неподвижной поверхностью (точка *K* на рис. 5.8). Тогда скорость точки *C* определяется по формуле $V_C = \omega_2 \cdot CK = \omega_2 r$, откуда $\omega_2 = \frac{V_C}{r}$. Скорость точки *A* $V_A = \omega_2 \cdot AK = \omega_2 2r$, или $V_A = 2V_C$.

Так как нет проскальзывания между стержнем и дисками, скорость точки A на диске 2 равна скорости точки *B* на диске 1, причём $V_B = \omega_1 r$. Приравнивая скорости $V_B = V_A$, найдем $\omega_1 = \frac{2V_C}{r}$.

С учетом найденных зависимостей кинетические энергии дисков 1 и 2 и суммарная энергия системы имеют вид

$$T_1 = \frac{1}{2} J_{zO_1} \omega_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_1 r^2}{2g} \left(\frac{2V_C}{r} \right)^2 = \frac{P_1}{g} V_C^2;$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2}{g} V_C^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{P_2}{g} i_z^2 \left(\frac{V_C}{r} \right)^2;$$

$$T = T_1 + T_2 = \frac{P_1}{g} V_C^2 + \frac{1}{2} \frac{P_2}{g} \left(1 + \frac{i_z^2}{r^2} \right) V_C^2.$$

Производная по времени от кинетической энергии системы

$$\frac{dT}{dt} = 2V_C \frac{dV_C}{dt}\left[\frac{P_1}{g} + \frac{P_2}{2g}\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right].$$

Найдем сумму мощностей внешних сил. Отметим, что мощности силы тяжести $\vec{P}_1$ и сил реакции $\vec{X}_1$, $\vec{Y}_1$ подшипника O_1 равны нулю, так как нет перемещения точек приложения этих сил. Мощности сил $\vec{N}$ и $\vec{F}_{\text{сц}}$ – нормальной реакции опоры диска 2 и силы сцепления диска с плоскостью также равны нулю, так как точкой приложения этих сил является мгновенный центр скоростей диска 2, скорость которого равна нулю. Мощность силы $\vec{P}_2$ равна нулю, так как угол между вектором силы и скоростью точки приложения силы – точки C – равен 90° (см. рис. 5.8). Для определения мощности силы $\vec{F}_2$, приложенной к диску 2, воспользуемся формулой расчета мощности силы при плоскопараллельном движении тела. Выберем в качестве полюса точку K – мгновенный центр скоростей диска 2, скорость которого $V_K = 0$ (см. рис. 5.8). В этом случае мощность силы $\vec{F}_2$ равна: $N(\vec{F}_2) = \vec{M}_K \cdot \vec{\omega}_2 = -F_2 h_K \omega_2$, где $\vec{M}_K = M_K(\vec{F}_2)$ – вектор момента силы $\vec{F}_2$ относительно центра K; $\vec{\omega}_2$, ω_2 – вектор и модуль угловой скорости диска 2; h_K – плечо силы $\vec{F}_2$ относительно центра K. Мощность силы $\vec{F}_2$ отрицательная, так как направление момента силы $\vec{F}_2$ относительно точки K противоположно направлению угловой скорости диска 2.

В результате, мощность силы $\vec{F}_2$:

$$N(\vec{F}_2) = -F_2 h_K \omega_2 = -F_2(R + r\cos 60^\circ)\omega_2 = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right).$$

Здесь $h_K = EK = ES + SK = R + r\cos 60^\circ$ (см. рис. 5.8).

Заметим, что для вычисления мощности силы F_2 можно использовать в качестве полюса центр масс диска – точку C. Имеем:

$$N(\vec{F}_2) = \vec{F}_2 \cdot \vec{V}_C + \vec{M}_C(F_2) \cdot \vec{\omega}_2 = F_2 V_C \cos 120^\circ - F_2 R\omega_2 = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right).$$

Момент M направлен в сторону вращения диска 2. Его мощность положительная: $N(M) = M\omega_2 = M\dfrac{V_C}{r}$. Мощность силы $\vec{F}_1$, приложенной в точке D, $N(\vec{F}_1) = F_1 V_D \cos 45^\circ = F_1 V_C \sqrt{2}$. Здесь учтено очевидное равенство $V_D = V_A = 2V_C$ (см. рис. 5.8).

Суммарная мощность внешних сил:

$$\sum N(F^e) = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right) + M\frac{V_C}{r} + F_1 V_C\sqrt{2}.$$

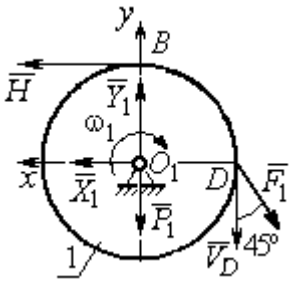


Рис. 5.9. Силы, действующие на диск 1 во время движения

В результате теорема об изменении кинетической энергии системы приводится к виду

$$2V_C\frac{dV_C}{dt}\left[\frac{P_1}{g} + \frac{P_2}{2g}\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right] = -F_2 V_C\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right) + M\frac{V_C}{r} + F_1 V_C\sqrt{2},$$

откуда ускорение центра масс диска 2:

$$a_C = \frac{dV_C}{dt} = \frac{\left[-F_2\left(\frac{1}{2} + \frac{R}{r}\right) + \frac{M}{r} + F_1\sqrt{2}\right]g}{\left[2P_1 + P_2\left(1 + \frac{i_z^2}{r^2}\right)\right]}.$$

Подставляя исходные данные задачи, получим: $a_C = 6{,}85$ м/с^2.

Для определения углового ускорения диска 2 продифференцируем по времени равенство $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK} = \dfrac{V_C}{r}$. Дифференцирование здесь допустимо, так как во время движения диска 2 расстояние от точки C до мгновенного центра скоростей диска 2 – точки K – не меняется.

Найдем $\varepsilon_2 = \dot{\omega}_2 = \dfrac{\dot{V}_C}{r} = \dfrac{a_C}{r} = 11{,}42$ рад/с^2. Угловое ускорение диска 1 находится путём дифференцирования равенства $\omega_1 = 2\omega_2$. Имеем: $\varepsilon_1 = 2\varepsilon_2 = 22{,}84$ рад/с^2.

Для того чтобы определить реакцию стержня, освобождаемся от стержня, заменяем его реакцией $\vec{H}$ и составляем уравнения движения дисков 1 и 2.

Силы, действующие на диск 1 во время движения, показаны на рис. 5.9. Уравнение вращательного движения диска 1 в алгебраической форме: $J_{zO_1}\varepsilon_1 = \sum M_z(\vec{F}_k^e)$, где ε_1 – угловое ускорение диска; J_{zO_1} – момент инерции диска 1 относительно оси *z*, проходящей через точку O_1 перпендикулярно плоскости диска, $J_{zO_1} = \dfrac{m_1 r^2}{2}$; $\sum M_{zO_1}(\vec{F}_k^e)$ – сумма моментов внешних сил относительно оси *z*.

Считая моменты сил положительными, если они создают поворот диска в сторону его вращения, составим сумму моментов внешних сил относительно оси *z*: $\sum M_{zO_1}(\vec{F}_k^e) = F_1 r\cos 45^\circ - Hr$. В результате уравнение вращательного движения диска 1 принимает вид: $\dfrac{P_1 r^2}{2g}\varepsilon_1 = F_1 r\cos 45^\circ - Hr$.

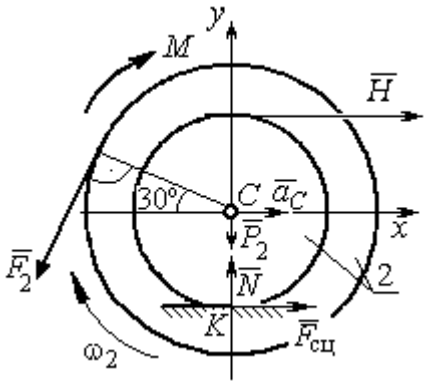


Рис. 5.10. Силы, действующие на диск 2 во время движения

Подставляя в уравнение исходные данные задачи с учетом найденного значения углового ускорения диска 1 ε_1 = 22,84 рад/с^2, найдем реакцию стержня *H* = 28,63 Н.

Для определения динамической реакции шарнира O_1 диска 1 применим теорему о движении центра масс. Выберем оси координат O_1x и O_1y, как показано на рис. 5.9, и составим уравнение движения центра масс диска 1 в проекциях на оси координат с учётом того, что сам центр масс неподвижен и его ускорение равно нулю.

Получим систему:

$$H + X_1 - F_1\sin 45^\circ = 0,\quad Y_1 - P_1 - F_1\cos 45^\circ = 0.$$

Отсюда, с учётом найденной величины усилия в стержне *H* = 28,63 Н, находим составляющие динамической реакции шарнира: X_1 = 27,94 Н, Y_1 = 96,57 Н. Полная реакция шарнира $R_{O_1} = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2}$ =100,53 Н.

Для определения величины силы сцепления диска 2 с поверхностью качения

и нормальной составляющей реакции опоры диска используем теорему о движении центра масс. Силы, приложенные к диску 2, и выбранная система координат *xCy* показаны на рис. 5.10. Уравнения движения центра масс диска 2 в проекциях на оси x, y имеют вид:

$$m_2 a_C = H + F_{\text{сц}} - F_2 \cos 60^\circ;$$

$$0 = -F_2 \cos 30^\circ - P_2 + N.$$

С учетом найденных значений реакции стержня $H = 28{,}63$ Н и ускорения центра масс диска 2 $a_C = 6{,}85$ м/с^2, находим силу сцепления и нормальную реакцию опоры: $F_{\text{сц}} = 28{,}27$ Н, $N = 85{,}98$ Н.

Полная реакция опоры $R_K = \sqrt{N^2 + F_{\text{сц}}^2} = 90{,}51$ Н.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

6.1. Принципы механики. Общее уравнение динамики

Силой инерции материальной точки называют векторную величину, модуль которой равен произведению массы точки на модуль её ускорения, направленную противоположно этому ускорению $\vec{R}^{и} = -m\vec{a}$, где m – масса точки; $\vec{a}$ – вектор ускорения точки.

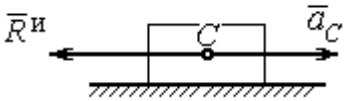


Рис. 6.1. Главный вектор сил инерции при поступательном движении твердого тела

При поступательном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ система сил инерции, приложенных к каждой точке тела, приводится к главному вектору сил инерции $\vec{R}^{и}$, равному по величине $R^{и} = ma_C$, приложенному в центре масс тела и направленному в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$ (рис. 6.1).

При вращении тела вокруг неподвижной оси z, проходящей через центр масс, главный вектор сил инерции, приведённый к центру масс тела, обращается в нуль (так как ускорение центра масс равно нулю). Таким образом, система сил инерции приводится к паре сил с моментом $\vec{M}^{и}$, равным главному моменту сил инерции относительно оси вращения. Величина главного момента сил инерции $M^{и} = J_z\varepsilon$, где J_z – момент инерции тела относительно оси z; ε – угловое ускорение тела. Направлен главный момент сил инерции в сторону, противоположную угловому ускорению (рис. 6.2).

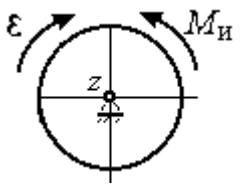


Рис. 6.2. Главный момент сил инерции при вращении тела вокруг оси, проходящей через центр масс

При плоскопараллельном движении тела с ускорением центра масс $\vec{a}_C$ и угловым ускорением ε система сил инерции, приложенных к каждой точке тела, приводится к силе $\vec{R}^{и}$, равной главному вектору сил инерции, и паре сил с моментом $\vec{M}^{и}$, равным главному моменту сил инерции относительно оси, проходящей через центр масс тела перпендикулярно плоскости движения (рис. 6.3). Главный

вектор сил инерции равен по модулю произведению массы тела на ускорение его центра масс: $R^{\text{и}} = ma_C$, приложен в центре масс тела и направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$ центра масс. Главный момент сил инерции равен по величине произведению момента инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, на угловое ускорение тела: $M^{\text{и}} = J_C\varepsilon$, где J_C – момент инерции тела. Направлен главный момент сил инерции в сторону, противоположную угловому ускорению (см. рис. 6.3).

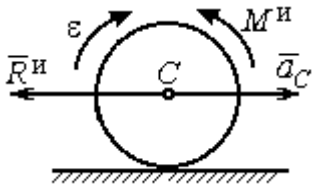


Рис. 6.3. Главный вектор и главный момент сил инерции при плоскопараллельном движении твердого тела

Принцип Даламбера для системы. Если в любой момент времени к каждой из точек системы кроме действующих на нее внешних и внутренних сил присоединить соответствующие силы инерции, то полученная система сил будет уравновешенной. Принцип Даламбера даёт возможность составлять уравнения движения механической системы в виде уравнений равновесия:

$$\sum \vec{F}_k^e + \vec{R}^{\text{и}} = 0, \ \sum \vec{M}_O(\vec{F}_k^e) + \vec{M}_O^{\text{и}} = 0,$$

где $\vec{F}_k^e$ – внешние силы, приложенные к системе; $\vec{R}^{\text{и}}$ – главный вектор сил инерции; $\vec{M}_O(\vec{F}_k^e)$ – момент внешних сил, приложенных к системе, относительно произвольного центра *O*; $\vec{M}_O^{\text{и}}$ – главный момент сил инерции относительно центра *O*.

Силы, действующие на систему, можно подразделить на активные и реакции связей. **Идеальными связями** в механической системе называют такие связи, для которых сумма элементарных работ их реакций на любом возможном перемещении равна нулю.

Принцип возможных перемещений. Для равновесия механической системы с идеальными связями необходимо и достаточно, чтобы сумма элементарных работ всех активных сил, приложенных к точкам системы, была равна нулю на любом возможном перемещении системы: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = 0$, где $\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}})$ – элементарная работа активных сил на возможном перемещении.

Совместное применение принципа Даламбера и принципа возможных перемещений приводит к формулировке общего уравнения динамики.

Общее уравнение динамики. При движении механической системы с идеальными связями в каждый момент времени сумма элементарных работ всех приложенных активных сил и сил инерции на любом возможном перемещении равна нулю: $\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0$, где $\delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}})$, $\delta A(\vec{R}_k^{\text{и}})$ – элементарные работы активных сил и сил инерции, приложенных к системе, на её возможном перемещении.

При вычислении элементарных работ активных сил и сил инерции используют обычные формулы для вычисления работы сил на элементарном перемещении точек их приложения. При этом переменные силы на элементарном перемещении точек их приложения считаются постоянными.

6.2. Задание Д6. Исследование механической системы с применением общего уравнения динамики

Механическая система с идеальными связями включает груз и два диска – однородного радиусом R или r и ступенчатого. Ступенчатый диск состоит из двух одноосных цилиндров радиусом R и r. Радиусы дисков указаны на схеме. Тела соединены нерастяжимыми нитями или невесомыми стержнями. Система движется в вертикальной плоскости из состояния покоя под действием сил тяжести, постоянной силы $\vec{F}$, а также пары сил с переменным моментом M. Направление действия силы $\vec{F}$ и наклон плоскости движущихся тел определяются углами α и β. Радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, равен i_z.

Качение дисков без проскальзывания. Скольжение между невесомым стержнем и дисками отсутствует. Движение грузов по плоскости без трения. Нити и стержни, соединяющие груз и диски, параллельны соответствующим плоскостям, по которым двигаются тела.

Найти уравнение движения центра масс диска 3. Определить реакцию шарнира диска 2 в момент времени $t = 1$ с.

Варианты задания приведены на рис. 6.4, 6.5. Исходные данные выбираются из табл. 6.1.

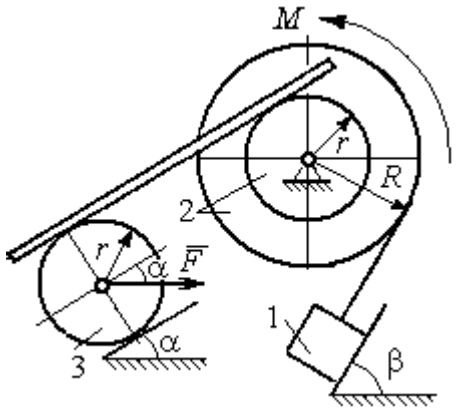
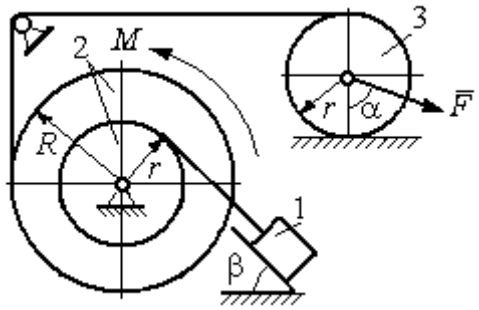
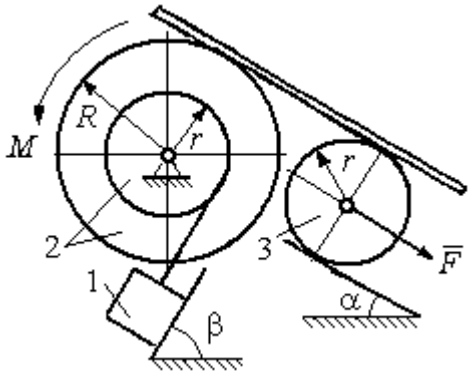
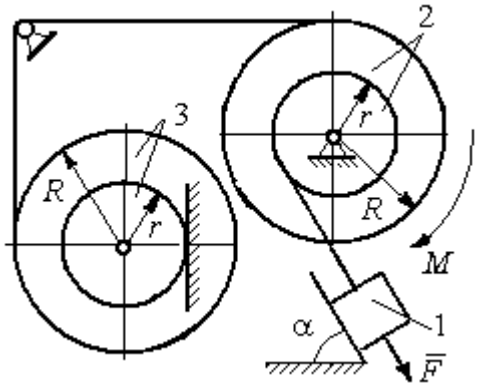
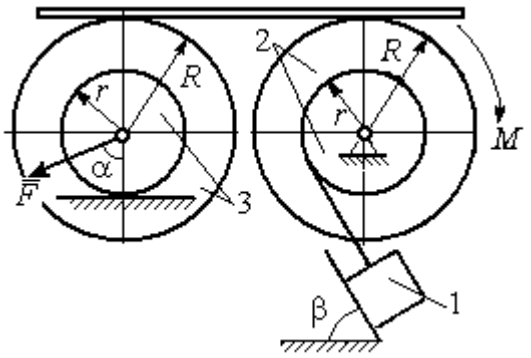
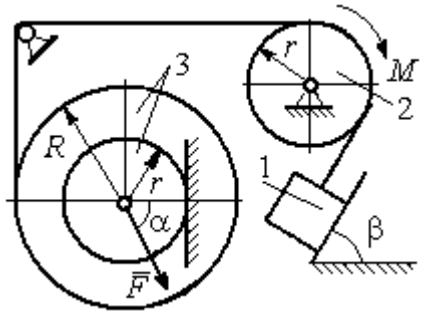
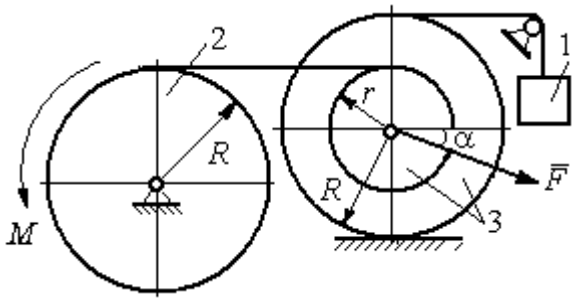
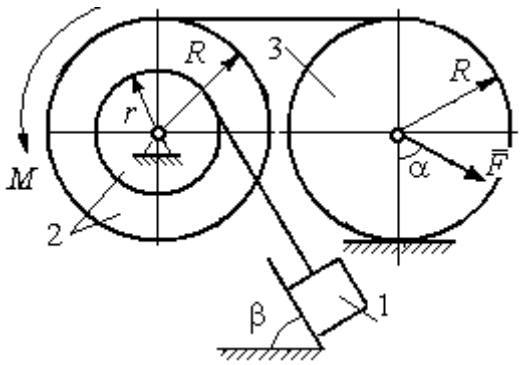
Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**
	
Варианты 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
	

Рис. 6.4. Задание Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики.
Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

Варианты № 5, 15, 25	**Варианты № 6, 16, 26**
	

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	

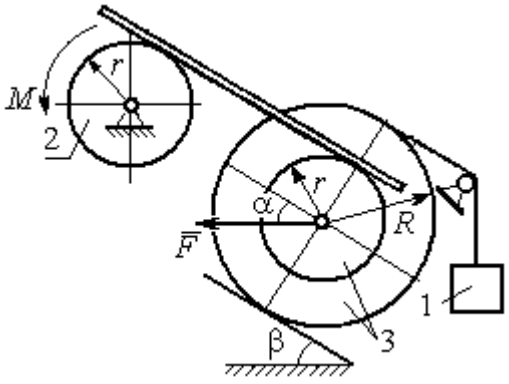
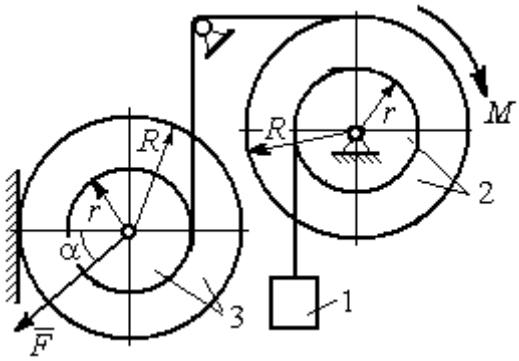
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	

Рис. 6.5. Задание Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики. Номера вариантов задания 5 – 10, 15 – 20, 25 – 30

Таблица 6.1

Исходные данные задания Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики

Номер варианта задания	P_1, Н	P_2, Н	P_3, Н	F, Н	M, Н·м	α, град	β, град	R, м	r, м	i_z, м
1	10	20	8	20	$3(2+t^2)$	30	60	0,6	0,3	0,4
2	10	22	15	15	$4(t+3)$	30	30	0,8	0,4	0,6
3	5	18	10	6	$8(t^2+1)$	90	30	0,4	0,3	0,3
4	5	22	10	5	$14(t^2+t+1)$	30	–	0,6	0,5	0,6
5	5	20	16	9	$3(t^2+4)$	45	60	0,6	0,3	0,5
6	10	16	14	15	$4(5+t)$	60	30	1,0	0,6	0,8
7	6	20	20	8	$9(3t^2+2)$	45	–	0,8	0,6	0,8
8	16	25	15	12	$5(t^2+4)$	30	60	1,2	0,6	0,8
9	5	20	12	8	$4(3+5t)$	60	30	0,6	0,4	0,5
10	6	25	8	10	$5(3t+6)$	30	–	1,0	0,8	0,9
11	4	22	8	15	$2+ t^2$	45	45	0,8	0,4	0,6
12	15	18	15	10	$5(t+3)$	30	60	1,0	0,5	0,7
13	6	20	10	4	$5(t^2+2)$	30	60	0,6	0,5	0,4
14	10	25	15	8	$16(t+2)$	60	–	0,8	0,6	0,7
15	8	18	20	10	$6(t+2)$	30	90	1,2	0,6	1,0
16	8	18	12	12	$5(3+t^2)$	90	60	0,8	0,6	0,7
17	5	20	10	10	$2t^2+20$	60	–	0,9	0,6	0,8
18	20	15	20	15	$3(t+4)$	60	30	0,8	0,4	0,7
19	8	20	12	10	$4(3+t)$	45	45	1,2	0,4	0,8
20	12	20	10	6	$6(3t+4)$	45	–	1,0	0,6	0,9
21	15	25	12	12	$6+t^2$	60	60	0,6	0,3	0,5
22	20	22	18	15	$2(2t+9)$	45	45	0,8	0,4	0,6
23	8	24	12	8	$7(3t^2+2)$	30	45	0,8	0,5	0,6
24	12	20	18	10	$6(t+4)$	90	–	0,5	0,3	0,4
25	5	20	12	12	$9(2+t^2)$	60	30	1,4	0,7	1,2
26	10	12	10	8	$6(2+t)$	30	45	1,2	0,8	0,9
27	6	18	16	14	$8(2t^2+3)$	30	–	0,8	0,2	0,6
28	10	20	20	20	$3(t^2+3)$	45	30	0,6	0,3	0,5
29	10	18	8	12	$5(4+t+ t^2)$	30	60	1,2	0,8	0,9
30	8	18	10	15	$8(t^2+5)$	60	–	1,0	0,8	0,9

Пример выполнения задания Д6. Исследование движения механической системы с применением общего уравнения динамики

Механическая система состоит из груза 1, движущегося поступательно, ступенчатого диска 2 (каток), катящегося по неподвижной поверхности цилиндрической ступенькой, и однородного диска 3 (блок), вращающегося вокруг неподвиж-

ной оси, проходящей через центр масс блока (рис. 6.6). Качение катка 2 без проскальзывания, скольжение груза 1 – без трения. Движение системы происходит под действием сил тяжести, силы $\vec{F}$, приложенной к грузу 1 и пары сил с моментом M, приложенной к диску 3.

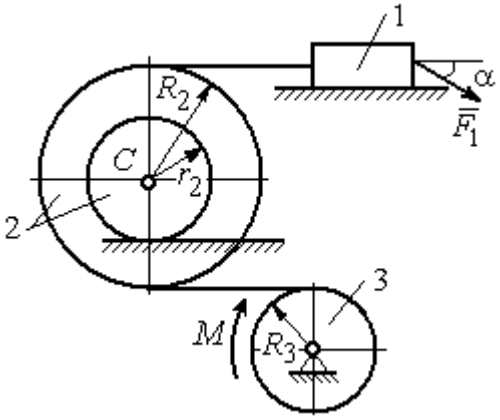


Рис. 6.6. Схема движения механической системы

Найти уравнение движения центра масс катка 2 если движение системы началось из состояния покоя. Определить реакцию шарнира диска 3 в момент t = 1 с, если: P_1 = 10 Н; P_2 = 20 Н; P_3 = 15 Н; $F = 5(t+1)$ Н; $M = 6(1+2t)$ Н·м; R_2 = 0,8 м; r_2 = 0,2 м; R_3 = 0,4 м; i_{2C} = 0,6 м.

Решение

В рассматриваемой механической системе активными силами являются силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, сила $\vec{F}$ и пара сил с моментом M (рис. 6.7). Связи идеальные, так как скольжение груза 1 происходит по гладкой поверхности без трения, качение диска 2 без проскальзывания, а ось вращения блока 3 неподвижна.

Предположим, направление движения в системе задаёт пара сил с моментом M, приложенная к блоку 3. Обозначим ω_3, ε_3 – угловая скорость и угловое ускорение блока 3, V_C, a_C – скорость и ускорение центра масс катка 2, V_1, a_1 – скорость и ускорение груза 1. Направления векторов скоростей и ускорений точек и угловых скоростей и ускорений тел в соответствии с выбранным направлением движения системы показаны на рис. 6.7.

Общее уравнение динамики имеет вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = 0 .$$

Присоединим к телам системы силы инерции. Груз 1 движется поступательно. Главный вектор сил инерции груза 1 $\vec{R}_1^{\text{и}}$ приложен в центре масс груза и направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_1$ груза 1. Модуль главного вектора сил инерции груза 1 $R_1^{\text{и}} = m_1 a_1$, где m_1 – масса груза 1; a_1 – величина ускорения груза 1.

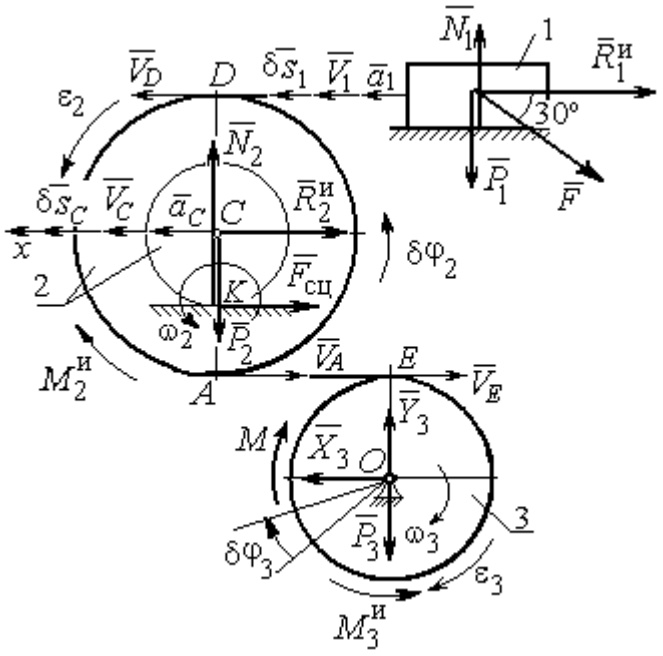


Рис. 6.7. Расчётная схема исследования движения механической системы

Система сил инерции катка 2, приводятся к силе, равной главному вектору сил инерции $\vec{R}_2^{\text{и}}$, приложенному в центре масс катка 2, и паре сил с моментом, равным главному моменту сил инерции $\vec{M}_2^{\text{и}}$ относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения. Главный вектор сил инерции направлен в сторону, противоположную ускорению $\vec{a}_C$, и составляет $R_2^{\text{и}} = m_2 a_C$, где m_2 – масса катка 2; a_C – величина ускорения центра масс. Главный момент сил инерции: $M_2^{\text{и}} = J_{2C}\varepsilon_2$, где J_{2C} – момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения; ε_2 – угловое ускорение катка 2. Направлен главный момент сил инерции $M_2^{\text{и}}$ в сторону, противоположную угловому ускорению ε_2.

Главный вектор сил инерции, приложенных к блоку 3 и приведённых к центру масс блока, равен нулю, так как блок вращается вокруг неподвижной оси, проходящей через центр масс, и ускорение центра масс блока равно нулю. В результате силы инерции блока 3 приводятся к паре сил, момент которой равен главному

моменту сил инерции $\vec{M}_3^{\text{и}}$ относительно оси вращения. Главный момент сил инерции блока 3 равен по величине $M_3^{\text{и}} = J_{3O}\varepsilon_3$, где J_{3O} – момент инерции блока 3 относительно оси вращения; ε_3 – угловое ускорение блока 3, и направлен в сторону, противоположную угловому ускорению ε_3. Главные векторы и главные моменты сил инерции показаны на рис. 6.8.

Определим кинематические соотношения между скоростями точек системы и выразим их через скорость V_C центра масс катка 2. Каток 2 катится по неподвижной поверхности без скольжения. Мгновенный центр скоростей катка находится в точке *K* касания катка с поверхностью (см. рис. 6.7). Угловая скорость катка 2 $\omega_2 = \dfrac{V_C}{CK} = \dfrac{V_C}{r_2}$. Скорость точки *A* катка 2: $V_A = \omega_2 \cdot AK = \omega_2(R_2 - r_2) =$ $V_C \dfrac{R_2 - r_2}{r_2}$. Скорость точки *E* блока 3 равна скорости точки *A* катка 2, $V_E = V_A$. Тогда угловая скорость блока 3:

$$\omega_3 = \frac{V_E}{R_3} = \frac{V_A}{R_3} = V_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Скорость груза 1 равна скорости точки *D* катка 2:

$$V_1 = V_D = \omega_2 \cdot DK = \omega_2(R_2 + r_2) = V_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}.$$

Соотношения между ускорениями определяются путем дифференцирования установленных кинематических равенств:

$$a_1 = a_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{a_C}{r_2}, \quad \varepsilon_3 = a_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Для того чтобы найти соотношения между перемещениями, выразим кинематические равенства между скоростями в дифференциальном виде и, полагая, что действительное перемещение является возможным, т. е. $ds = \delta s$, $d\varphi = \delta\varphi$, получим соотношения между возможными перемещениями:

$$\delta s_1 = \delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2}, \quad \delta\varphi_2 = \frac{\delta s_C}{r_2}, \quad \delta\varphi_3 = \delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Сообщим системе возможное перемещение, совпадающее с действительным. Элементарная работа реакций связи на любом возможном перемещении системы равна нулю, так как связи в системе идеальные.

Найдем элементарные работы активных сил и выразим их через перемещение центра масс катка 2. Прежде заметим, что элементарные работы сил тяжести груза 1 и катка 2 равны нулю, так как направления перемещений точек приложения этих сил перпендикулярны векторам сил:

$$\delta A(\vec{P}_1) = P_1 \delta s_1 \cos 90^\circ = 0,\ \delta A(\vec{P}_2) = P_2 \delta s_C \cos 90^\circ = 0.$$

Элементарная работа силы тяжести блока 3 равна нулю, так как точка приложения силы тяжести блока 3 не перемещается: $\delta A(\vec{P}_3) = 0.$

Элементарная работа пары сил с моментом M, приложенных к блоку 3:

$$\delta A(\vec{M}) = M\delta\varphi_3 = M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2}.$$

Элементарная работа силы $\vec{F}$:

$$\delta A(\vec{F}) = F\delta s_1 \cos 150^\circ = -F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2} \cos 30^\circ.$$

Сумма элементарных работ всех активных сил:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) = \delta A(\vec{M}) + \delta A(\vec{F}) = M\delta s_C \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} - F\delta s_C \frac{(R_2 + r_2)}{r_2} \cos 30^\circ =$$

$$= \left[6(1+2t)\left(\frac{0{,}8 - 0{,}2}{0{,}4 \cdot 0{,}2} \right) - 5(t+1)\left(\frac{0{,}8 + 0{,}2}{0{,}2} \right) 0{,}866 \right] \delta s_C = (23{,}35 + 68{,}35t)\delta s_C.$$

Определим модули главных векторов и главных моментов сил инерции в зависимости от ускорения a_C центра масс катка 2:

$$R_1^{\text{и}} = m_1 a_1 = \frac{P_1}{g} a_1 = \frac{P_1(R_2 + r_2)}{g r_2} a_C,\quad R_2^{\text{и}} = m_2 a_C = \frac{P_2 a_C}{g},$$

$$M_2^{\text{и}} = J_{2C}\varepsilon_2 = m_2 i_{2C}^2 \varepsilon_2 = \frac{P_2}{g} i_{2C}^2 \frac{a_C}{r_2},$$

$$M_3^{\text{и}} = J_{3O}\varepsilon_3 = \frac{m_3 R_3^2}{2}\varepsilon_3 = \frac{P_3 R_3^2}{2g} \frac{(R_2 - r_2)}{R_3 r_2} a_C = \frac{P_3 R_3 (R_2 - r_2)}{2 g r_2} a_C,$$

где J_{2C} – момент инерции катка 2 относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{2C} = m_2 i_{2C}^2$; i_{2C} – радиус инерции катка 2; J_{3O} – момент инерции блока 3 относительно оси вращения, проходящей через его центр масс, $J_{3O} = \dfrac{m_3 R_3^2}{2}$.

Найдем элементарные работы сил инерции на возможном перемещении системы и выразим их в зависимости от перемещения δs_C центра масс катка 2:

$$\delta A(\vec{R}_1^{\text{и}}) = R_1^{\text{и}} \delta s_1 \cos 180^\circ = -\frac{P_1 (R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{R}_2^{\text{и}}) = R_2^{\text{и}} \delta s_C \cos 180^\circ = -\frac{P_2 a_C}{g} \delta s_C,\ \delta A(\vec{M}_2^{\text{и}}) = -M_2^{\text{и}} \delta \varphi_2 = -\frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C;$$

$$\delta A(\vec{M}_3^{\text{и}}) = -M_3^{\text{и}} \delta \varphi_3 = -\frac{P_3 (R_2 - r_2)^2 a_C}{2 g r_2^2} \delta s_C.$$

Сумма элементарных работ сил инерции:

$$\sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = -\frac{P_1 (R_2 + r_2)^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C - \frac{P_2 a_C}{g} \delta s_C - \frac{P_2 i_2^2 a_C}{g r_2^2} \delta s_C - \frac{P_3 (R_2 - r_2)^2 a_C}{2 g r_2^2} \delta s_C =$$

$$= -\frac{a_C \delta s_C}{g} \left[\frac{10(0{,}8 + 0{,}2)^2}{0{,}2^2} + 20 + \frac{20 \cdot 0{,}6^2}{0{,}2^2} + \frac{15(0{,}8 - 0{,}2)^2}{2 \cdot 0{,}2^2} \right] = -52{,}75\, a_C \delta s_C,$$

где $g = 9{,}81$ м/с^2.

С учетом проделанных вычислений общее уравнение динамики принимает вид:

$$\sum \delta A(\vec{F}_k^{\text{акт}}) + \sum \delta A(\vec{R}_k^{\text{и}}) = (23{,}35 + 68{,}35t)\delta s_C - 52{,}75\, a_C \delta s_C = 0,$$

откуда ускорение центра масс катка 2:

$$a_C = 0{,}44 + 1{,}29t.$$

Выберем ось x по направлению движения центра масс катка 2 (см. рис. 6.7). Проектируя вектор $\vec{a}_C$ ускорения точки C на ось x, получим дифференциальное уравнение $a_C = \ddot{x}_C = 0{,}44 + 1{,}29t$. Интегрируя дважды это уравнение, найдём закон движения: $x_C = 0{,}44\dfrac{t^2}{2} + 1{,}29\dfrac{t^3}{6} + C_1 t + C_2$. Подставляя сюда начальные условия: $t = 0$, $V_C = 0$, $x_C = 0$, найдём константы интегрирования: $C_1 = C_2 = 0$. Окончательно уравнение движения центра масс диска 2 представим в виде:

$$x_C = 0{,}22t^2 + 0{,}21t^3.$$

Рассмотрим вращательное движение блока 3, освободив его от связей. На блок действуют сила тяжести $\vec{P}_3$, реакция подшипника, разложенная на составляющие $\vec{X}_3$, $\vec{Y}_3$, пара сил с моментом M и реакция нити $\vec{H}_3$ (см. рис. 6.8). Реакция нити, равная силе натяжения нити, приложена к блоку 3, направлена вдоль нити, связывающей каток 2 и блок 3. Присоединим к блоку 3 силы инерции. Направления сил, моментов пар сил и главного момента сил инерции, действующих на блок 3, показаны на рис. 6.8.

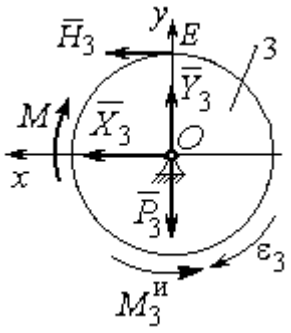


Рис. 6.8. Расчётная схема определения натяжения нити и реакции шарнира блока 3

По принципу Даламбера система сил, приложенных к блоку 3, включая силы инерции, находится в равновесии. Составим уравнение равновесия в виде равенства нулю суммарного момента всех сил (включая силы инерции) относительно оси вращения. Получим $M - H_3 R_3 - M_3^{и} = 0$, где $M_3^{и} = J_{3O}\varepsilon_3 = = \dfrac{P_3 R_3 (R_2 - r_2) a_C}{2 g r_2}$.

Из уравнения находим величину натяжения нити:

$$H_3 = \frac{M}{R_3} - \frac{P_3(R_2 - r_2)a_C}{2gr_2} = \frac{6(1+2t)}{R_3} - \frac{P_3(R_2 - r_2)}{2gr_2}(0{,}44 + 1{,}29t) = 13{,}99 + 27{,}04t.$$

В момент времени $t = 1$ с натяжение нити: $H_3 = 41{,}04$ Н.

Так как главный вектор сил инерции блока 3 равен нулю, то составленные по принципу Даламбера уравнения равновесия блока 3 в виде проекций сил на

вертикальную и горизонтальную оси содержат только внешние силы. Имеем: $X_3 + H_3 = 0$, $Y_3 - P_3 = 0$ (см. рис. 6.8). Отсюда находим составляющие реакции шарнира блока 3 в момент времени $t = 1$ с: $X_3 = -H_3 = -41{,}04$ Н, $Y_3 = P_3 = 15$ Н. Отрицательное значение горизонтальной составляющей реакции шарнира X_3 означает её противоположное направление.

Полная реакция шарнира $R_3 = \sqrt{X_3^2 + Y_3^2} = 43{,}69$ Н.

6.3. Уравнения Лагранжа II рода

Обобщенными координатами механической системы называется совокупность любых s независимых параметров $q_1, q_2, \ldots, q_S$, однозначно определяющих положение системы в любой момент времени.

Если системе сообщить возможное перемещение, при котором все обобщенные координаты изменяются на элементарные (бесконечно малые) величины $\delta q_1, \delta q_2, \ldots, \delta q_S$, называемые вариациями обобщенных координат, то все действующие активные силы совершат элементарную работу, которая может быть представлена в виде $\delta A = Q_1 \cdot \delta q_1 + Q_2 \cdot \delta q_2 + \ldots + Q_s \cdot \delta q_S$. Величина Q_k, равная коэффициенту при вариации δq_k обобщенной координаты, называется **обобщенной силой**, соответствующей данной обобщенной координате. Расчет обобщенных сил осуществляется путем последовательного придания системе возможных перемещений, при которых варьируется только одна из обобщенных координат, а вариации остальных координат равны нулю.

Для материальной системы с идеальными связями дифференциальные уравнения движения в обобщенных координатах – **уравнения Лагранжа II рода** – имеют вид:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k, \quad k = 1, 2, \ldots, s,$$

где T – кинетическая энергия системы; $q_1, q_2, \ldots, q_S$ – обобщенные координаты; $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \ldots, \dot{q}_S$ – обобщенные скорости; s – число степеней свободы системы.

6.4. Задание Д7. Исследование механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа

Механическая система состоит из трёх тел – бруса 1, блока 2, катка 3 и невесомой пружины жесткостью c. Брус 1, соединяющий каток 3 с блоком 2, расположен параллельно линии качения катка 3. Радиусы ступеней ступенчатого диска и радиус однородного диска указаны на схеме.

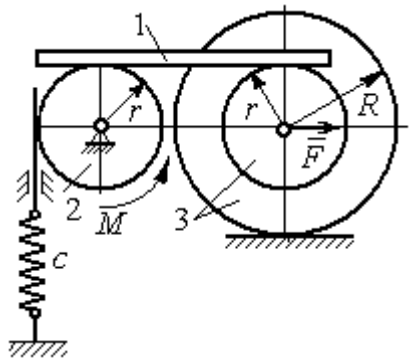
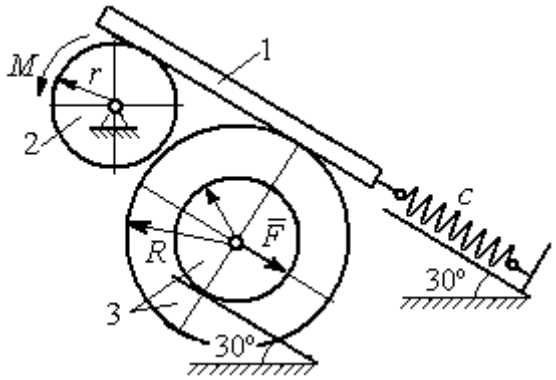
Качение катка 3 происходит без проскальзывания. Скольжение между брусом и дисками отсутствует. В задачах, где пружина соединяется с блоком 2, передача движения блоку 2 производится посредством невесомого стержня без скольжения.

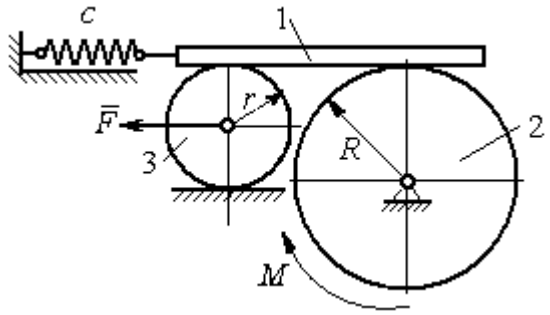
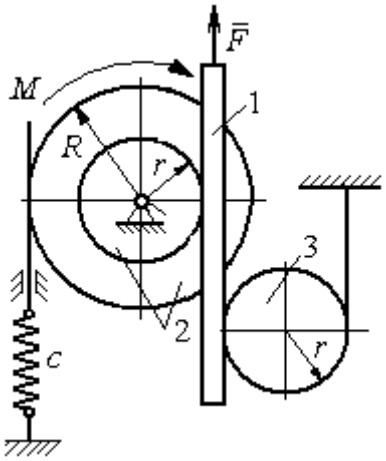
Радиус инерции ступенчатого диска относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, равен i_z.

Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом M.

Определить закон движения бруса 1 и закон угловых колебаний блока 2, если в начальный момент пружина находилась в нерастянутом состоянии, а блоку 2 придали угловую скорость ω_{20}, направленную в сторону заданного момента пары сил.

Варианты заданий даны на рис. 6.9, 6.10. Варианты исходных данных в табл. 6.2. Отрицательные значения величин F или M в табл. 6.2 означают, что при заданных модулях силы или момента направление вектора силы $\vec{F}$ или момента M на схеме следует изменить на противоположные.

Варианты № 1, 11, 21	Варианты № 2, 12, 22
	

Варианты № 3, 13, 23	Варианты № 4, 14, 24
	

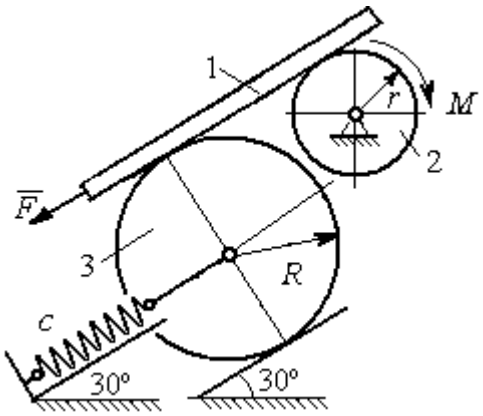
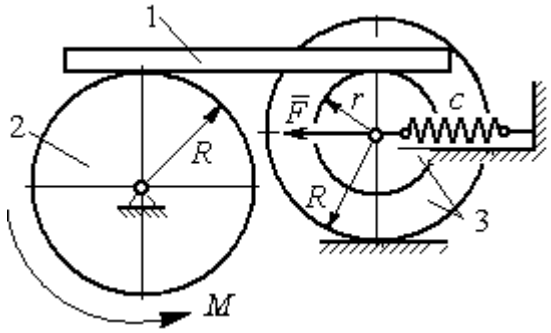
Варианты № 5, 15, 25	Варианты № 6, 16, 26
	

Рис. 6.9. Задание Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы. Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

Окончание вариантов задания Д 7

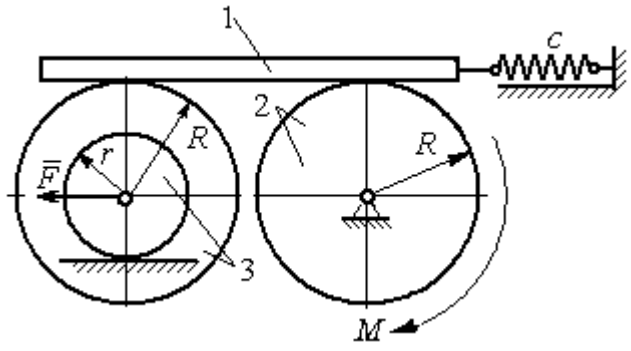
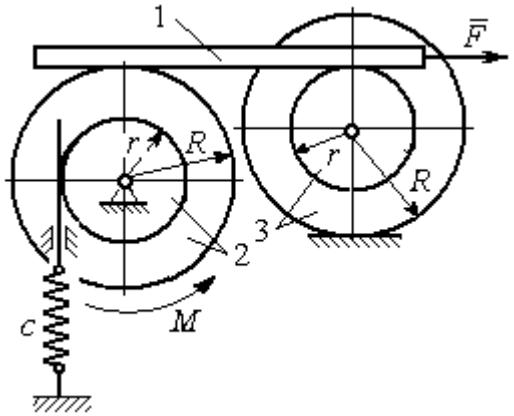
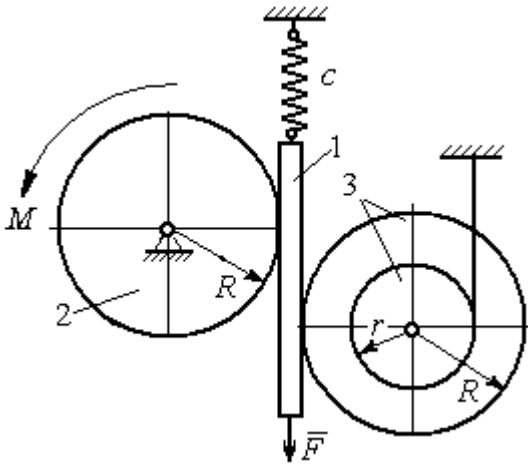
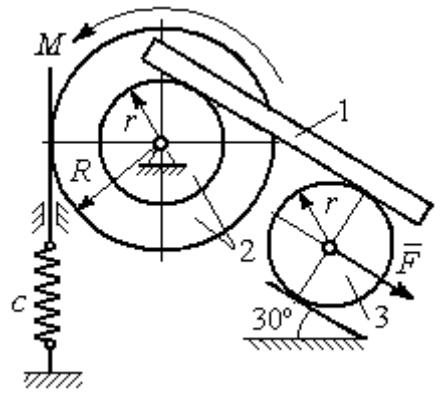
Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	

Рис. 6.10. Задание Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы. Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 6.2

Исходные данные задания Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа

Номер вари-анта задания	P_1, Н	P_2, Н	P_3, Н	F, Н	M, Н·м	c, Н/м	ω_{20}, рад/с	R, м	r, м	i_z, м
1	8	12	18	15	3	50	0,3	0,6	0,3	0,4
2	10	8	15	12	5	55	0,4	0,8	0,5	0,6
3	5	18	10	8	4	60	0,2	0,5	0,3	–
4	5	20	12	10	6	70	0,5	0,6	0,5	0,6
5	5	8	16	8	8	65	0,2	0,6	0,3	–

Окончание табл. 6.2

Номер варианта задания	P_1, Н	P_2, Н	P_3, Н	F, Н	M, Н·м	c, Н/м	ω_{20}, рад/с	R, м	r, м	i_z, м
6	8	10	14	6	2	50	0,1	1,0	0,6	0,8
7	10	12	15	12	3	65	0,2	0,8	0,6	0,7
8	12	15	15	6	2	50	0,3	1,2	0,6	0,8
9	5	20	12	8	4	75	0,1	0,6	0,4	0,5
10	6	25	8	5	12	60	0,4	1,0	0,8	0,9
11	4	10	12	–10	–2	60	0,2	0,8	0,4	0,6
12	5	8	15	–8	3	50	0,5	1,0	0,5	0,7
13	6	15	8	–12	–4	65	0,4	0,6	0,5	–
14	10	25	10	6	10	55	0,1	0,8	0,6	0,7
15	8	6	20	–10	2	70	0,2	1,2	0,6	–
16	10	12	12	–5	6	60	0,3	0,8	0,6	0,7
17	12	16	12	–6	–2	55	0,4	0,9	0,6	0,8
18	10	20	20	10	4	60	0,1	0,8	0,4	0,7
19	8	20	12	–10	6	65	0,2	1,2	0,4	0,8
20	12	20	10	–3	6	50	0,24	1,0	0,6	0,9
21	5	12	15	12	–3	55	0,3	0,6	0,5	0,55
22	10	15	18	6	–2	65	0,1	0,8	0,4	0,6
23	8	20	12	–8	2	45	0,2	0,8	0,6	–
24	12	20	18	–4	–8	70	0,4	0,5	0,3	0,4
25	6	10	15	–6	–2	60	0,1	1,4	0,7	–
26	8	12	10	10	–3	65	0,2	1,2	0,8	0,9
27	6	18	16	5	–3	70	0,2	0,8	0,2	0,6
28	8	12	12	–6	2	65	0,3	0,6	0,3	0,5
29	10	18	20	–10	4	60	0,2	1,2	0,8	0,9
30	8	18	10	8	6	75	0,1	1,0	0,8	0,9

Пример выполнения задания Д7. Исследование движения механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа

Механическая система состоит из трёх тел – бруса 1, блока 2, катка 3 и невесомой пружины жесткостью c. Брус, соединяющий каток 3 с блоком 2, расположен параллельно линии качения катка 3 (рис. 6.11). Радиусы ступеней ступенчатого диска R и r, радиус однородного диска r. Система движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом M. Движение катка 3 по неподвижной поверхности происходит без проскальзывания. Скольжение между брусом и дисками отсутствует. Передача движения от пружины блоку 2 производится посредством невесомого вертикального стержня

без скольжения. Радиус инерции блока 2 относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, i_z.

Исходные данные задачи: $P_1 = P$ Н, $P_2 = 2P$ Н, $P_3 = P$ Н, $F = 2P$ Н, $M = Pr$ Н·м, $R = 1{,}5r$ м, $i_z = r\sqrt{2}$ м, $c = P/r$ Н/м.

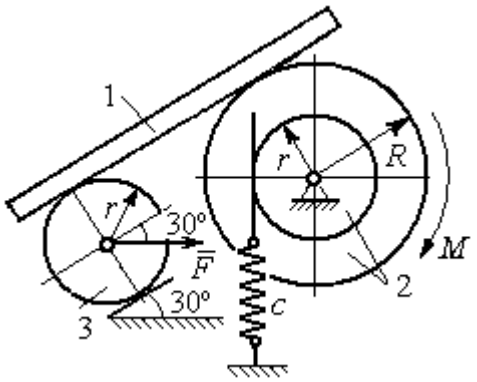


Рис. 6.11. Механическая система с одной степенью свободы

Определить законы движения блока 2 и бруса 1 при $P = 10$ Н, $r = 0{,}2$ м, если в начальный момент пружина находилась в нерастянутом состоянии, а блоку 2 придали угловую скорость $\omega_0 = 0{,}5$ рад/с, направленную в сторону заданного момента пары сил.

Решение

Рассматриваемая механическая система (рис. 6.11) имеет одну степень свободы, так как в системе не допускается независимое друг от друга движение тел. В качестве обобщённой координаты q выберем перемещение x верхнего края пружины, отсчитываемого от уровня, при котором пружина длиной l_0 находилась в нерастянутом состоянии (рис. 6.12). Обобщённая скорость $\dot{q} = \dot{x}$.

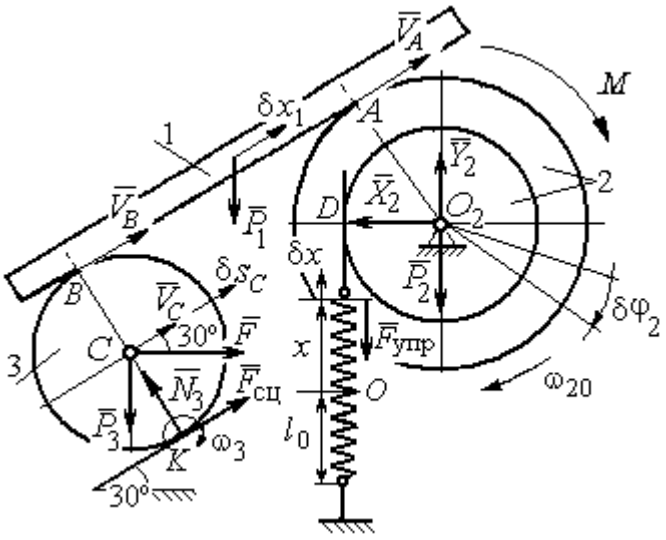


Рис. 6.12. Расчётная схема колебаний механической системы с одной степенью свободы

Уравнение Лагранжа II рода, описывающее движение системы с одной степенью свободы, имеет вид $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x$, где T – кинетическая энергия системы, Q_x – обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате x.

Вычислим кинетическую энергию системы как сумму кинетических энергий бруса, блока и катка: $T = T_1 + T_2 + T_3$. Кинетическая энергия поступательного движения бруса 1: $T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2$, где m_1, V_1 – масса и скорость бруса. Энергия вращательного движения блока 2: $T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2$, где ω_2 – угловая скорость блока, J_{2z} – момент инерции блока 2 относительно оси z, $J_{2z} = m_2 i_z^2$.

Каток 3 совершает плоскопараллельное движение. Его кинетическая энергия $T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2$, где V_C – скорость центра масс катка 3; J_{zC} – момент инерции катка относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения, $J_{zC} = \frac{1}{2} m_3 r^2$; r – радиус катка; ω_3 – угловая скорость катка.

Выразим скорость V_1 бруса 1, угловые скорости ω_2, ω_3 блока 2 и катка 3, а также скорость V_C центра масс катка 3 через обобщённую скорость $\dot{x}$.

Заметим, что скорость точки D блока 2 равна скорости верхнего края пружины $V_D = \dot{x}$. Угловая скорость блока 2 $\omega_2 = \frac{V_D}{r} = \frac{\dot{x}}{r}$. Скорость бруса 1 равна скорости точки A блока 2 и вычисляется по формуле $V_1 = V_A = \omega_2 R = \frac{\dot{x} R}{r}$. Так как брус совершает поступательное движение, то $V_B = V_1$. Угловая скорость катка 3 $\omega_3 = \frac{V_B}{2r} = \frac{V_1}{2r} = \frac{\dot{x} R}{2r^2}$. Здесь при определении угловой скорости катка 3 учтено, что точка K касания катка 3 с неподвижной поверхностью является мгновенным центром скоростей катка. Скорость центра катка 3 $V_C = \frac{V_B}{2} = \frac{\dot{x} R}{2r}$.

Подставляя исходные данные задачи с учётом найденных кинематических соотношений, получим кинетическую энергию тел системы

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 = \frac{P}{2g} \left(\frac{\dot{x} R}{r} \right)^2 = 1{,}125 \frac{P}{g} \dot{x}^2, \quad T_2 = \frac{1}{2} J_{2z} \omega_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2P}{g} \left(r\sqrt{2} \right)^2 \left(\frac{\dot{x}}{r} \right)^2 = 2 \frac{P}{g} \dot{x}^2,$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_C^2 + \frac{1}{2} J_{zC} \omega_3^2 = \frac{1}{2} \frac{P}{g} \left(\frac{\dot{x} R}{2r} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{P r^2}{2g} \left(\frac{\dot{x} R}{2r^2} \right)^2 = 0{,}422 \frac{P}{g} \dot{x}^2 .$$

Тогда полная кинетическая энергия системы:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = 3{,}547 \frac{P}{g} \dot{x}^2 .$$

Произвольное положение системы определяется обобщённой координатой *x*, показывающей растяжение пружины. Дадим пружине, находящейся в произвольном положении, возможное (бесконечно малое) перемещение δx в положительном направлении оси *x* (см. рис. 6.12). При этом блок 2 повернётся на угол $\delta\varphi_2$: $\delta\varphi_2 = \frac{\delta x}{r}$, брус 1 переместится на расстояние δx_1: $\delta x_1 = \frac{\delta x R}{r}$, центр масс катка 3 сдвинется на расстояние δS_C: $\delta S_C = \frac{\delta x R}{2r}$. Все перемещения получены из установленных ранее кинематических соотношений и показаны на рис. 6.12.

При заданном возможном перемещении системы работу совершают силы тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_3$ бруса 1 и катка 3, пара сил с моментом *M*, сила $\vec{F}$ и сила упругости пружины (см. рис. 6.12). Элементарная работа вращающего момента *M*, приложенного к блоку 2, будет $\delta A(M) = M\delta\varphi_2 = M\frac{\delta x}{r}$. Работа силы тяжести бруса 1 определяется равенством $\delta A(P_1) = P_1 \delta x_1 \cos 120^\circ = -P_1 \delta x_1 \cos 60^\circ = -\frac{P_1 \delta x R}{2r}$. Работы силы тяжести катка 3 и силы *F*: $\delta A(P_3) = P_3 \delta s_C \cos 120^\circ = -P_3 \frac{\delta x R}{4r}$, $\delta A(F) = F \frac{\delta x R}{2r} \cos 30^\circ$. Модуль силы упругости пружины, растянутой из недеформированного положения на расстояние *x*: $F_{\text{упр}} = cx$. Сила $\vec{F}_{\text{упр}}$ упругости направлена в сторону, противоположную растяжению (см. рис. 6.12). Работа силы упругости при перемещении вдоль линии действия на расстояние δx вычисляется по формуле $\delta A(\vec{F}_{\text{упр}}) = F_{\text{упр}} \delta x \cos 180^\circ = -cx\delta x$.

Сумма работ сил на рассматриваемом возможном перемещении системы с учётом данных задачи составляет

$$\delta A = \delta A(M) + \delta A(P_1) + \delta A(P_3) + \delta A(F) + \delta A(F_{\text{упр}}) =$$

$$= M\frac{\delta x}{r} - \frac{P_1 \delta x R}{2r} - P_3\frac{\delta x R}{4r} + F\frac{\delta x R}{2r}\cos 30^\circ - cx\delta x = P(1{,}174 - 5x)\delta x,$$

откуда обобщённая сила $Q_x = P(1{,}174 - 5x)$.

Составим уравнения Лагранжа. Вычислим частные производные от кинетической энергии по обобщенной скорости $\dot{x}$ и координате x: $\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}} = 7{,}094\dfrac{P}{g}\dot{x}$, $\dfrac{\partial T}{\partial x} = 0$. Определим полную производную по времени: $\dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{x}}\right) = 7{,}094\dfrac{P}{g}\ddot{x}$. Результаты расчетов подставим в уравнения Лагранжа II рода и получим дифференциальное уравнение колебаний верхнего края пружины:

$$7{,}094\frac{P}{g}\ddot{x} = P(1{,}174 - 5x), \text{ или при } g = 9{,}81 \text{ м/с}^2,\ \ddot{x} + 6{,}91x = 1{,}62.$$

Решение дифференциального уравнения представляется в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного: $x = x_{\text{одн}} + x_{\text{частн}}$. Общее решение однородного уравнения имеет вид $x_{\text{одн}} = C_1 \sin kt + C_2 \cos kt$, где C_1, C_2 – произвольные постоянные; k – круговая частота собственных колебаний пружины, $k = \sqrt{6{,}91} = 2{,}63$ рад/с. Частное решение неоднородного уравнения ищется в виде константы $x_{\text{частн}} = b$. Подставив его в уравнение колебаний, получим $b = 0{,}23$. Таким образом, общее решение неоднородного уравнения имеет вид $x(t) = C_1 \sin 2{,}63t + C_2 \cos 2{,}63t + 0{,}23$.

Произвольные постоянные C_1, C_2 находятся из начальных условий. По условию задачи в начальный момент пружина была в нерастянутом состоянии. Тогда начальная координата пружины (её верхнего края) $x(0) = 0$. Скорость верхнего края пружины в начальный момент времени $\dot{x}(0)$ равна начальной скорости $V_D(0)$ точки D блока 2. Поскольку в начальный момент времени блоку 2 сообщили угловую скорость ω_{20}, то $\dot{x}(0) = V_D(0) = \omega_{20} r = 0{,}1$ м/с.

Подставляя значение начальной координаты в общее решение неоднородного уравнения при $t = 0$, получим $C_2 = -0{,}23$.

Вычисляем скорость движения пружины, взяв производную: $\dot{x}(t) = 2{,}63C_1\cos 2{,}63t - 2{,}63C_2\sin 2{,}63t$. Подставляя начальное значение скорости, получим $C_1 = 0{,}038$. Окончательно уравнение движения верхнего края пружин: $x(t) = 0{,}038\sin 2{,}63t - 0{,}23\cos 2{,}63t + 0{,}23$ м.

Уравнения колебательных движений бруса 1 и блока 2 найдём из ранее полученных кинематических соотношений:

$$x_1 = \frac{xR}{r} = 1{,}5\,x(t) = 0{,}057\sin 2{,}63t - 0{,}34\cos 2{,}63t + 0{,}34 \text{ м};$$

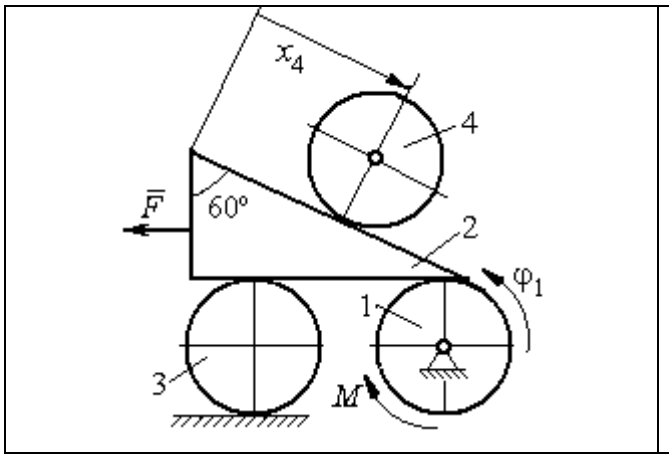
$$\varphi_2 = \frac{x}{r} = 5\,x(t) = 0{,}19\sin 2{,}63t - 1{,}15\cos 2{,}63t + 1{,}15 \text{ рад}.$$

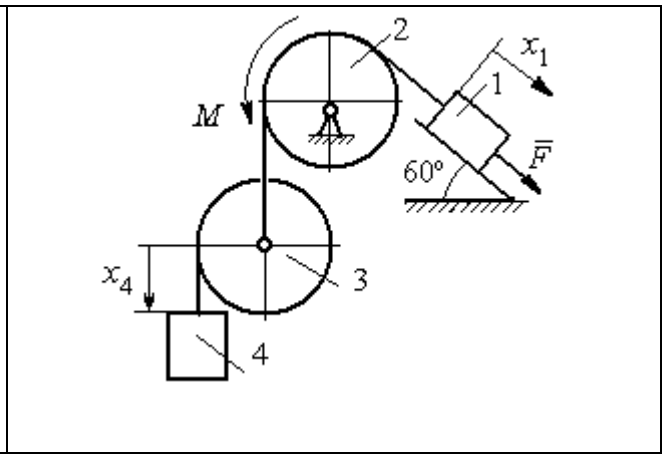
Амплитуда колебаний бруса $A = \sqrt{0{,}057^2 + 0{,}34^2} = 0{,}35$ м.

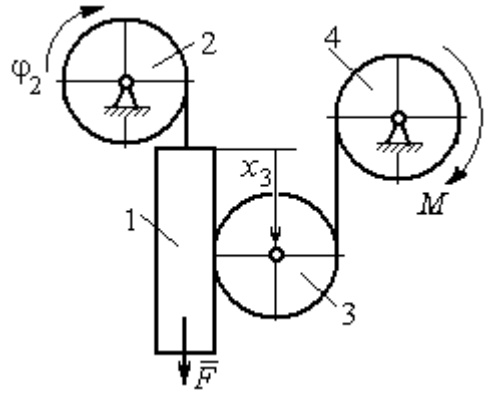
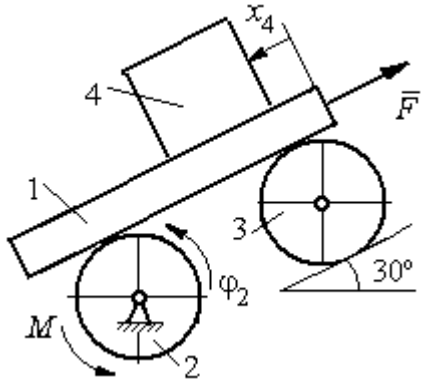
6.5. Задание Д8. Исследование механической системы с двумя степенями свободы

Механическая система, состоящая из четырёх тел, из состояния покоя движется в вертикальной плоскости под действием сил тяжести $\vec{P}_1$, $\vec{P}_2$, $\vec{P}_3$, $\vec{P}_4$, силы $\vec{F}$ и пары сил с моментом M. Качение тел во всех случаях происходит без проскальзывания, скольжение грузов по поверхностям – без трения. Радиусы дисков одинаковы и равны R. Найти уравнения движения системы в обобщённых координатах. Варианты заданий и рекомендуемые обобщённые координаты даны на рис. 6.13, 6.14, варианты исходных данных – в табл. 6.3.

Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**





Варианты № 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
	

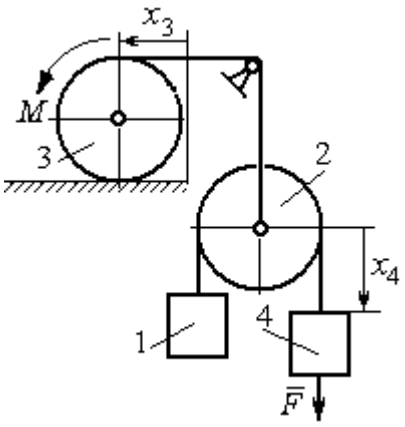
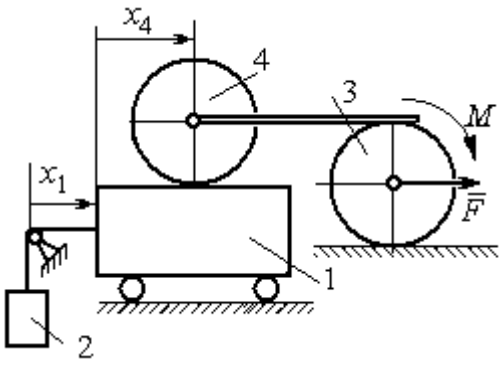
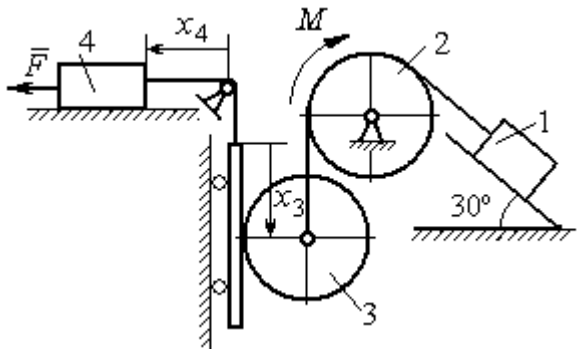
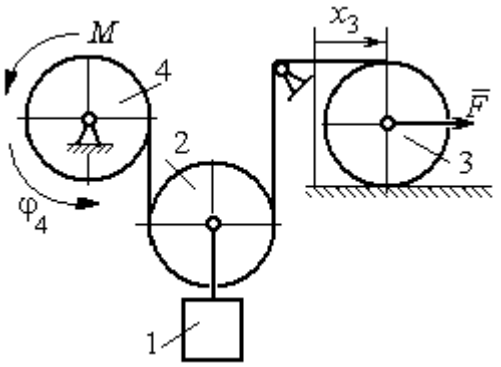
Варианты № 5, 15, 25	**Варианты № 6, 16, 26**
	

Рис. 6.13. Задание Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы. Номера вариантов задания 1 – 6, 11 – 16, 21 – 26

Окончание вариантов задания Д8

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	

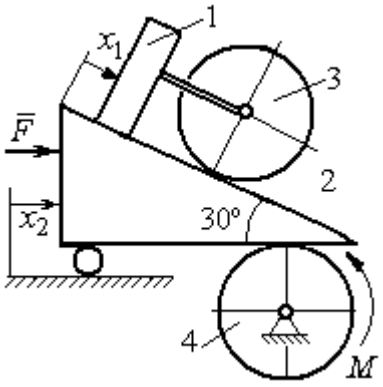
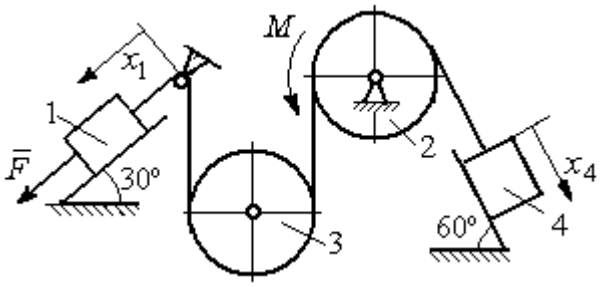
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	

Рис. 6.14. Задание Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы. Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 6.3

Исходные данные задания Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы

Номер варианта задания	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
P_1, Н	P	$2P$	P	$1{,}5P$	P	$3P$	P	$1{,}2P$	$3P$	P	$2P$	P	P	$2P$	P
P_2, Н	$3P$	$3P$	$4P$	$3P$	$2P$	P	$2P$	$3P$	P	$2P$	$3P$	$2P$	$3P$	$4P$	$3P$
P_3, Н	$2P$	$2P$	$3P$	$2P$	$2P$	$2P$	$3P$	P	$2P$	$3P$	$2P$	$2P$	$2P$	P	$2P$
P_4, Н	$2P$	P	P	$2P$	$3P$	$3P$	P	P	$2P$	P	P	P	$2P$	$2P$	$2P$
R, м	$2r$	$1{,}5r$	$2{,}5r$	$1{,}2r$	$2r$	r	$1{,}5r$	r	$2r$	r	$1{,}5r$	$1{,}2r$	$2r$	$2r$	$2r$
F, Н	P	$2P$	P	$3P$	P	P	$2P$	$4P$	P	$2P$	P	$2P$	$1{,}5P$	$4P$	$2P$
M, Н·м	$2Pr$	$3Pr$	$4Pr$	$3Pr$	$3Pr$	$4Pr$	$2Pr$	$2Pr$	$3Pr$	$2Pr$	$3Pr$	$4Pr$	$3Pr$	$3Pr$	$2Pr$

Окончание табл. 6.3

Номер варианта задания	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
P_1, Н	4P	1,5P	P	2P	P	P	1,5P	1,5P	2P	P	P	2P	1,2P	3P	1,2P
P_2, Н	2P	2P	2P	4P	3P	4P	3P	4P	3P	2P	2P	1,2P	2P	3P	2P
P_3, Н	2P	2P	3P	2P	2P	3P	2P	2P	P	2P	3P	2P	P	P	3P
P_4, Н	1,5P	2P	3P	P	2P	2P	2P	P	2P	3P	P	P	2P	P	2P
R, м	1,5r	r	1,5r	2r	r	1,2r	2r	1,5r	2r	r	1,5r	2r	r	1,2r	2r
F, Н	2P	2P	P	3P	4P	2P	3P	2P	3P	P	3P	1,5P	4P	2P	3P
M, Н·м	3Pr	2Pr	4Pr	Pr	4Pr	4Pr	2Pr	Pr	4Pr	2Pr	4Pr	2Pr	2Pr	3Pr	2Pr

Пример выполнения задания Д8. Исследование движения механической системы с двумя степенями свободы

Платформа 3 лежит горизонтально на катке 5 и блоке 4 одинакового радиуса R (рис. 6.15). На платформу действует горизонтальная сила $\vec{F}$. К блоку 4, вращающемуся вокруг неподвижной оси, приложена пара сил с моментом M. Каток 5 катится по горизонтальной поверхности. К краю платформы одним концом прикреплена горизонтальная нить, а к другому концу, переброшенному через невесомый блок, прикреплён груз 6, движущийся вертикально. На платформе 3 установлен каток 2 радиуса R. К центру катка прикреплена нить, расположенная параллельно платформе и натянутая грузом 1, движущимся вертикально (см. рис. 6.15). Движение системы началось из состояния покоя. Качение тел без проскальзывания. Определить уравнения движения системы в обобщённых координатах, если $R = 2r$, веса тел $P_1 = P_6 = P$, $P_3 = 3P$, $P_4 = P_5 = P_2 = 2P$, $F = P$, $M = 3Pr$.

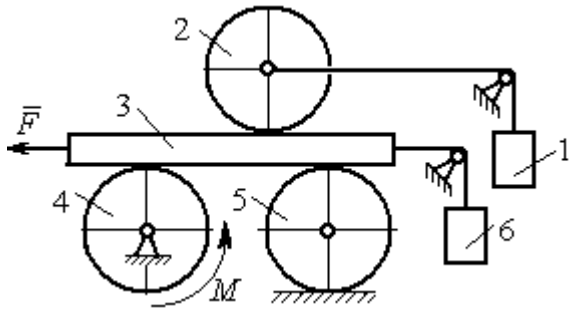


Рис. 6.15. Механическая система с двумя степенями свободы

Решение

Рассматриваемая механическая система, включающая катки 2, 5, платформу 3, блок 4 и грузы 1, 6, имеет две степени свободы, так как перемещение катка 2 относительно платформы 3 не зависит от перемещения самой платформы. За обобщенные координаты выберем перемещение x_2 центра масс катка 2 относительно

края платформы и перемещение x_3 платформы 3 относительно произвольной неподвижной вертикальной плоскости (рис. 6.16). Обобщенные скорости – скорость $\dot{x}_2$ центра масс катка 2 относительно края платформы и скорость платформы $\dot{x}_3$ относительно неподвижной вертикали. Уравнения Лагранжа II рода, описывающие движение системы:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_2}=Q_{x_2},\quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_3}=Q_{x_3},$$

где T – кинетическая энергия системы; Q_{x_2}, Q_{x_3} – обобщенные силы, соответствующие указанным обобщенным координатам.

Вычислим кинетическую энергию системы как сумму кинетических энергий тел.

Платформа 3 совершает поступательное движение. Кинетическая энергия платформы $T_3=\frac{P_3}{2g}V_3^2$, где V_3 – скорость платформы, причём, в соответствии с выбором обобщённых координат и скоростей, $V_3=\dot{x}_3$.

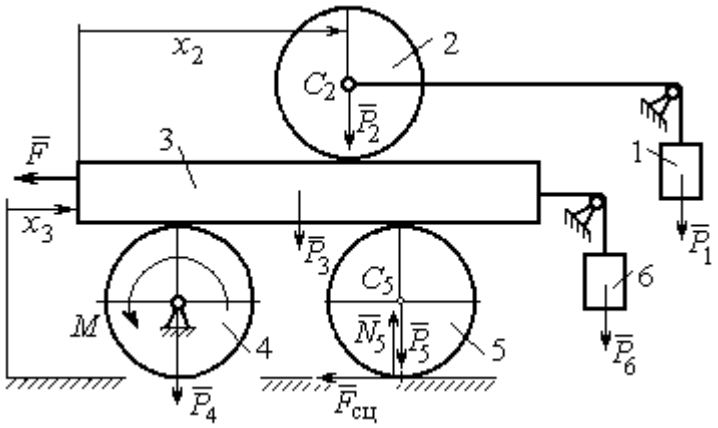


Рис. 6.16. Действующие силы
и обобщённые координаты механической системы

Блок 4 вращается вокруг неподвижной оси. Энергия вращательного движения блока $T_4=\frac{1}{2}J_4\omega_4^2$, где J_4, ω_4 – осевой момент инерции блока 4 и его угловая скорость. Угловая скорость блока 4 $\omega_4=\frac{V_3}{R_4}=\frac{\dot{x}_3}{2r}$.

Каток 5 совершает плоскопараллельное движение, его кинетическая энергия вычисляется по формуле: $T_5=\frac{1}{2}\frac{P_5}{g}V_{C_5}^2+\frac{1}{2}J_5\omega_5^2$, где J_5 – момент инерции катка относительно оси вращения, проходящей через его центр масс; ω_5, V_{C_5} – угловая скорость и скорость центра масс катка 5. Для определения скорости центра масс

катка 5 заметим, что точка касания катка с платформой имеет скорость, равную скорости платформы, а точка *K* касания катка с неподвижной горизонтальной поверхностью является его мгновенным центром скоростей. Следовательно, скорость центра катка равна половине скорости платформы: $V_{C_5} = \frac{1}{2}V_3 = \frac{1}{2}\dot{x}_3$. Угловая скорость катка 5 $\omega_5 = \frac{V_3}{2R_5} = \frac{\dot{x}_3}{4r}$ (рис. 6.17, *a*).

При расчёте кинетической энергии катка 2 необходимо учитывать, что каток совершает сложное движение. Качение катка по поверхности платформы является относительным движением, перемещение его вместе с платформой – переносным. Абсолютная скорость V_{C_2} центра масс катка 2 представляется в виде векторной суммы $\vec{V}_{C_2} = \vec{V}_{C_2r} + \vec{V}_{C_2e}$ (рис. 6.17, *b*), где $\vec{V}_{C_2e}$ – вектор переносной скорости катка, равный по модулю скорости платформы, $V_{C_2e} = V_3 = \dot{x}_3$; $\vec{V}_{C_2r}$ – вектор относительной скорости центра масс катка, равный по величине скорости центра масс катка 2 относительно края платформы, $V_{C_2r} = \dot{x}_2$. Модуль абсолютной скорости центра масс катка 2 равен сумме $V_{C_2} = V_{C_2r} + V_{C_2e} = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$ (рис. 6.17, *b*).

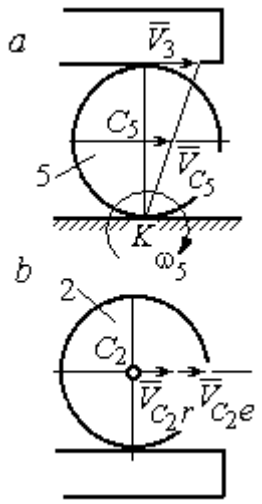


Рис. 6.17. Скорости центров катков 2 и 5

Угловая скорость переносного движения катка 2 равна нулю, поскольку переносное движение катка – это поступательное движение платформы. В результате угловая скорость катка 2 равна его угловой скорости в относительном движении: $\omega_2 = \frac{V_{C_2r}}{R_2} = \frac{\dot{x}_2}{2r}$. Кинетическая энергия катка 2 рассчитывается по формуле: $T_2 = \frac{1}{2}\frac{P_2}{g}V_{C_2}^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2$, где J_2 – осевой момент инерции катка 2; ω_2 – угловая скорость катка; V_{C_2} – абсолютная скорость центра масс катка 2.

Движение грузов 1 и 6 поступательное, их кинетические энергии вычисляются по формулам: $T_1 = \frac{P_1}{2g} V_1^2$, $T_6 = \frac{P_6}{2g} V_6^2$. При этом скорость груза 1 равна абсолютной скорости центра катка 2: $V_1 = V_{C_2} = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$, а скорость груза 6 равна скорости платформы: $V_6 = V_3 = \dot{x}_3$.

Выразим кинетическую энергию системы через обобщённые скорости. Кинетическая энергия:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 =$$

$$= \frac{P_1}{2g} V_1^2 + \frac{1}{2}\frac{P_2}{g} V_{C_2}^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 +$$

$$\frac{P_3}{2g} V_3^2 + \frac{1}{2} J_4 \omega_4^2 +$$

$$\frac{1}{2}\frac{P_5}{g} V_{C_5}^2 + \frac{1}{2} J_5 \omega_5^2 + \frac{P_6}{2g} V_6^2,$$

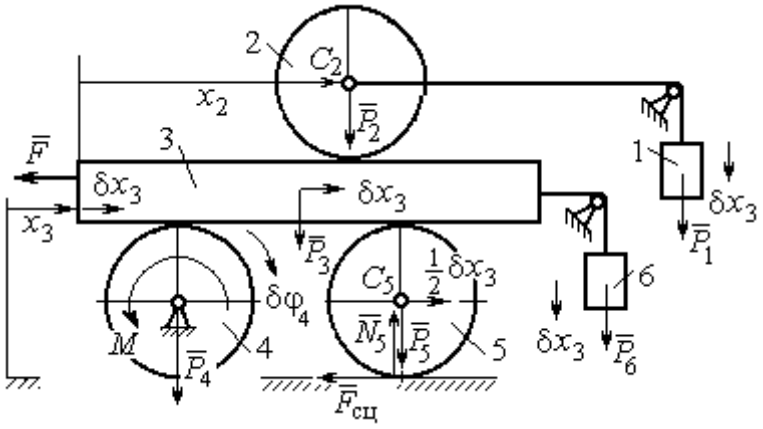


Рис. 6.18. Возможное перемещение системы при вариации обобщённых координат $\delta x_3 > 0$, $\delta x_2 = 0$

где значения скоростей: $V_1 = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$, $V_{C_2} = \dot{x}_2 + \dot{x}_3$, $\omega_2 = \frac{\dot{x}_2}{2r}$, $V_3 = \dot{x}_3$, $\omega_4 = \frac{\dot{x}_3}{2r}$, $V_{C_5} = \frac{1}{2}\dot{x}_3$, $\omega_5 = \frac{\dot{x}_3}{4r}$, $V_6 = \dot{x}_3$. Значения осевых моментов инерции катков: $J_2 = \frac{P_2 R_2^2}{2g} = \frac{4Pr^2}{g}$, $J_4 = \frac{P_4 R_4^2}{2g} = \frac{4Pr^2}{g}$, $J_5 = \frac{P_5 R_5^2}{2g} = \frac{4Pr^2}{g}$. Подставляя значения скоростей, моментов инерции и данные задачи, получим выражение кинетической энергии системы в виде

$$T = \frac{P}{2g}(\dot{x}_2 + \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{2P}{g}(\dot{x}_2 + \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{4Pr^2}{g}\left(\frac{\dot{x}_2}{2r}\right)^2 + \frac{3P}{2g}\dot{x}_3^2 +$$

$$+\frac{1}{2}\cdot\frac{4Pr^2}{g}\left(\frac{\dot{x}_3}{2r}\right)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{2P}{g}\left(\frac{\dot{x}_3}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}\cdot\frac{4Pr^2}{g}\left(\frac{\dot{x}_3}{4r}\right)^2 + \frac{P}{2g}\dot{x}_3^2 =$$

$$= \frac{1}{2}\frac{P}{g}\dot{x}_2^2 + \frac{3P}{2g}(\dot{x}_2 + \dot{x}_3)^2 + \frac{23P}{8g}\dot{x}_3^2 = \frac{2P}{g}\dot{x}_2^2 + \frac{3P}{g}\dot{x}_2\dot{x}_3 + \frac{35P}{8g}\dot{x}_3^2.$$

Дадим системе возможное перемещение по координате x_3, оставляя координату x_2 без изменения: $\delta x_3 > 0, \delta x_2 = 0$ (рис. 6.18). При таком перемещении каток 2

стоит на платформе и движется поступательно вместе с ней. В этом случае работа сил тяжести $\vec{P}_2$, $\vec{P}_5$, $\vec{P}_3$ катков 2, 5 и платформы 3 равна нулю, так как перемещения точек приложения этих сил перпендикулярны векторам сил (см. рис. 6.18). Работа силы тяжести $\vec{P}_4$ равна нулю, так как точка приложения силы лежит на неподвижной оси вращения блока 4.

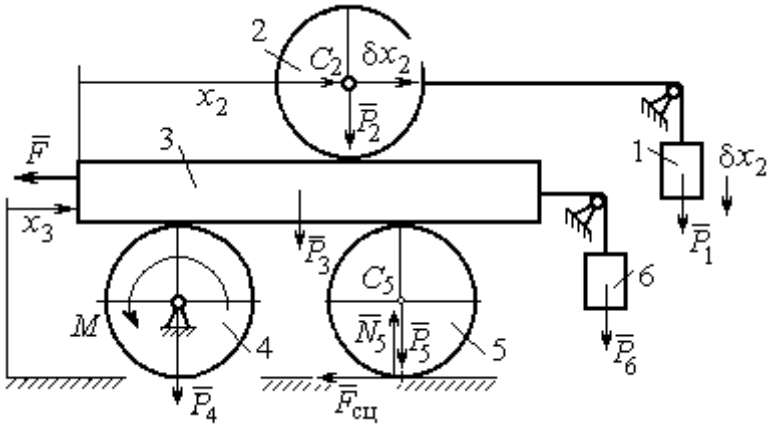


Рис. 6.19. Возможное перемещение системы при вариации обобщённых координат $\delta x_2>0$, $\delta x_3=0$

Работу будут производить сила $\vec{F}$, пара сил с моментом M и силы тяжести грузов $\vec{P}_1$ и $\vec{P}_6$. Суммарная работа сил на перемещении δx_3: $\delta A = -F\delta x_3 - M\delta\varphi_4 + P_1\delta x_3 + P_6\delta x_3$.

Представим полученное ранее соотношение $\omega_4 = \dfrac{\dot{x}_3}{2r}$ в дифференциальном виде: $d\varphi_4 = \dfrac{dx_3}{2r}$. Поскольку дифференциалы координат также являются возможными перемещениями, получим нужное соотношение $\delta\varphi_4 = \dfrac{\delta x_3}{2r}$. Теперь элементарную работу сил на возможном перемещении δx_3 с учётом значений сил можно представить в виде:

$$\delta A = -P\delta x_3 - 3Pr\frac{\delta x_3}{2r} + P\delta x_3 + P\delta x_3 = -\frac{1}{2}P\delta x_3,$$

отсюда обобщённая сила, соответствующая координате x_3: $Q_{x_3} = -\dfrac{1}{2}P$.

Дадим системе другое независимое перемещение – по координате x_2, оставляя координату x_3 без изменения: $\delta x_2 > 0, \delta x_3 = 0$ (рис. 6.19).

При этом возможном перемещении вся система стоит, кроме катка 2, который катится по поверхности неподвижной платформы, и груза 1, который опускается вертикально вниз. Работу совершает только сила тяжести груза 1. Выражая

работу в виде $\delta A = P_1 \delta x_2 = P\delta x_2$, найдём обобщённую силу, соответствующую координате x_2: $Q_{x_2} = P$.

Составим уравнения Лагранжа. С этой целью вычислим частные производные от кинетической энергии по обобщенным скоростям $\dot{x}_3$ и $\dot{x}_2$:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} = \frac{3P}{g}\dot{x}_2 + \frac{35P}{4g}\dot{x}_3, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = \frac{4P}{g}\dot{x}_2 + \frac{3P}{g}\dot{x}_3$$

и по обобщённым координатам: $\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial x_4} = 0$.

Определим полные производные по времени от частных производных кинетической энергии по скоростям:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3}\right) = \frac{3P}{g}\ddot{x}_2 + \frac{35P}{4g}\ddot{x}_3, \quad \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2}\right) = \frac{4P}{g}\ddot{x}_2 + \frac{3P}{g}\ddot{x}_3.$$

Подставляя результаты расчётов в уравнения Лагранжа с учётом вычисленных значений обобщённых сил, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих движение системы в обобщённых координатах:

$$12\ddot{x}_2 + 35\ddot{x}_3 = -2g, \quad 4\ddot{x}_2 + 3\ddot{x}_3 = g.$$

Алгебраическим решением системы служат значения ускорений:

$$\ddot{x}_3 = -\frac{5}{26}g = -0{,}19g \quad \text{и} \quad \ddot{x}_2 = \frac{41}{104}g = 0{,}39g.$$

Полученные выражения представляют собой дифференциальные уравнения, проинтегрировав которые дважды с нулевыми начальными условиями (движение началось из состояния покоя), найдём уравнения абсолютного движения платформы и относительного движения центра масс катка 2:

$$x_3 = -0{,}095gt^2, \quad x_2 = 0{,}195gt^2.$$

Отрицательное значение координаты x_3 означает, что движение платформы происходит в отрицательном направлении оси x_3 (см. рис. 6.16).

Абсолютное движение центра катка 2 представляется суммой относительного и переносного движений: $x_{C_2} = x_2 + x_3 = 0{,}1gt^2$.

Уравнение вращательного движения катка 2 находится на основании выражения $\varphi_2 = \frac{1}{R_2} x_2 = \frac{1}{2r} x_2 = 0{,}097 \frac{gt^2}{r}$. Вращение блока 4 описывается уравнением $\varphi_4 = \frac{1}{R_4} x_3 = \frac{1}{2r} x_3 = -0{,}047 \frac{gt^2}{r}$.

Движение катка 5 описывается двумя уравнениями: уравнением движения центра масс катка $x_{C_5} = \frac{1}{2} x_3 = -0{,}047 gt^2$ и уравнением вращательного движения катка $\varphi_5 = \frac{x_3}{2R_5} = -0{,}024 \frac{gt^2}{r}$.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Бать М. И., *Джанелидзе Г. Ю.*, *Кельзон А. С.* Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 1–2.– СПб.: Лань, 2010.

Бутенин Н. В., *Лунц Я. Л.*, *Меркин Д. Р.* Курс теоретической механики: в 2-х томах.– М.: Наука, 2009.

Вебер Г. Э., *Ляпцев С. А*. Лекции по теоретической механике. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008.

Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебн. для втузов. – М.: Высшая школа, 2010.

Учебное издание

Евгений Борисович Волков
Юрий Михайлович Казаков

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

сборник заданий для расчетно-графических работ

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы студентов, выполнению практических и контрольных работ

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный
горный университет»

Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы студентов

Екатеринбург
2017

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
горно-механического факультета
«15» декабря 2017 г.
Председатель комиссии
проф. В. П. Барановский

Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие
для самостоятельной работы студентов

Издание УГГУ Екатеринбург, 2017

В 67

Рецензент: *Н. М. Суслов*, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ГМК
Уральского государственного горного университета

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры технической механики от 19.12.2016 г. (протокол № 2) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Уральского государственного горного университета.

Волков Е. Б., Казаков Ю. М.

В67 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА: Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов. / Е. Б. Волков, Ю. М. Казаков, Уральский государственный горный университет. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 156 с.

Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы студентов содержит краткие методические указания, контрольные задания и примеры выполнения заданий по темам: «Статика твердого тела. Равновесие произвольной плоской и пространственной систем сил», «Кинематика вращательного и плоскопараллельного движений твердого тела. Определение скоростей и ускорений точек твёрдого тела», «Сложное движение точки», «Динамика точки. Дифференциальные уравнения движения точки. Гармонические и вынужденные колебания точки. Применение теоремы об изменении кинетической энергии при исследовании движения точки», «Применение общих теорем динамики к исследованию движения механической системы», «Принципы механики. Применение общего уравнения динамики к исследованию движения механической системы», «Уравнения Лагранжа II рода».

Учебно-методическое пособие для студентов всех специальностей очной формы обучения.

© Волков Е. Б., Казаков Ю. М., 2017
©Уральский государственный горный университет, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА 4
1.1. Основные виды связей и их реакции 4
1.2. Моменты силы относительно центра и относительно оси. Пара сил. Момент пары 5
1.3. Условия равновесия систем сил 7
1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел 8
1.5. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил 17
2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА 26
2.1. Кинематика точки. Основные параметры движения точки 26
2.2. Вращение тела вокруг неподвижной оси 28
2.3. Плоскопараллельное движение твёрдого тела 29
2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек твердого тела при поступательном и вращательном движениях 32
2.5. Задание К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении 38
2.6. Задание К3. Определение ускорений точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении 46
3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ 57
3.1. Основные понятия сложного движения точки 57
3.2. Задание К4. Определение скорости и ускорения точки при сложном движении 60
4. ДИНАМИКА ТОЧКИ 73
4.1. Дифференциальные уравнения движения точки. 73
4.2. Задание Д1. Интегрирование дифференциальных уравнений движения точки ... 73
4.3. Колебания материальной точки 80
4.4. Задание Д2. Исследование колебаний точки 84
4.5. Теорема об изменении кинетической энергии точки. 95
4.6. Задание Д3. Исследование движения точки с применением теоремы об изменении кинетической энергии 96
5. ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 103
5.1. Описание движений твёрдых тел на основе общих теорем динамики системы. 103
5.2. Задание Д4. Динамический расчет механической системы 104
5.3. Теорема об изменении кинетической энергии системы. 112
5.4. Задание Д5. Исследование движения механической системы с применением теоремы об изменении кинетической энергии 114
6. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА 124
6.1. Принципы механики. Общее уравнение динамики 124
6.2. Задание Д6. Исследование механической системы с применением общего уравнения динамики 126
6.3. Уравнения Лагранжа II рода 136
6.4. Задание Д7. Исследование механической системы с одной степенью свободы с применением уравнений Лагранжа 137
6.5. Задание Д8. Исследование механической системы с двумя степенями свободы 145
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 155

1. СТАТИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Статика представляет раздел теоретической механики, в котором изучаются условия равновесия твердых тел под действием системы сил.

1.1. Основные виды связей и их реакции

Опора тела на гладкую плоскость (поверхность) без трения. Реакция приложена в точке касания и направлена перпендикулярно к общей касательной соприкасающихся поверхностей. При опоре углом, или на угол (рис. 1.1, *a*), реакция направлена по нормали к одной из поверхностей. **Гибкая связь**. Если на тело наложена связь в виде гибкой нерастяжимой нити (каната, троса), то реакция связи $\vec{T}$, равная натяжению нити, приложена к телу и направлена вдоль нити (рис. 1.1, *b*).

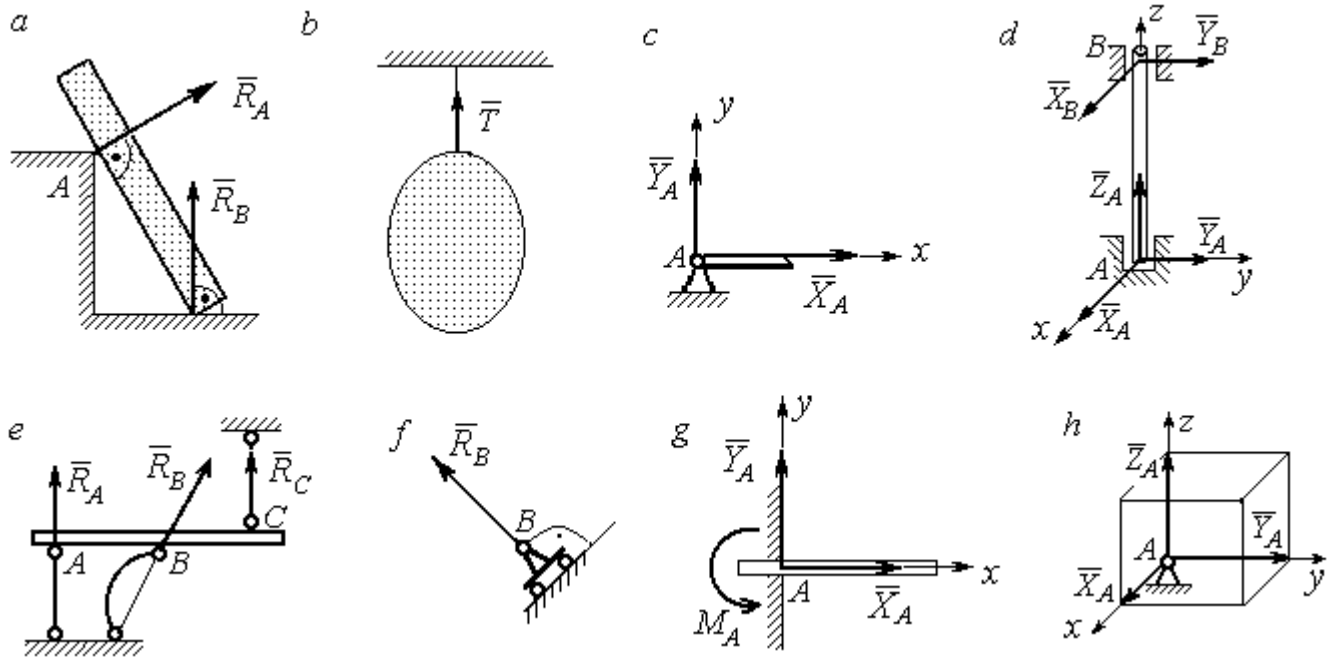


Рис. 1.1. Виды связей и их реакции:
a – реакция опоры тела на гладкую поверхность без трения; *b* – реакция связи гибкой нерастяжимой нити; *c* – реакция цилиндрического шарнира; *d* – реакция подшипника и подпятника; *e* – реакция невесомого стержня; *f* – реакция подвижной опоры; *g* – реакция жесткой заделки; *h* – реакция пространственного шарнира

Цилиндрический шарнир (подшипник) создает соединение, при котором одно тело может вращаться по отношению к другому. Реакция цилиндрического шарнира лежит в плоскости, перпендикулярной оси шарнира. При решении задач реакцию цилиндрического шарнира $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, взятыми по направлениям координатных осей (рис. 1.1, *c*). Реакция подшипника $\vec{R}_B$ (рис. 1.1, *d*) также изображается своими составляющими $\vec{X}_B$ и $\vec{Y}_B$, взятыми по направлениям координатных осей в плоскости, перпендикулярной оси вращения подшипника. Величина реакции определяется по формуле: $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$. **Реакция прямолинейного невесомого стержня с шарнирными соединениями на краях** направлена вдоль самого стержня, а криволинейного – вдоль линии, соединяющей точки крепления стержня (рис. 1.1, *e*). **Реакция подвижной опоры** $\vec{R}_B$ (рис. 1.1, *f*) направлена по нормали к поверхности, на которую опираются катки опоры. **Жесткая заделка** (рис. 1.1, *g*) препятствует не только линейным перемещениям тела, но и повороту. Реакция заделки состоит из силы реакции $\vec{R}_A$ и пары сил с моментом M_A. При решении задач силу реакции жесткой заделки $\vec{R}_A$ изображают ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, взятыми по направлениям координатных осей. Модуль реакции определяется по формуле $R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}$. Виды связей и их реакции показаны на рис. 1.1.

1.2. Моменты силы относительно центра и относительно оси. Пара сил. Момент пары

Алгебраическим моментом силы *F* относительно центра *O* $M_O(\vec{F})$, или просто **моментом силы** $\vec{F}$ относительно центра *O*, называют взятое с соответствующим знаком произведение модуля силы $\vec{F}$ на кратчайшее расстояние *h* от центра *O* до линии действия силы: $M_O(\vec{F}) = \pm Fh$ (рис. 1.2, *a*).

Величину h называют **плечом силы**. Момент силы относительно центра считается положительным, если сила стремится повернуть тело вокруг центра против хода часовой стрелки, и отрицательным – в обратном случае.

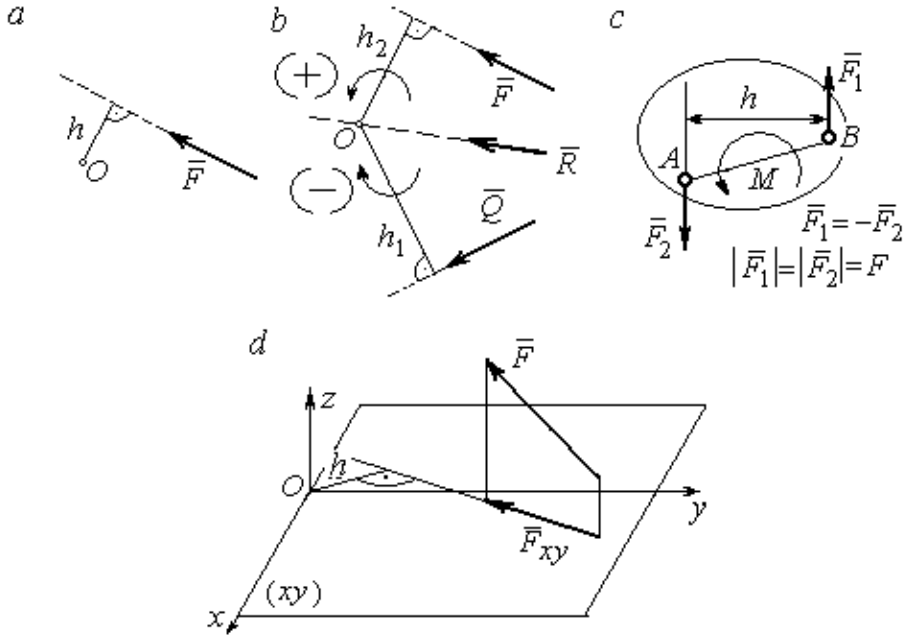


Рис. 1.2. Схемы для вычисления моментов сил:
a, *b* – момент силы относительно центра; *c* – момент пары сил;
d – момент силы относительно оси

На рис. 1.2, *b* показано, что момент силы $\vec{F}$ относительно центра O положительный, а момент силы $\vec{Q}$ относительно того же центра – отрицательный. Момент силы $\vec{R}$ относительно центра O равен нулю, так как линия действия этой силы проходит через центр O и плечо силы равно нулю.

Парой сил, или просто парой (рис.1.2, *c*), называют систему двух равных по модулю сил, параллельных, направленных в противоположные стороны и не лежащих на одной прямой. Алгебраическим моментом пары сил, или **моментом пары,** называют взятое со знаком плюс или минус произведение модуля одной из сил пары на плечо пары – кратчайшее расстояние между линиями действия ее сил. Правило знаков такое же, как и для момента силы. На рисунках пару часто изображают дуговой стрелкой, показывающей направление поворота твердого тела под действием пары (см. M на рис. 1.2, *c*).

Моментом силы относительно оси называют момент проекции этой силы на плоскость, перпендикулярную оси, относительно точки пересечения оси с этой плоскостью. На рис. 1.2, *d* показано вычисление момента силы F относительно оси *z*: $M_z(\vec{F}) = F_{xy}h$, где F_{xy} – проекция силы $\vec{F}$ на плоскость *xy*, перпендикулярную оси *z*, *h* – плечо проекции F_{xy} относительно центра *O* – точки пересечения оси *z* и плоскости *xOy*.

1.3. Условия равновесия систем сил

Плоской системой сил называется система сил, расположенных в одной плоскости.

Основная форма условий равновесия плоской системы сил. Для равновесия плоской системы сил, приложенных к твердому телу, необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на каждую из двух осей прямоугольной системы координат, расположенной в плоскости действия сил, были равны нулю и сумма моментов сил относительно любого центра, находящегося в плоскости действия сил, также была равна нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum M_A(\vec{F}_k) = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky} – проекции всех сил на координатные оси; $M_A(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно произвольно выбранного центра A.

Пространственной системой сил называется система сил, расположенных произвольно в пространстве.

Для **равновесия пространственной системы сил** необходимо и достаточно, чтобы суммы проекций всех сил на оси прямоугольной системы координат были равны нулю и суммы моментов всех сил относительно тех же осей также были равны нулю:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0,$$

где F_{kx}, F_{ky}, F_{kz} – проекции всех сил на координатные оси x, y, z; $M_x(\vec{F}_k)$, $M_y(\vec{F}_k)$, $M_z(\vec{F}_k)$ – моменты всех сил относительно выбранных осей.

Равновесие систем тел

Связи, соединяющие части конструкции, называют **внутренними,** в отличие от **внешних** связей, скрепляющих конструкцию с внешними телами, не входящими в данную конструкцию. Одним из способов решения задач на равновесие сил, действующих на сочленённую конструкцию с внутренними связями, является **разбиение конструкции на отдельные тела** и составление уравнений равновесия для каждого из тел, входящих в конструкцию. При этом в уравнения равновесия должны входить только силы, непосредственно приложенные к тому телу, равновесие которого рассматривается.

1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел

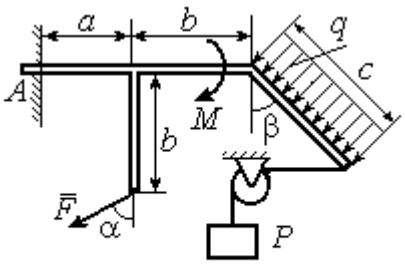
Каждый вариант задания включает две задачи по темам: «Равновесие произвольной плоской системы сил» и «Равновесие системы тел».

В задачах требуется определить реакции связей конструкции исходя из условия равновесия произвольной плоской системы сил. Весом стержневых подпорок, поддерживающих балочные конструкции, и блоков, через которые перекинуты невесомые нити, пренебречь.

Варианты заданий даны на рис. 1.3 – 1.6. Исходные данные приведены в табл. 1.1. Из таблицы исходных данных выбираются значения тех параметров, которые указаны на схемах.

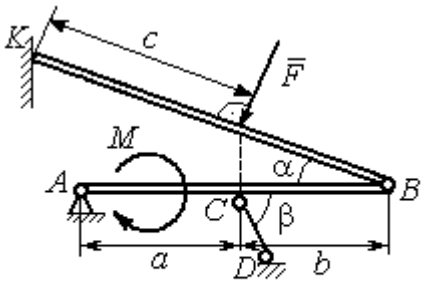
Варианты № 1, 11, 21

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

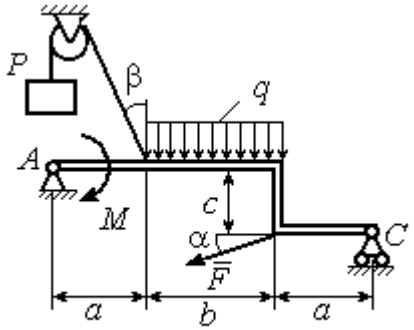
Задача 2



Найти реакции шарниров A, B, реакцию стержня CD и реакцию опоры в точке K

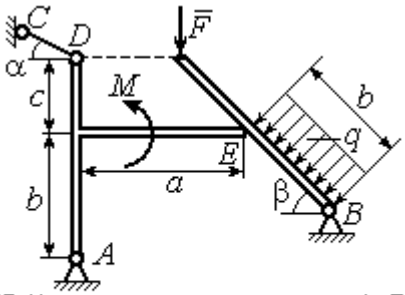
Варианты № 2, 12, 22

Задача 1



Найти реакции шарниров A и C

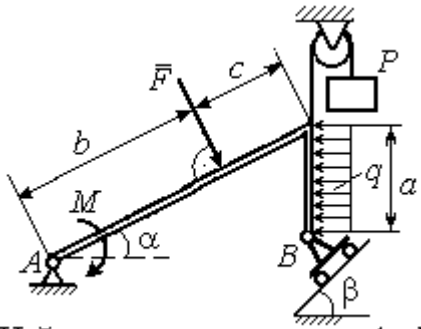
Задача 2



Найти реакции шарниров A, B, реакцию опоры в точке E и реакцию стержня CD

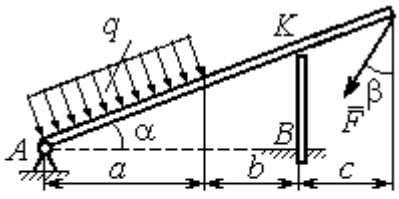
Варианты № 3, 13, 23

Задача 1



Найти реакцию шарниров A и B

Задача 2

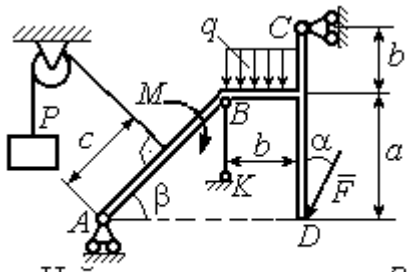


Найти реакцию шарнира A, реакцию опоры в точке K и реакцию жесткой заделки в точке B

Рис. 1.3. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

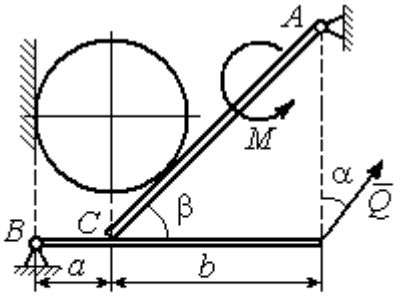
Варианты № 4, 14, 24

Задача 1



Найти усилие в стержне BK и реакцию шарниров A, C

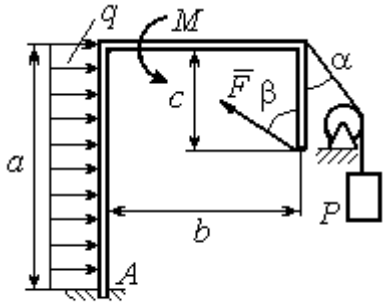
Задача 2



Вес шара P. Найти реакцию шарниров A, B, давление шара на балку и стенку, реакцию опоры балки в точке C и уравновешивающую силу Q

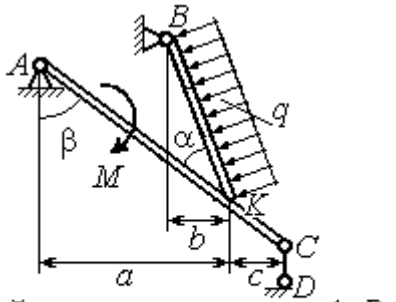
Варианты № 5, 15, 25

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

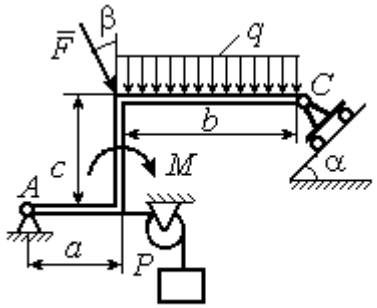
Задача 2



Найти реакцию шарнирв A, B, реакцию стержня CD и реакцию опоры в точке K

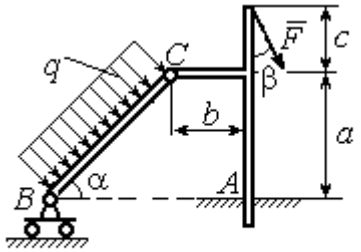
Варианты № 6, 16, 26

Задача 1



Найти реакции шарниров A и C

Задача 2

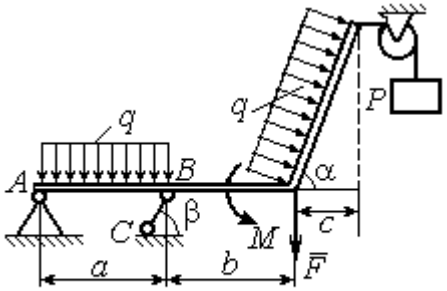


Найти реакцию жесткой заделки в точке A и реакции шарниров B и C

Рис. 1.4. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 4 – 6, 14 – 16, 24 –26

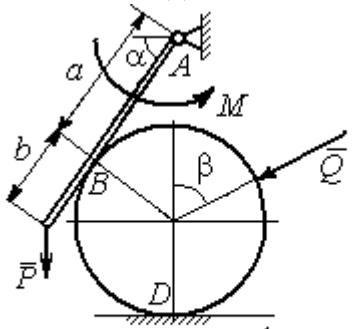
Варианты № 7, 17, 27

Задача 1



Найти реакцию стержня BC и реакцию шарнира A

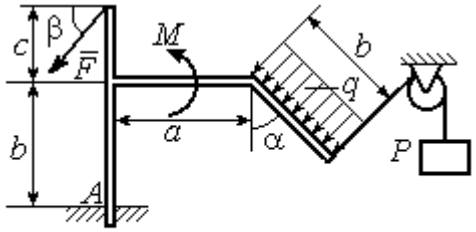
Задача 2



Найти реакцию шарнира A, давление балки на шар, реакцию опоры шара в точке D и уравновешивающую силу Q

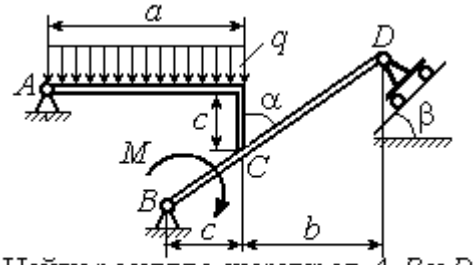
Варианты № 8, 18, 28

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

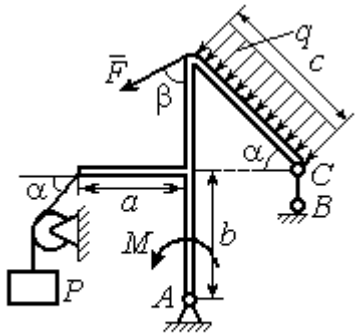
Задача 2



Найти реакцию шарниров A, B и D и реакцию опоры в точке C

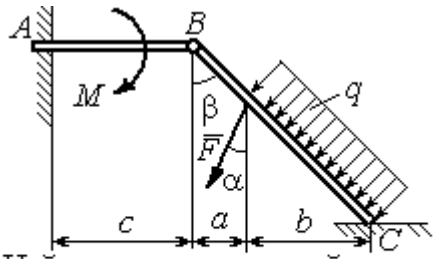
Варианты № 9, 19, 29

Задача 1



Найти реакцию стержня BC и реакцию шарнира A

Задача 2



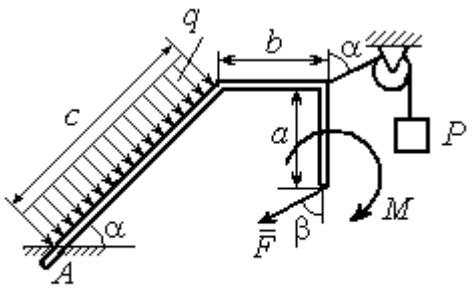
Найти реакцию жесткой заделки в точке A, реакцию шарнира B и реакцию опоры в точке C

Рис. 1.5. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

Окончание вариантов задания С1

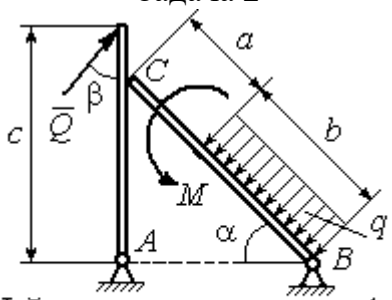
Варианты № 10, 20, 30

Задача 1



Найти реакцию жесткой заделки в точке A

Задача 2



Найти реакцию шарниров A, B, реакцию опоры в точке C и уравновешивающую силу Q

Рис. 1.6. Задание С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел. Номера вариантов задания 10, 20, 30

Таблица 1.1

Исходные данные задания С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел.

Номер варианта задания	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
P, кН	6	5	6	12	6	6	10	3	8	5	10	4	8	10	8
F, кН	12	6	10	5	12	8	6	5	6	2	12	8	12	6	10
q, кН/м	5	4	2	3	6	3	5	2	2	4	6	2	3	4	5
M, кН·м	12	8	6	8	12	5	12	8	4	6	8	12	10	6	10
α, град	45	60	30	60	30	30	45	60	30	30	45	30	60	45	60
β, град	60	30	45	30	60	90	60	60	30	45	30	45	30	60	30
a, м	3	4	3	4	3	4	3	4	1	2	2	3	2	3	4
b, м	3	3	4	3	2	4	3	3	2	3	3	3	4	3	2
c, м	4	2	2	2	3	2	2	1	5	4	4	2	1	2	2

Номер варианта задания	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
P, кН	10	8	10	6	4	6	12	10	5	6	8	6	8	4	6
F, кН	6	12	12	8	3	14	10	8	15	10	12	8	10	10	2
q, кН/м	5	3	4	3	2	3	2	5	4	2	3	4	5	2	4
M, кН·м	10	6	8	6	5	12	4	6	8	10	12	10	6	4	8
α, град	60	60	30	45	60	30	60	45	30	60	45	30	30	30	45
β, град	45	30	30	60	60	45	30	60	30	45	90	30	60	45	30
a, м	3	4	3	1	2	2	4	1	4	3	4	3	2	1	2
b, м	2	4	3	3	4	1	4	3	2	2	2	2	2	2	2
c, м	3	2	2	4	5	4	2	2	1	1	1	2	1	3	5

Пример выполнения задания С1. Равновесие произвольной плоской системы сил. Равновесие системы тел.

Задача 1**.** Рама *ACE* (рис. 1.7) в точке *A* закреплена на цилиндрической шарнирной опоре, а в точке *B* поддерживается вертикальным невесомым стержнем *BK*. На раму действуют: пара с моментом $M = 8$ Нм, сила $F = 10$ Н, приложенная в точке *D* под углом 60° к раме, и равномерно распределенная нагрузка интенсивностью $q = 2$ Н/м, приложенная на отрезке *AB*. В точке *E* под прямым углом к участку балки *CE* прикреплен трос, несущий груз $P = 20$ Н. Пренебрегая весом балки, определить реакцию шарнира *A* и реакцию стержневой опоры *BK*, если $a = 2$ м.

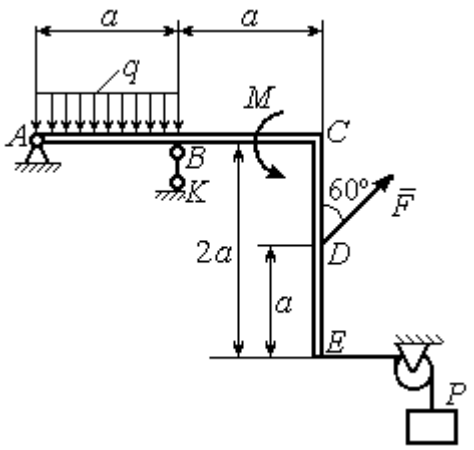


Рис. 1.7. Конструкция рамы

Решение

Выбираем систему координат *xAy*, например, как показано на рис. 1.8. Заменяем действие связей их реакциями. Изображаем реакцию шарнира *A* двумя ее составляющими $\vec{X}_A$ и $\vec{Y}_A$, направленными вдоль горизонтальной и вертикальной осей (см. рис. 1.8). Реакция $\vec{R}_B$ невесомой стержневой опоры *BK* приложена в точке *B* и направлена вдоль стержня *BK*. Заменяем распределенную нагрузку её равнодействующей $\vec{Q}$. Сила $\vec{Q}$ приложена в середине отрезка *AB* и по модулю равна $Q = qa = 4$ Н. Действие груза *P* на раму изображается реакцией $\vec{T}$, равной по величине весу груза.

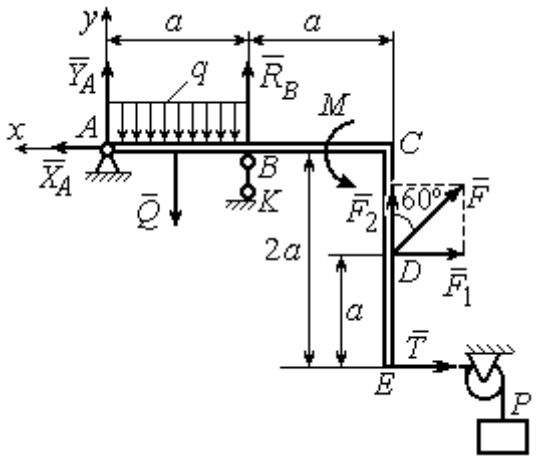


Рис. 1.8. Силы и реакции связей, действующие на раму при её равновесии

При равновесии рамы действующие на неё силы составляют уравновешенную произвольную плоскую систему. Условия равновесия системы сил имеют вид: $\sum F_{kx} = 0$, $\sum F_{ky} = 0$, $\sum M_A(\vec{F}_k) = 0$. Вычисляя проекции сил на оси *x*, *y*, и моменты сил относительно центра *A*, уравнения равновесия получим в виде:

$$\sum F_{kx} = X_A - F\cos 30^\circ - T = 0, \quad \sum F_{ky} = Y_A - Q + R_B + F\cos 60^\circ = 0.$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -Q\frac{a}{2} + R_B a + M + F\cos 60^\circ \cdot 2a + F\cos 30^\circ \cdot a + T2a = 0.$$

Здесь для вычисления момента силы $\vec{F}$ относительно центра *A* использована теорема Вариньона: $M_A(\vec{F}) = M_A(\vec{F}_1) + M_A(\vec{F}_2) = F_1 \cdot a + F_2 \cdot 2a$, где $F_1 = F\cos 30^\circ$, $F_2 = F\cos 60^\circ$ (см. рис. 1.8).

Подставляя в уравнения равновесия исходные данные задачи, получим систему уравнений относительно неизвестных X_A, Y_A, R_B:

$$X_A - 28{,}66 = 0, \quad Y_A + R_B + 1 = 0, \quad R_B \cdot 2 + 121{,}32 = 0.$$

Решая систему, найдем X_A = 28,66 Н, Y_A = 59,66 Н, R_B = – 60,66 Н.

Отрицательное значение величины R_B означает, что фактическое направление реакции R_B стержневой опоры *BK* противоположно направлению, показанному на рис. 1.8. Численное значение реакции шарнира

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = \sqrt{28{,}66^2 + 59{,}66^2} = 66{,}18 \text{ Н}.$$

Задача 2. Балка *ABLC* с вертикальной частью *AB* и горизонтальной перекладиной *LC* закреплена в точке *A* с помощью жесткой заделки (рис. 1.9). Наклонная балка *EC* с углом наклона к горизонту 60° в точке *C* шарнирно прикреплена к горизонтальной перекладине *CL*, а в точке *E* закреплена на шарнирно-подвижной опоре, установленной на горизонтальной поверхности. На конструкцию действуют равномерно распределенная на отрезках *BL* и *DE* нагрузка с одинаковой интенсивностью $q = 2$ кН/м, сила $\vec{F}$, приложенная в точке *D* перпендикулярно балке *EC* и равная по величине *F* = 10 кН, и пара сил

с моментом M = 5 кН·м. Определить реакцию жесткой заделки A и реакции шарниров C и E, если a = 2 м.

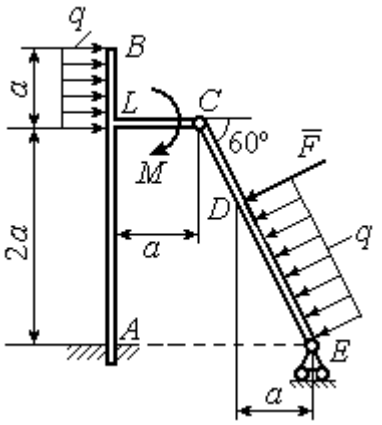


Рис. 1.9. Равновесие конструкции двух балок, соединённых шарниром

Решение

Разделяем систему на две части по шарниру C и рассмотрим равновесие балок $ABLC$ и EC отдельно. Изобразим обе балки и расставим внешние силы и реакции связей (рис. 1.10). Рассмотрим балку $ABLC$ (рис. 1.10, *a*). Заменим распределенную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_1$, приложенной в середине отрезка BL, направленной в сторону действия нагрузки и равной $Q_1 = q \cdot a =$ 4 кН. Кроме силы $\vec{Q}_1$ и пары сил с моментом M на балку действуют реакция жёсткой заделки в точке A, имеющая своими составляющими силы $\vec{X}_A$, $\vec{Y}_A$ и пару сил с моментом M_A, а также реакция шарнира C, разложенная на составляющие $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ (см. рис. 1.10, *a*). Действующие на раму силы составляют уравновешенную плоскую систему сил. Выберем систему координат xAy, как показано на рис. 1.10, *a*, и составим уравнения равновесия:

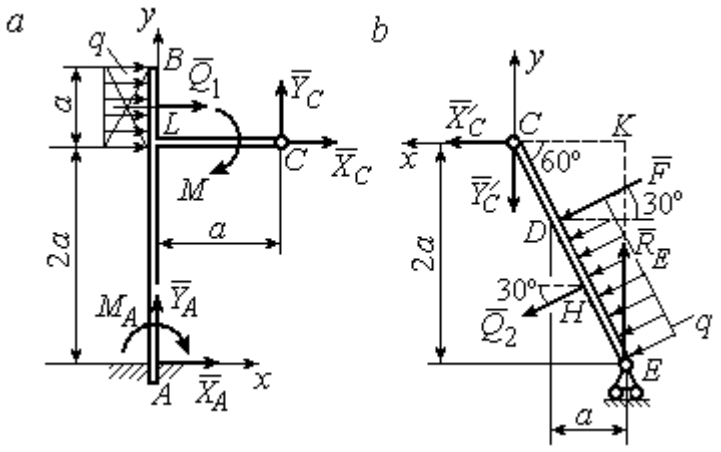


Рис. 1.10. Равновесие частей конструкции:
a - силы и реакции связей, действующие на балку $ABLC$;
b - силы и реакции связей, действующие на балку CE

$$\sum F_{kx} = X_A + Q_1 + X_C = 0, \quad \sum F_{ky} = Y_A + Y_C = 0,$$

$$\sum M_A(\vec{F}_k) = -M_A - Q_1 \cdot \left(2a + \frac{a}{2}\right) - M + Y_C a - X_C 2a = 0.$$

Рассмотрим равновесие балки *EC*. Заменим равномерную нагрузку эквивалентной силой $\vec{Q}_2$, приложенной в середине отрезка *ED*, направленной в сторону действия нагрузки и равной по модулю $Q_2 = q \cdot 2a = 8\,\text{кН}$. На балку кроме сил $\vec{Q}_2$, $\vec{F}$ действуют реакции связей: $\vec{R}_E$ – реакция шарнирно-подвижной опоры в точке *E* и $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ – составляющие реакции шарнира *C*. Силы $\vec{X}'_C$, $\vec{Y}'_C$ направлены противоположно силам $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$ и равны им по модулю $X_C = X'_C$, $Y_C = Y'_C$ (см. рис. 1.10, *a*, *b*). Действующие на балку *EC* силы образуют плоскую уравновешенную систему сил. Выберем систему координат *xCy,* как показано на рис. 1.10, *b,* и составим уравнения равновесия. При этом центром, относительно которого будем считать моменты сил, выберем точку *C*. Получим:

$$\sum F_{kx} = Q_2 \sin 60^\circ + F\cos 30^\circ + \vec{X}'_C = 0,\ \sum F_{ky} = R_E - Q_2 \cos 60^\circ - F\sin 30^\circ - Y'_C = 0,$$

$$\sum M_C\left(\vec{F}_k\right) = -F \cdot CD - Q_2 \cdot CH + R_E \cdot CK = 0.$$

Здесь плечи сил: $CD = \dfrac{2a}{\cos 30^\circ} - 2a$, $CH = \dfrac{2a}{\cos 30^\circ} - a$, $CK = 2a\,\text{tg}30^\circ$. Заменяя в уравнениях величины X'_C на X_C, а Y'_C на Y_C и подставляя исходные данные, получим систему уравнений:

$$X_A + X_C + 4 = 0,\ Y_A + Y_C = 0,\ -M_A - 4X_C + 2Y_C - 25 = 0,$$

$$X_C + 15{,}59 = 0,\ -Y_C + R_E - 9 = 0,\ 2{,}31R_E - 27{,}14 = 0,$$

откуда найдём величины реакции жесткой заделки и реакции шарниров:

$$X_A = 11{,}59\ \text{кН},\ Y_A = -2{,}76\ \text{кН},\ M_A = 42{,}87\ \text{кН·м},$$

$$X_C = -15{,}59\ \text{кН},\ Y_C = 2{,}76\ \text{кН},\ R_E = 11{,}76\ \text{кН}.$$

Модули реакций жесткой заделки *A* и шарнира *C*:

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2} = 11{,}91\ \text{кН},\ R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2} = 15{,}83\ \text{кН}.$$

1.5. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил

В заданиях рассматривается равновесие однородной плиты или вала (прямого или с «ломаной» осью) с насаженным на него шкивом.

Вал закреплен подпятником и подшипником и удерживается в равновесии. На вал действуют сила $\vec{F}$, пара сил с моментом M и сила $\vec{P}$. На шкив вала намотана нить, к свободному концу которой, перекинутому через невесомый блок, подвешен груз весом Q. Для вала определить реакции подшипника и подпятника и величину уравновешивающей силы Q (или момента M).

Плита весом P закреплена пространственным шарниром, подшипником и удерживается в заданном положении невесомым стержнем. На плиту действуют силы $\vec{F}$, $\vec{Q}$ и пара сил с моментом M. Для плиты найти реакции сферического и цилиндрического шарниров и реакцию стержня.

Варианты задания даны на рис. 1.11 – 1.13. Исходные данные для выполнения задания приведены в табл. 1.2.

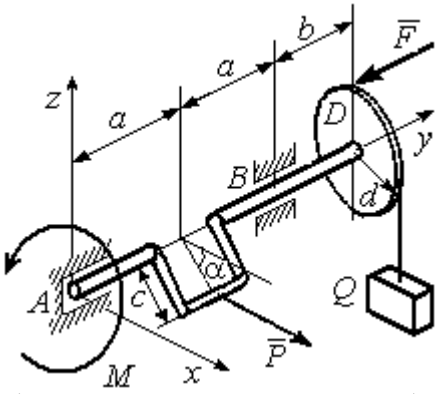
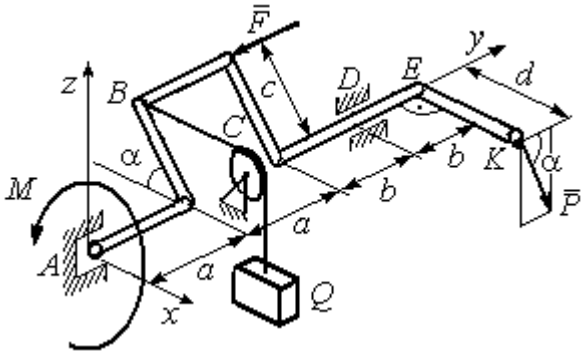
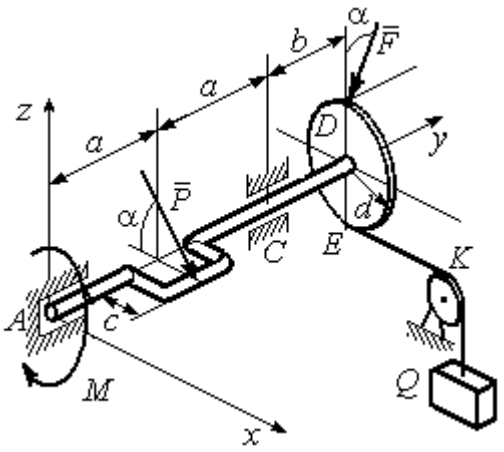
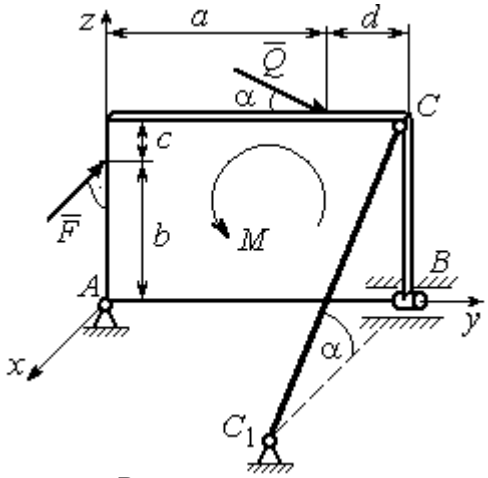
Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**
	
Сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; сила $\vec{P}$ параллельна оси Ax; нить, удерживающая груз, сходит со шкива вертикально. Найти реакции подпятника и подшипника в точках A и B и величину уравновешивающего груза Q	Сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; сила $\vec{P}$ лежит в плоскости, параллельной zAy; отрезок нити BC параллелен оси Ax; рукоять вала EK параллельна оси Ax. Найти реакции подпятника и подшипника в точках A и D и величину уравновешивающего момента M

Рис. 1.11. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 1 – 2, 11 – 12, 21 – 22

Варианты № 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
	
Сила $\vec{F}$, лежит в плоскости zAy; сила $\vec{P}$ лежит в плоскости, параллельной zAx, отрезок нити EK параллелен оси Ax. Найти реакции подпятника и подшипника в точках A и C, а также величину уравновешивающего груза Q	Плита весом P расположена в плоскости zAy; пара сил с моментом M действует в плоскости плиты; стержень CC_1 расположен в плоскости, параллельной zAx; сила $\vec{Q}$ действует в плоскости плиты; сила $\vec{F}$ перпендикулярна плоскости плиты. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1

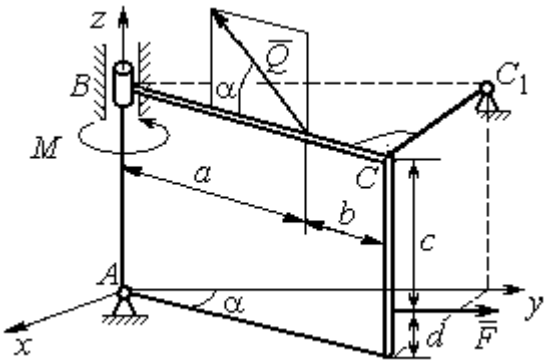
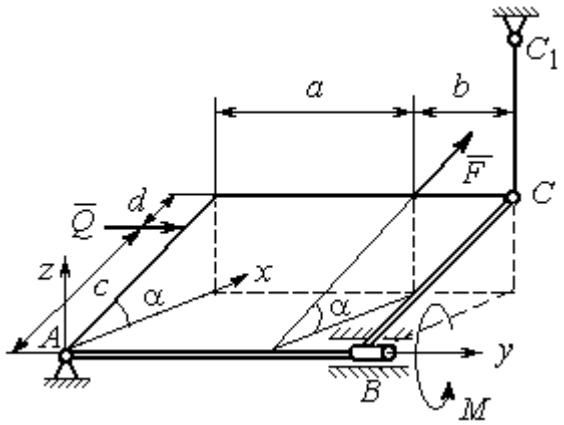
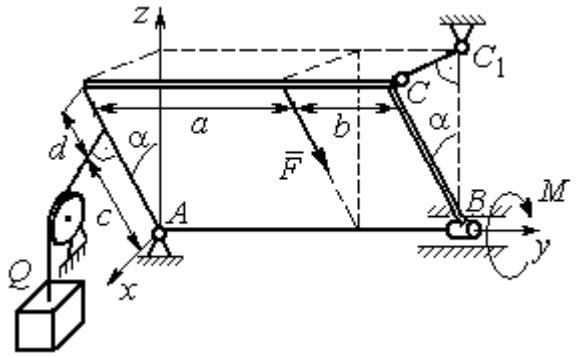
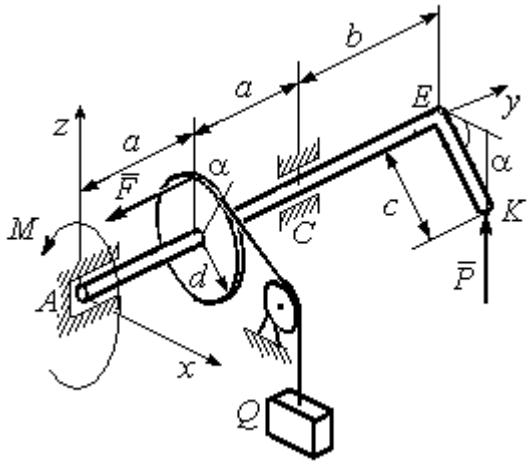
Варианты № 5, 15, 25	**Варианты № 6, 16, 26**
	
Плита весом P отклонена на угол α от вертикальной плоскости zAy; сила $\vec{Q}$ лежит в плоскости плиты; сила $\vec{F}$ параллельна оси Ay; стержень CC_1 перпендикулярен плоскости плиты. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1	Плита весом P отклонена на угол α от горизонтальной плоскости xAy; сила $\vec{Q}$ перпендикулярна боковой стенке плиты и параллельна оси Ay; сила $\vec{F}$ расположена в плоскости плиты и параллельна её боковым стенкам; стержень CC_1 параллелен оси Az. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках A и B и реакцию стержня CC_1

Рис. 1.12. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 3 – 6, 13 – 16, 23 – 26

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
	
Плита весом *P* отклонена на угол α от вертикальной плоскости *zAy*; нить, удерживающая груз *Q*, находится плоскости *zAx*, прикреплена к боковой стенке плиты и перпендикулярна ей; сила $\vec{F}$ параллельна боковым стенкам плиты; стержень CC_1 перпендикулярен плоскости *zAy*. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках *A* и *B* и реакцию стержня CC_1	Рукоять *EK* перпендикулярна оси вала и наклонена под углом α к горизонтальной плоскости *xAy*; сила $\vec{P}$ параллельна оси *Az*; сила $\vec{F}$ параллельна оси A*y*; нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива по касательной. Найти реакции подпятника *A*, подшипника *C*, и величину уравновешивающего груза *Q*

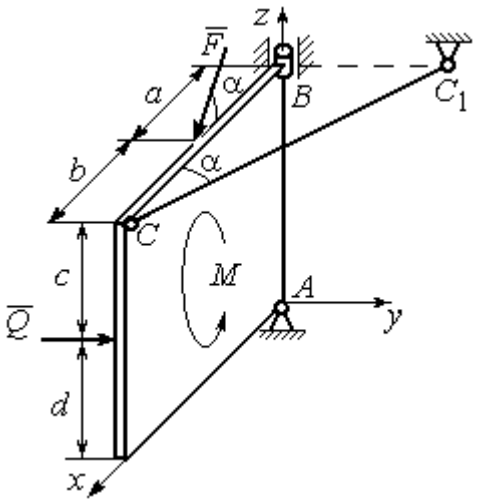
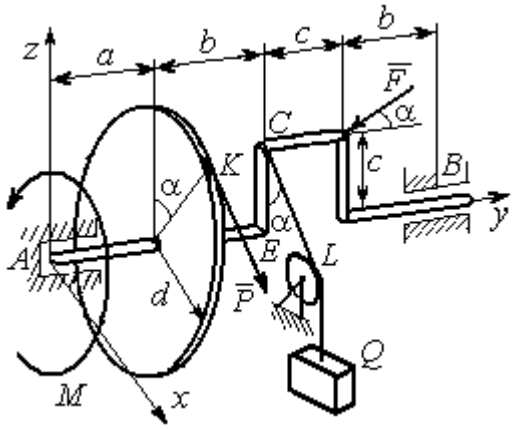
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	
Плита весом *P* находится в вертикальной плоскости *zAx*; стержень CC_1 расположен в плоскости, параллельной *xAy*; пара сил с моментом *M* действует в плоскости плиты; сила $\vec{Q}$ перпендикулярна плоскости плиты; сила $\vec{F}$ лежит в плоскости плиты. Найти реакции сферического и цилиндрического шарниров в точках *A* и *B* и реакцию стержня CC_1	Сила $\vec{F}$ находится в плоскости *zAy*; стойка *CE* находится в плоскости *zAy*; отрезок *CL* нити, удерживающей груз, находится в плоскости параллельной *xAz*; сила $\vec{P}$ находится в плоскости шкива и направлена по касательной к ободу в точке *K*. Найти реакции подпятника *A*, подшипника *B* и величину уравновешивающего момента *M*

Рис. 1.13. Задание С2. Равновесие пространственной системы сил.
Номера вариантов задания 7 – 10, 17 – 20, 27 – 30

Таблица 1.2

Исходные данные для задания С2.
Равновесие пространственной системы сил

Номер варианта задания	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
P, кН	5	4	6	10	16	15	12	10	15	14
F, кН	8	6	12	6	10	10	8	12	12	10
Q, кН	–	12	–	12	8	12	10	–	10	12
M, кН·м	12	–	10	8	12	6	8	6	8	–
α, град	60	30	30	30	60	60	60	30	30	60
a, м	1,2	0,8	1,4	0,6	1,2	0,9	1,4	0,4	0,8	0,8
b, м	1,0	0,6	1,1	0,4	0,8	0,4	0,6	1,2	0,2	0,6
c, м	0,8	0,5	0,8	0,3	1,4	0,8	1,2	0,8	0,4	0,4
d, м	0,4	0,4	0,6	0,2	0,4	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6

Номер варианта задания	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
P, кН	8	10	10	15	14	10	16	9	10	12
F, кН	6	12	16	8	12	14	10	15	8	10
Q, кН	–	14	–	10	10	12	14	–	12	14
M, кН·м	10	–	12	12	12	8	10	10	10	–
α, град	30	60	60	60	30	30	30	60	60	30
a, м	0,8	1,3	0,9	0,5	1,3	1,2	1,6	0,6	0,9	1,2
b, м	0,6	1,1	0,6	0,4	0,9	0,6	0,8	1,2	0,3	0,8
c, м	0,4	0,8	0,5	0,2	1,5	0,9	1,2	0,4	0,6	0,6
d, м	0,2	0,4	0,4	0,1	0,5	0,4	0,6	0,2	0,2	0,8

Номер варианта задания	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
P, кН	10	12	5	8	10	14	18	12	14	10
F, кН	12	8	15	10	12	8	10	15	9	8
Q, кН	–	10	–	12	14	10	16	–	12	6
M, кН·м	12	–	16	14	8	10	8	12	10	–
α, град	90	30	60	30	45	30	30	60	60	30
a, м	0,6	0,8	1,1	1,2	1,5	0,8	1,0	0,8	1,2	0,9
b, м	0,8	0,6	0,9	1,0	0,9	0,6	0,8	1,4	0,6	0,4
c, м	0,4	1,2	0,8	0,6	1,5	0,9	1,1	0,5	0,8	0,6
d, м	0,4	1,5	0,5	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5

Примеры решения задания С2. Равновесие пространственной системы сил

Задача 1. Горизонтальный вал (рис. 1.14) закреплен в подпятнике *C* и подшипнике *K*. Вал имеет шкив I радиуса *R* и шкив II радиуса *r*, перпендикулярные оси вала. Рукоять *AE* параллельна оси *Cx*. Нить, удерживающая груз *Q*, сходит со шкива I по касательной вертикально вниз. На вал действуют силы $\vec{F}$, $\vec{P}$ и пара сил с моментом *M*, закручивающая вал вокруг оси *Cy*. Сила $\vec{F}$ находится в плоскости, параллельной *zCy*, и составляет угол 60° с направлением оси *Cy*. Сила $\vec{P}$ приложена в точке *B* шкива II, определяемой центральным углом 30º, и направлена по касательной. Определить величину уравновешивающего момента *M* и реакции подшипника и подпятника, если $P = 4$ кН, $F = 2$ кН, $Q = 3$ кН, $R = 0{,}6$ м, $r = 0{,}3$ м, $a = 0{,}8$ м, $b = 0{,}4$ м.

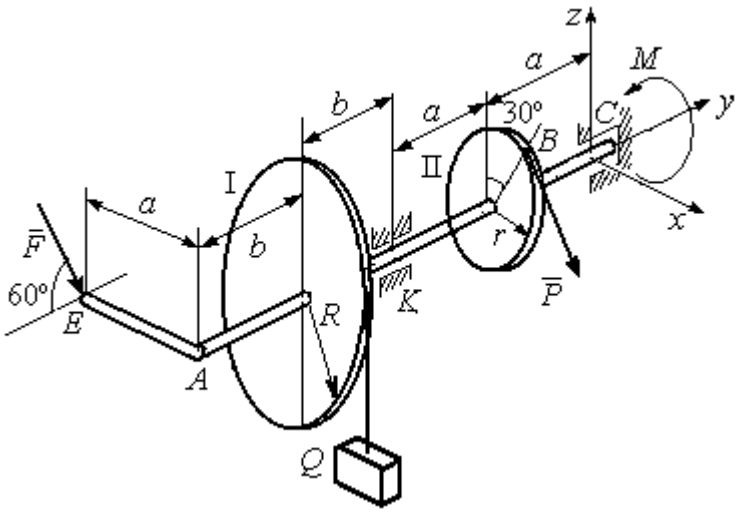


Рис. 1.14. Схема вала и его нагрузка

Решение

Рассмотрим равновесие вала. На вал действуют внешние силы $\vec{F}$, $\vec{P}$, пара сил с моментом *M* и реакции связей. Связями являются нить, натянутая грузом *Q*, подпятник *C* и подшипник *K*. Освобождаем вал от связей, заменяя их действие реакциями. Реакцию подпятника *C* раскладываем на три со-

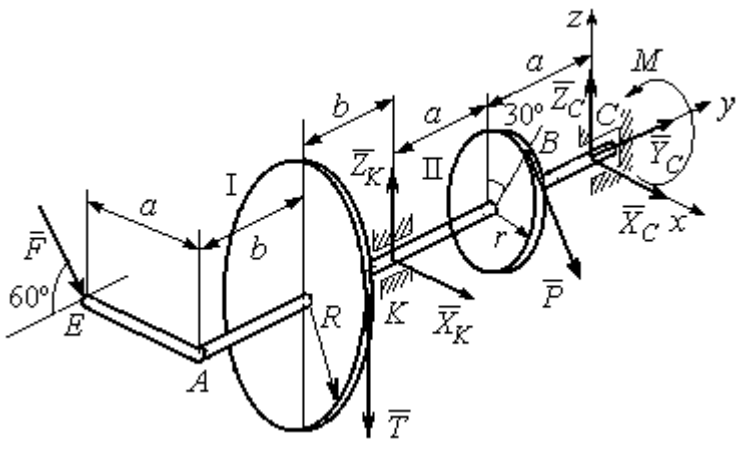


Рис. 1.15. Внешние силы и реакции связей вала

ставляющие: $\vec{X}_C$, $\vec{Y}_C$, $\vec{Z}_C$, направленные вдоль координатных осей. Реакция подшипника *K* лежит в плоскости, перпендикулярной оси вала, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_K, \vec{Z}_K$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция нити $\vec{T}$ направлена вдоль нити от точки *K* и по модулю равна весу груза. Действие на вал внешних сил и реакций связи показано на рис. 1.15.

Внешние силы, действующие на вал, и реакции связей составляют произвольную пространственную систему сил, эквивалентную нулю ($\vec{P}, \vec{F}, \vec{X}_K, \vec{Z}_K, \vec{T}, \vec{X}_C, \vec{Y}_C, \vec{Z}_C, M$) ∞ 0, для которой уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0\,,\ \sum F_{ky} = 0\,,\ \sum F_{kz} = 0\,,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0\,,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0\,,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0\,.$$

Для удобства при составлении уравнений равновесия изобразим вал вместе с действующими на него силами в проекциях на координатные плоскости (рис. 1.16)

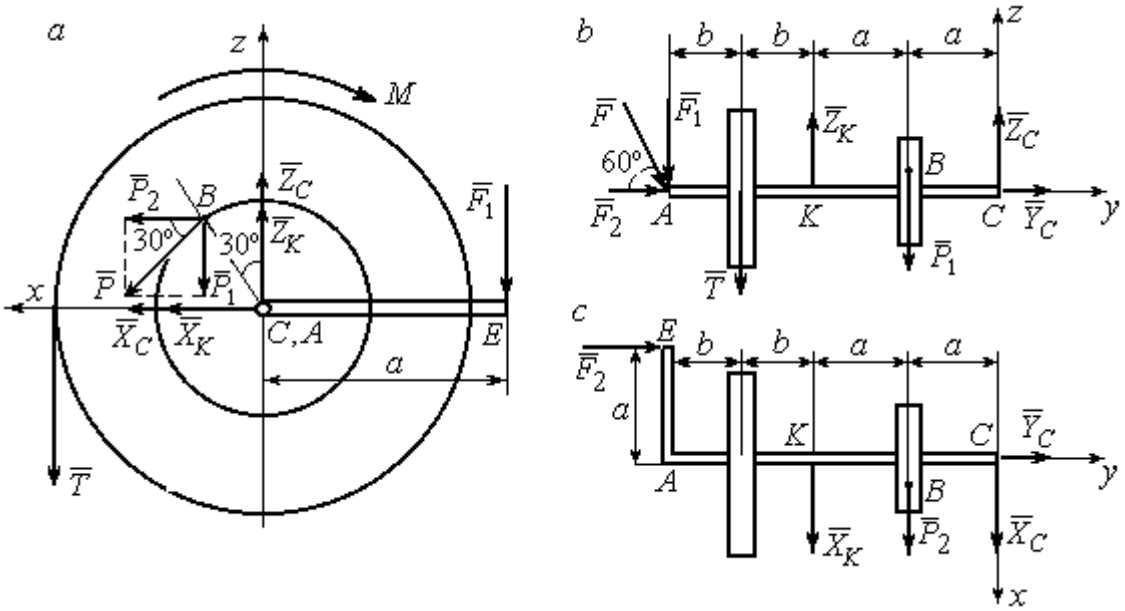


Рис. 1.16. Вал и действующие на него силы в проекциях на координатные плоскости:
a – вид вала в проекции на плоскость *zCx* с положительного конца оси *y*;
b – вид вала в проекции на плоскость *zCy* с положительного конца оси *x*;
c – вид вала в проекции на плоскость *xCy* с положительного конца оси *z*.

На рис. 1.16, *а* показаны проекции всех сил на плоскость *zCx*. Вычисляя моменты проекций этих сил относительно точки *C*, получим значения моментов исходных сил относительно оси *y*.

Для вычисления моментов сил относительно оси *x* достаточно найти моменты проекций сил на плоскость *zCy* относительно точки *C* (см. рис. 1.16, *b*), а вычисляя моменты проекций сил на плоскость *xCy* относительно точки *C*, получим значения моментов сил относительно оси z.

Составляем уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = P_2 + X_K + X_C = 0,\ \sum F_{ky} = F_2 + Y_C = 0,$$

$$\sum F_{kz} = -P_1 + Z_K - T + Z_C - F_1 = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = P_1 a - Z_K 2a - T(2a + b) + F_1(2a + 2b) = 0,$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = -F_1 a + TR + Pr - M = 0,$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = P_2 a + X_K 2a - F_2 a = 0.$$

Подставляя исходные данные задачи, с учётом того, что

$$P_1 = P\cos 60^\circ = 0{,}5P,\ P_2 = P\cos 30^\circ = 0{,}87P,$$

$$F_1 = F\cos 30^\circ = 0{,}87F,\ F_2 = F\cos 60^\circ = 0{,}5F$$ (см. рис. 1.16 *а*, *b*),

получим систему уравнений:

$$0{,}87 \cdot 4 + X_K + X_C = 0,\ \ 2 \cdot 0{,}5 + Y_C = 0,\ -4 \cdot 0{,}5 + Z_K - 3 + Z_C - 2 \cdot 0{,}87 = 0,$$

$$0{,}5 \cdot 4 \cdot 0{,}8 - 1{,}6Z_K - 3 \cdot 0{,}87(2 \cdot 0{,}8 + 0{,}4) + 2 \cdot 0{,}87(2 \cdot 0{,}8 + 2 \cdot 0{,}4) = 0,$$

$$-0{,}87 \cdot 0{,}8 + 3 \cdot 0{,}6 + 4 \cdot 0{,}3 - M = 0,\ 0{,}87 \cdot 4 \cdot 0{,}8 + 1{,}6 \cdot X_K - 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 0.$$

Решая систему, найдём: $X_C = -2{,}24$ кН, $Y_C = -1$ кН, $Z_C = 6{,}39$ кН, $X_K = -1{,}24$ кН, $Z_K = 0{,}35$ кН, $M = 2{,}3$ кН·м.

Окончательно, реакция подпятника $R_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2} = 6{,}84$ кН,

реакция подшипника $R_K = \sqrt{X_K^2 + Z_K^2} = 1{,}29$ кН.

Задача 2. Плита весом *P* расположена в вертикальной плоскости *zAy*. В точке А плита закреплена пространственным шарниром, а в точке *B* на оси *y* опирается на цилиндрический шарнир (подшипник). Плита удерживается в равновесии при помощи невесомого стержня CC_1, прикреплённого шарниром к плите в её верхнем углу, в точке *C* перпендикулярно плоскости плиты (рис. 1.17).

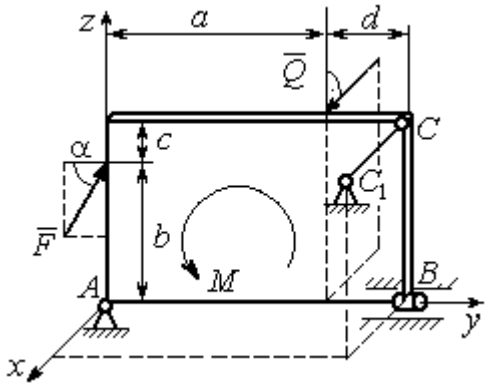


Рис. 1.17. Равновесие плиты

На плиту действует сила $\vec{Q}$, приложенная на краю плиты перпендикулярно её плоскости, и сила $\vec{F}$, лежащая в плоскости плиты и направленная под углом α к горизонту (см. рис. 1.17). Кроме того, в плоскости плиты на неё действует пара сил с моментом *M*. Найти реакции шарниров *A* и *B* и усилие в стержневой подпорке CC_1 при равновесии плиты, если параметры нагрузки: *P* = 1 кН, *Q* = 500 Н, *F* = 400 Н, *M* = 300 Н·м, $\alpha = 35^\circ$, *a* = 2 м, *b* = 1,5 м, *c* = 0,2 м, *d* = 0,4 м.

Решение

Заменим связи плиты их реакциями. Реакция шарнира *A* раскладывается на три составляющие: $\vec{X}_A$ $\vec{Y}_A$, $\vec{Z}_A$ по направлениям координатных осей. Направления координатных осей показаны на рис. 1.17. Реакция подшипника *B* лежит в плоскости, перпендикулярной оси подшипника, и ее составляющими будут вектора $\vec{X}_B, \vec{Z}_B$, направленные вдоль координатных осей *x*, *z*. Реакция стержня $\vec{T}$ направлена вдоль стержня. Действие сил и реакций показано на рис.1.18.

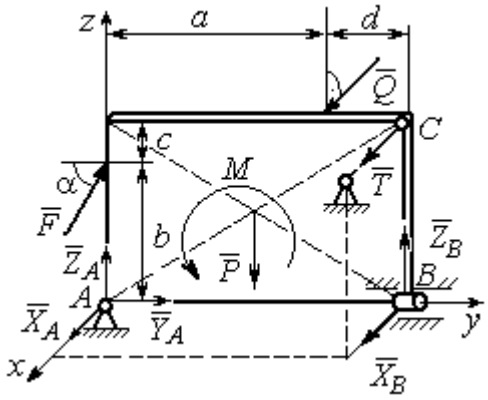


Рис. 1.18. Действие сил и реакций при равновесии плиты

Пространственная система сил, действующих на плиту, является уравновешенной: $(\vec{P}, \vec{F}, \vec{X}_B, \vec{Z}_B, \vec{T}, \vec{X}_A, \vec{Y}_A, \vec{Z}_A, M) \infty 0$. Уравнения равновесия:

$$\sum F_{kx} = 0,\ \sum F_{ky} = 0,\ \sum F_{kz} = 0,$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ \sum M_z(\vec{F}_k) = 0.$$

В вычислениях моментов сил относительно осей будем считать момент положительным, если при взгляде со стороны положительного направления оси, сила вращает тело (плиту) против хода часовой стрелки. Получим:

$$\sum F_{kx} = 0,\ X_A + Q + X_B + T = 0,$$

$$\sum F_{ky} = 0,\ Y_A + F\cos\alpha = 0,$$

$$\sum F_{kz} = 0,\ Z_A + F\sin\alpha - P + Z_B = 0$$

$$\sum M_x(\vec{F}_k) = 0,\ -F\cos\alpha \cdot b - P \cdot 0{,}5(a+d) + Z_B(a+d) + M = 0,$$

$$\sum M_y(\vec{F}_k) = 0,\ Q \cdot (b+c) + T \cdot (b+c) = 0,$$

$$\sum M_z(\vec{F}_k) = 0,\ -Q \cdot a - T \cdot (a+d) - X_B \cdot (a+d) = 0.$$

Подставив исходные данные задачи, получим систему уравнений:

$$X_A + 500 + X_B + T = 0,\ Y_A + 400 \cdot 0{,}82 = 0,\ Z_A + 400 \cdot 0{,}57 - 1000 + Z_B = 0,$$

$$-400 \cdot 0{,}82 \cdot 1{,}5 - 1000 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}4 + Z_B \cdot 2{,}4 + 300 = 0,$$

$$500 \cdot 1{,}7 + T \cdot 1{,}7 = 0,\quad -500 \cdot 2 - T \cdot 2{,}4 - X_B \cdot 2{,}4 = 0,$$

откуда находим значения составляющих реакций:

$$T = -500\ \text{Н},\ X_B = 83{,}33\ \text{Н},\ Z_B = 580\ \text{Н},$$

$$X_A = -83{,}33\ \text{Н},\ Y_A = -328\ \text{Н},\ Z_A = 192\ \text{Н}.$$

Полные реакции пространственного шарнира *A*:

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2} = 389{,}09\ \text{Н},$$

цилиндрического шарнира *B*: $R_B = \sqrt{X_B^2 + Z_B^2} = 585{,}95\ \text{Н}$.

2. КИНЕМАТИКА ТОЧКИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

Кинематикой называется раздел механики, в котором изучаются свойства движения материальных тел без учета их масс и действующих на них сил.

2.1. Кинематика точки. Основные параметры движения точки

Кривая, которую описывает движущаяся точка, называется **траекторией** точки. Движение точки может быть задано **векторным**, **координатным** или **естественным** способами.

Векторный способ основан на определении положения точки ее радиусом-вектором в виде векторного уравнения $\vec{r} = \vec{r}(t)$. При **координатном способе** задания движения точки положение точки определяется ее координатами, заданными для каждого момента времени: $x = x(t)$, $y = y(t)$, $z = z(t)$. **Естественный способ** задания движения используется, если заранее известна траектория движения точки. Тогда положение точки однозначно определяется длиной дуги $\breve{OM} = S(t)$, отсчитываемой от некоторой фиксированной точки *O*, принятой за начало отсчета.

Мгновенная скорость, или скорость точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от радиуса-вектора точки: $\vec{V} = \dot{\vec{r}}$. Вектор скорости точки $\vec{V}$ всегда направлен по касательной к траектории в сторону движения точки.

При координатном способе задания движения величины проекций вектора скорости $\vec{V}$ на координатные оси определяются как производные по времени от соответствующих координат: $V_x = \dot{x}$, $V_y = \dot{y}$, $V_z = \dot{z}$. Модуль вектора скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$. При естественном способе задания движения вектор скорости точки определяется равенством: $\vec{V} = \dot{S}\vec{\tau}$, где $S = S(t)$ – закон измене-

ния длины дуги, $\vec{\tau}$ –единичный вектор касательной к траектории движения, направленный в сторону возрастающих расстояний.

Величина $V = |\dot{S}|$ называется алгебраической скоростью точки. При $\dot{S} > 0$ вектор скорости $\vec{V}$ направлен по единичному вектору $\vec{\tau}$ – в сторону возрастающих расстояний. При $\dot{S} < 0$ он имеет направление, противоположное единичному вектору $\vec{\tau}$, т. е. в сторону убывающих расстояний.

Мгновенное ускорение, или ускорение точки в данный момент времени, является векторной величиной и определяется как производная по времени от вектора скорости точки или как вторая производная от радиус-вектора точки: $\vec{a} = \dot{\vec{V}} = \ddot{\vec{r}}$. При координатном способе проекции вектора ускорения $\vec{a}$ на координатные оси – величины a_x, a_y, a_z – определяются равенствами: $a_x = \dot{V}_x = \ddot{x}$, $a_y = \dot{V}_y = \ddot{y}$, $a_z = \dot{V}_z = \ddot{z}$. Модуль вектора ускорения равен: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

При естественном способе задания движения вектор ускорения точки $\vec{a}$ раскладывается на две взаимно перпендикулярные составляющие $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$, параллельные осям n и τ естественной системы координат, и представляется в виде равенства $\vec{a} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n}$, или $\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$, где $\vec{\tau}$ – единичный направляющий вектор оси, касательной к траектории (касательная ось); $\vec{n}$ – единичный направляющий вектор главной нормали траектории. Величина a_n называется **нормальным ускорением** точки и вычисляется по формуле: $a_n = \dfrac{V^2}{\rho}$, где ρ – радиус кривизны траектории. (У окружности радиус кривизны равен её радиусу, у прямой линии – бесконечности.) Вектор $\vec{a}_n$ нормальной составляющей ускорения всегда направлен к центру кривизны траектории. При движении по окружности радиус кривизны траектории равен радиусу окружности, а центр кривизны траектории совпадает с центром окружности. Величина a_τ называется **касательным ускорением** и равна модулю второй производной от заданно-

го закона изменения длины дуги: $a_\tau = |\ddot{S}|$, где $S = S(t)$ – закон изменения длины дуги. Направление вектора касательного ускорения $\vec{a}_\tau$ зависит от знака второй производной $\ddot{S}$. При $\ddot{S} > 0$ вектор $\vec{a}_\tau$ в направлен в сторону возрастающих расстояний, по направлению единичного вектора $\vec{\tau}$, при $\ddot{S} < 0$ – в сторону убывающих расстояний (противоположно единичному вектору $\vec{\tau}$). Вектор полного ускорения $\vec{a}$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$. Модуль вектора ускорения: $a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}$.

2.2. Вращение тела вокруг неподвижной оси

Движение тела, при котором все точки некоторой его прямой остаются неподвижными, называется **вращательным**, а указанная прямая называется осью вращения. Вращение тела задается углом поворота $\varphi = \varphi(t)$ подвижной плоскости, связанной с телом, относительно некоторого ее начального положения. Направление вращения с возрастанием угла поворота считается положительным.

Величина **угловой скорости** вращения тела равна модулю производной от угла поворота тела по времени: $\omega = |\dot{\varphi}|$. Направление угловой скорости вращения тела зависит от знака производной $\dot{\varphi}$. При $\dot{\varphi} > 0$ вращение происходит в положительном направлении, в сторону возрастания угла поворота, при $\dot{\varphi} < 0$ – в отрицательном. Направление угловой скорости обычно показывают дуговой стрелкой вокруг оси вращения. Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси вращения в сторону, откуда вращение тела видно против хода часовой стрелки.

Величина **углового ускорения** при вращении тела равна модулю второй производной от угла поворота тела по времени: $\varepsilon = |\ddot{\varphi}|$. Если $\ddot{\varphi}$ одного знака с

φ, то угловое ускорение ускоряет вращение тела, если разных знаков, то угловое ускорение замедляет вращение.

При вращательном движении тела все его точки движутся по окружностям, радиусы которых равны расстояниям от выбранной точки до неподвижной оси. **Скорость точки вращающегося твердого тела (**в отличие от угловой скорости тела) называют **линейной,** или **окружной скоростью** точки. Величина скорости рассчитывается по формуле: $V = \omega h$, где ω – величина угловой скорости тела; h – расстояние от точки до оси вращения. Вектор скорости точки лежит в плоскости описываемой точкой окружности и направлен по касательной к ней в сторону вращения тела. Отношение скоростей двух точек вращающегося тела равно отношению расстояний от этих точек до оси: $\frac{V_{M1}}{V_{M2}} = \frac{h_1}{h_2}$.

Ускорение точки вращающегося твердого тела рассчитывается как ускорение точки при естественном способе задания движения в виде суммы векторов касательного и нормального ускорений: $\vec{a}_M = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$. Величины касательного, нормального и полного ускорений точки вращающегося тела, соответственно: $a_\tau = \varepsilon h$, $a_n = \omega^2 h$, $a_M = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$, где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела; h – расстояние от точки до оси вращения.

2.3. Плоскопараллельное движение твёрдого тела

Плоскопараллельным, или плоским движением твердого тела, называется такое движение, при котором все точки тела движутся параллельно некоторой неподвижной плоскости. Плоское движение представляется в виде суммы мгновенного поступательного движения, при котором все точки плоской фигуры движутся со скоростью выбранной точки-полюса, и мгновенного вращательного движения вокруг этого полюса.

Скорость любой точки M плоской фигуры равна векторной сумме вектора скорости точки-полюса и вектора скорости точки M при вращении тела вокруг этого полюса: $\vec{V}_M = \vec{V}_A + \vec{V}_{MA}$, где $\vec{V}_M$ – скорость точки M; $\vec{V}_A$ – скорость полюса A; $\vec{V}_{MA}$ – вектор скорости точки M при вращении тела вокруг полюса A, модуль скорости $V_{MA} = \omega \cdot MA$, где ω – угловая скорость мгновенного вращательного движения тела вокруг полюса; MA – расстояние между полюсом A и точкой M.

Мгновенным центром скоростей называется такая точка P плоской фигуры, скорость которой в данный момент времени равна нулю. Выбрав в качестве полюса мгновенный центр скоростей, скорость любой точки плоской фигуры находят так, как если бы мгновенное движение фигуры было вращательным вокруг мгновенного центра скоростей.

Способы построения мгновенного центра скоростей

1. Если известны направления скоростей $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ каких-нибудь двух точек A и B плоской фигуры, то мгновенный центр скоростей находится в точке пересечения перпендикуляров, восстановленных из этих точек к векторам скоростей (рис. 2.1, *a*).

2. Если скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ двух точек A и B плоской фигуры известны и параллельны друг другу, а линия AB перпендикулярна $\vec{V}_A$ (и, конечно, $\vec{V}_B$), то мгновенный центр скоростей определяется как точка пересечения линий, проведенных через основания и вершины векторов скоростей (построение показано на рис. 2.1, *b*, *c*).

3. Если скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ двух точек A и B параллельны друг другу, но линия AB, соединяющая эти точки, не перпендикулярна векторам скоростей (рис. 2.1, *d*), то мгновенная угловая скорость тела равна нулю и движение тела

в данный момент времени является мгновенным поступательным. В этом случае скорости всех точек равны по величине и направлению.

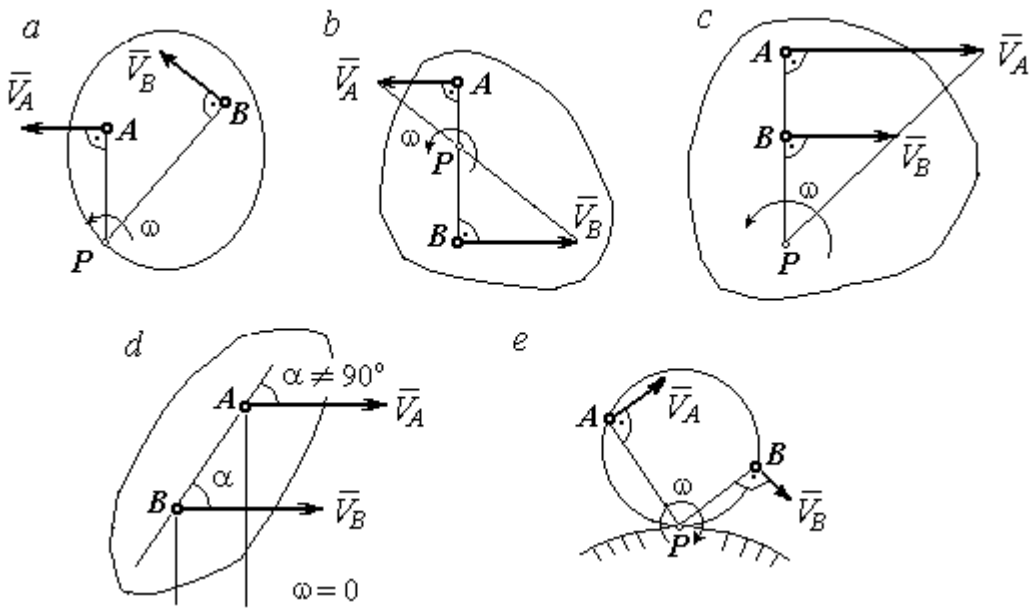


Рис. 2.1. Способы построения мгновенного центра скоростей

4. Если плоскопараллельное движение осуществляется путем качения без скольжения одного тела по неподвижной поверхности другого, то мгновенный центр скоростей расположен в точке касания катящегося тела с неподвижной поверхностью (рис. 2.1, *e*).

Ускорение любой точки *M* плоской фигуры при плоскопараллельном движении твердого тела представляется как сумма векторов – ускорения полюса и ускорения точки *M* при вращении фигуры вокруг полюса. Учитывая, что ускорение точки вращающегося тела представляется как сумма нормального и касательного ускорений, получим:

$$\vec{a}_M = \vec{a}_A + \vec{a}^{\tau}_{MA} + \vec{a}^{n}_{MA},$$

где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса A; $\vec{a}^{\tau}_{MA}$, $\vec{a}^{n}_{MA}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки M при вращении фигуры вокруг полюса A.

Вектор нормального ускорения $\vec{a}^{\,n}_{MA}$ всегда направлен от точки M к полюсу A. Вектор касательного ускорения $\vec{a}^{\,\tau}_{MA}$ направлен перпендикулярно отрезку AM в сторону вращения, если оно ускоренное (рис. 2.2, *a*), и против вращения, если оно замедленное (рис. 2.2, *b*). Численно величины касательного и нормального составляющих ускорения точки M определяются по формулам:

$$a^{\tau}_{MA} = \varepsilon \cdot AM\,,\quad a^{n}_{MA} = \omega^2 \cdot AM\,,$$

где ω, ε – угловая скорость и угловое ускорение тела (плоской фигуры); AM – расстояние от точки M до полюса A (см. рис. 2.2).

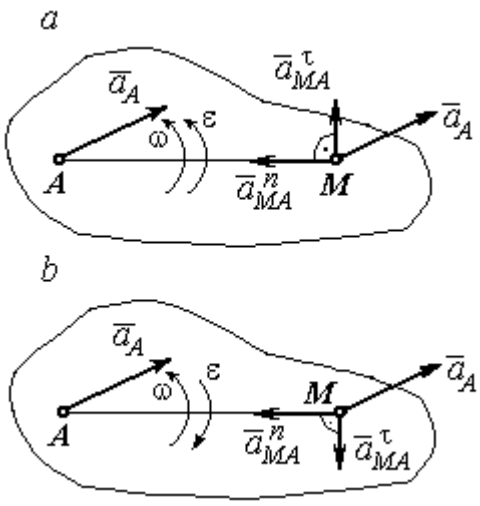


Рис. 2.2. Ускорение точки плоской фигуры:
a – ускоренное движение;
b – замедленное движение

Если при движении плоской фигуры известны траектории движения полюса A и точки M, то для определения ускорения точки M используется векторное равенство

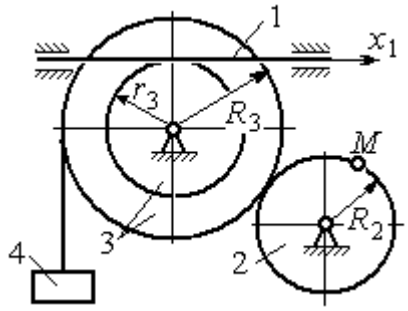
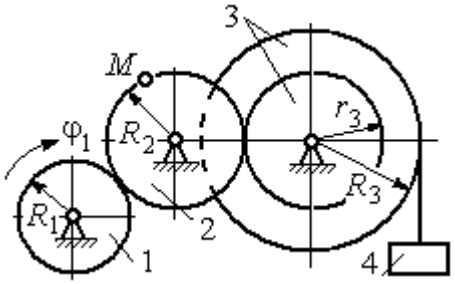
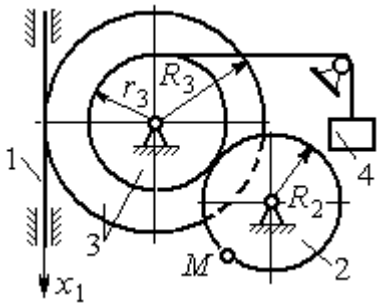
$$\vec{a}^{\,\tau}_{M} + \vec{a}^{\,n}_{M} = \vec{a}^{\,\tau}_{A} + \vec{a}^{\,n}_{A} + \vec{a}^{\,\tau}_{MA} + \vec{a}^{\,n}_{MA},$$

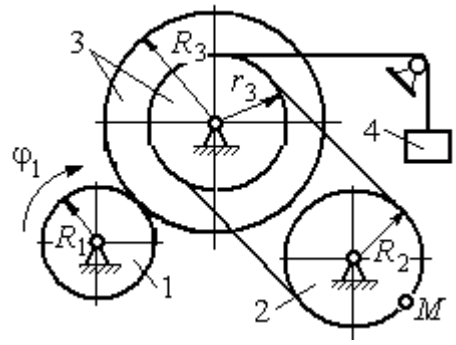
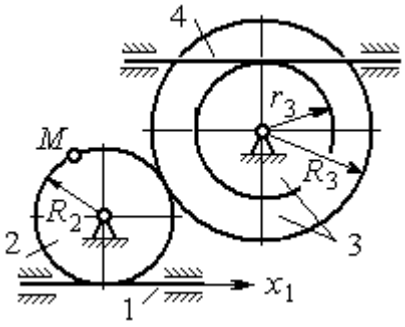
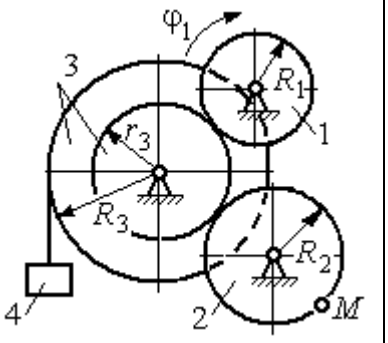
где $\vec{a}^{\,\tau}_{M}$, $\vec{a}^{\,n}_{M}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{A}$, $\vec{a}^{\,n}_{A}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки M и полюса A при движении их по заданным траекториям.

2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек твердого тела при поступательном и вращательном движениях

По заданному движению одного из звеньев механизма $x_1 = x_1(t)$ (варианты 1, 3, 5, 7, 9) или $\varphi_1 = \varphi_1(t)$ (варианты 2, 4, 6, 8, 10) найти в момент времени t_1 скорость, касательное, нормальное и полное ускорения точки M звена механизма, совершающего вращательное движение, а также скорость и ускорение звена 4, совершающего поступательное движение.

Варианты заданий даны на рис. 2.3, 2.4. Исходные данные представлены в табл. 2.1.

Варианты № 1, 11, 21	Варианты № 2, 12, 22	Варианты № 3, 13, 23
		

Варианты № 4, 14, 24	Варианты № 5, 15, 25	Варианты № 6, 16, 26
		

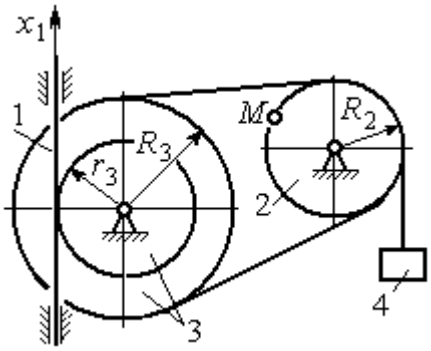
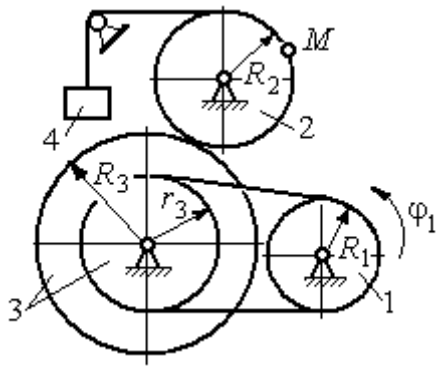
Варианты № 7, 17, 27	Варианты № 8, 18, 28
	

Рис. 2.3. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела. Номера вариантов задания 1 – 8, 11 – 18, 21 – 28

Окончание вариантов задания К1

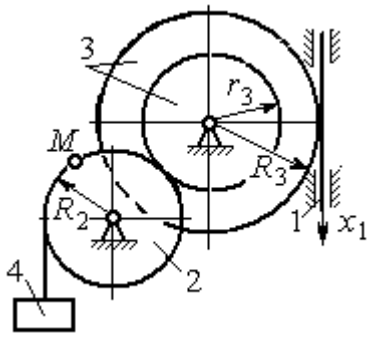
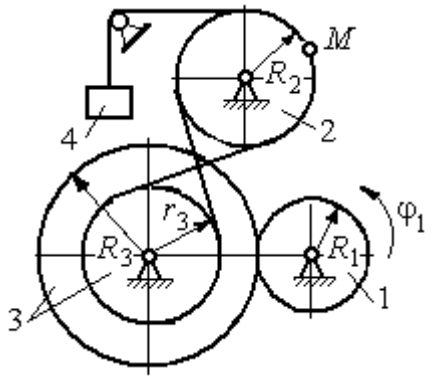
Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
	

Рис. 2.4. Задание К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Таблица 2.1

Исходные данные вариантов задания К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела

Номер варианта задания	R_1,см	R_2, см	R_3, см	r_3, см	$x_1(t)$, см $\varphi_1(t)$, рад	t_1, с
1	–	40	45	35	$x_1(t) = (3t-1)^2$	2
2	10	20	38	18	$\varphi_1(t) = t^2 + 6\cos(\pi t/6)$	3
3	–	30	42	18	$x_1(t) = 5t^2 - 2\cos(\pi t/2)$	1
4	15	30	45	20	$\varphi_1(t) = 5t^2 + \cos(\pi t/2)$	2
5	–	30	40	20	$x_1(t) = 6t - \cos(\pi t/3)$	3
6	10	20	30	10	$\varphi_1(t) = t^3 - \cos(\pi t/2)$	1
7	–	30	40	30	$x_1(t) = 2\sin(\pi t/2) + \cos(\pi t/2)$	2
8	8	10	30	25	$\varphi_1(t) = 5t + \cos(\pi t/2)$	2
9	–	18	30	18	$x_1(t) = 5t + \cos(\pi t/3)$	3
10	15	30	50	20	$\varphi_1(t) = 2t^2 + \sin(\pi t/4)$	2
11	–	30	40	25	$x_1(t) = (t^2 - 3t)$	2
12	12	20	40	28	$\varphi_1(t) = 3t^2 + 6\sin(\pi t/6)$	3
13	–	25	60	42	$x_1(t) = 2t^2 + \cos(\pi t/2)$	1
14	10	30	45	30	$\varphi_1(t) = 3t^2 + 2\cos(\pi t/2)$	2

Окончание табл. 2.1

Номер варианта задания	R_1,см	R_2, см	R_3, см	r_3, см	$x_1(t)$, см $\varphi_1(t)$, рад	t_1, с
15	–	20	30	20	$x_1(t)=3t^2-\cos(\pi t/3)$	3
16	12	18	40	20	$\varphi_1(t)=2t^3+\cos(\pi t/2)$	1
17	–	20	35	15	$x_1(t)=2\sin(\pi t/2)-\cos(\pi t/2)$	2
18	15	18	40	25	$\varphi_1(t)=5t+\cos(\pi t/2)$	1
19	–	22	50	18	$x_1(t)=t^2+\cos(\pi t/3)$	3
20	10	20	45	10	$\varphi_1(t)=2t^2+\sin(\pi t/4)$	4
21	–	20	40	20	$x_1(t)=t+(3t-4)^2$	2
22	8	18	42	18	$\varphi_1(t)=2t^2+12\cos(\pi t/6)$	3
23	–	45	60	40	$x_1(t)=4t^2+\sin(\pi t/2)$	1
24	5	15	30	20	$\varphi_1(t)=2t^2+4\cos(\pi t/2)$	2
25	–	15	35	25	$x_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/3)$	3
26	18	20	35	20	$\varphi_1(t)=2t^3+\sin(\pi t/2)$	1
27	–	15	35	15	$x_1(t)=2\sin(\pi t/2)-\cos(\pi t/2)$	1
28	10	12	40	25	$\varphi_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/2)$	1
29	–	35	50	10	$x_1(t)=t^3-\cos(\pi t/2)$	1
30	10	20	40	10	$\varphi_1(t)=2t^2+\cos(\pi t/4)$	4

Пример выполнения задания К1. Определение скоростей и ускорений точек при поступательном и вращательном движениях твёрдого тела

По заданному уравнению движения звена 1 механизма (рис. 2.5, *а*) определить скорость, нормальное, касательное и полное ускорения точки *M* на момент времени t_1, а также скорость и ускорение звена 4, если значения радиусов колес механизма и закон движения звена 1: R_2= 20 см, r_2= 5 см, R_3= 8 см, r_3 = 4 см, $x_1 = 2t^2 - 5t$ см, t_1=1 с.

Решение

Отметим на схеме положительные направления отсчета углов поворота дисков 2 и 3, соответствующие заданному положительному направлению движения звена 1.

Направления показаны на рис 2.5, *b* дуговыми стрелками φ_2, φ_3, а положительное направление движения звена 4 – направлением оси x_4.

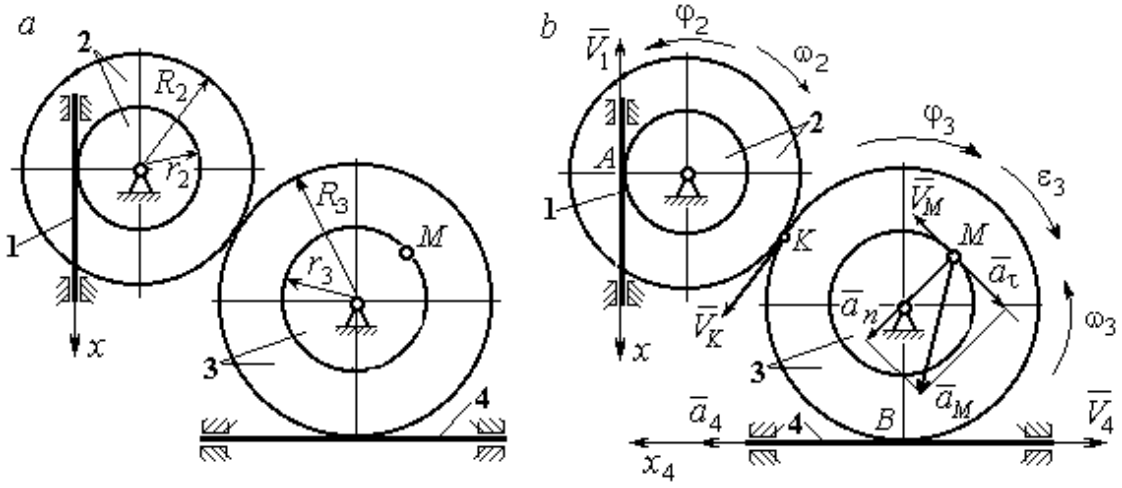


Рис. 2.5. Кинематика вращательного движения твердого тела:
a – схема механизма; *b* – расчетная схема для определения скоростей и ускорений точек механизма

Звено 1 движется поступательно. Движение задано координатным способом в виде закона изменения координаты x. Дифференцируем по времени уравнение движения: $\dot{x} = 4t - 5$ см/с. В момент времени $t_1 = 1$ с значение производной: $\dot{x}(1) = -1$ см/с. Отрицательное значение производной $\dot{x}$ показывает, что в данный момент времени звено 1 движется в отрицательном направлении оси *x*. Скорость звена 1 равна модулю производной: $V_1 = |\dot{x}|$. На рис. 2.5, *b* направление движения звена 1 в момент времени $t_1 = 1$ с показано вектором скорости $\vec{V}_1$, направленным в сторону, противоположную положительному направлению оси *x*. Эту же скорость будет иметь точка *A* – точка контакта звена 1 с диском 2, лежащая на расстоянии r_2 от оси вращения диска. Следовательно, $V_1 = V_A = \omega_2 r_2$, где ω_2 – угловая скорость диска 2. Отсюда угловая скорость диска: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{r_2} = \dfrac{|4t-5|}{5} = |\dot{\varphi}_2|$ рад/с. При $t_1 = 1$ с значение производной отрицательно: $\dot{\varphi}_2(1) = -0{,}2$ рад/с. Это означает, что в заданный момент времени вращение диска 2 с угловой скоростью $\omega_2(1) = |\dot{\varphi}_2(1)| = 0{,}2$ рад/с происходит

в отрицательном для диска 2 направлении. На рис. 2.5, *b* направление вращения диска 2 показано дуговой стрелкой ω_2 в сторону, противоположную положительному направлению отсчета угла φ_2. При передаче вращения диска 2 диску 3 величины угловых скоростей дисков обратно пропорциональны радиусам дисков, которым принадлежит точка контакта: $\frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{R_3}{R_2}$. Тогда, угловая скорость диска 3 $\omega_3 = \omega_2 \frac{R_2}{R_3} = |2t - 2{,}5| = |\dot{\varphi}_3|$ рад/с.

В момент времени $t_1 = 1$с значение производной $\dot{\varphi}_3$ отрицательно: $\dot{\varphi}_3(1) = -0{,}5$ рад/с, и, следовательно, вращение диска 3 в данный момент времени с угловой скоростью $\omega_3(1) = |\dot{\varphi}_3(1)| = 0{,}5$ рад/с происходит в сторону, противоположную положительному направлению отсчета угла φ_3, как показано на рис. 2.5, *b*. Величина (модуль) скорости точки *M* рассчитывается по формуле: $V_M = \omega_3 r_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с модуль скорости $V_M(1) = 2$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_M$ расположен по касательной к траектории движения точки *M* (окружности) и направлен в сторону вращения диска 3 (см. рис. 2.5, *b*).

Звено 4 движется поступательно. Скорость звена 4 равна скорости точки касания его с диском 3: $V_4 = V_B = \omega_3 R_3 = |2t - 2{,}5| \cdot 8 = |\dot{x}_4|$. В момент времени $t_1 = 1$ с значение производной от координаты движения звена 4 отрицательно: $\dot{x}_4(1) = -4$ см/с. В результате, вектор скорости $\vec{V}_4(1)$, равный по модулю $V_4(1) = 4$ см/с, направлен вдоль оси x_4 в сторону, противоположную ее положительному направлению (см. рис. 2.5, *b*).

Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3(t) = |\dot{\omega}_3| = |\ddot{\varphi}_3| = 2$ рад/с^2. Из того, что угловая скорость ω_3 и угловое ускорение $\dot{\omega}_3$ диска 3 имеют разные знаки, следует, что вращение диска 3 замедленное. Угловое ускорение диска направлено в сторону положительного направления отсчета угла поворота φ_3, диска 3 (см. рис. 2.5, *b*).

Касательное ускорение a_τ точки M рассчитывается по формуле $a_\tau = \varepsilon_3 r_3$ и в момент времени $t_1 = 1$ с: $a_\tau = 8$ см/с^2. Так как вращение диска 3 замедленное, вектор касательного ускорения точки M $\vec{a}_\tau(t)$ направлен в сторону, противоположную вектору скорости $\vec{V}_M(1)$ (см. рис. 2.5, *b*). Нормальное ускорение a_n точки M рассчитывается как $a_n = \omega_3^2 r_3$. В момент времени $t_1 = 1$ с величина нормального ускорения: $a_n(1) = 1$ см/с^2. Вектор нормального ускорения $\vec{a}_n(1)$ направлен по радиусу к центру диска 3 (см. рис. 2.5, *b*). Полное ускорение точки M в заданный момент времени: $a_M(1) = \sqrt{a_\tau^2(1) + a_n^2(1)} = 8{,}06$ см/с^2. Вектор полного ускорения $\vec{a}_M$ направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_n$ и $\vec{a}_\tau$.

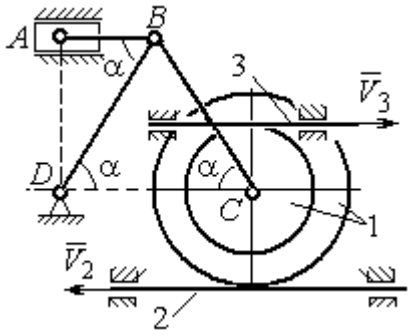
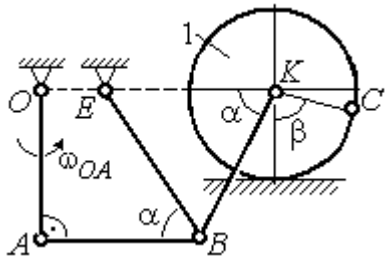
Ускорение a_4 звена 4 находится из условия, что звено 4 движется поступательно и прямолинейно. При прямолинейном движении нормальная составляющая ускорения равна нулю. Тогда $a_4 = a_{4\tau} = \dot{V}_4 = = \dot{V}_B = |\dot{\omega}_3| R_3 = \varepsilon_3 R_3$.

Так как угловое ускорение диска 3 является постоянной величиной, ускорение a_4 не зависит от времени: $a_4 = 16$ см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_4$ направлен вдоль оси x_4 в сторону положительных значений.

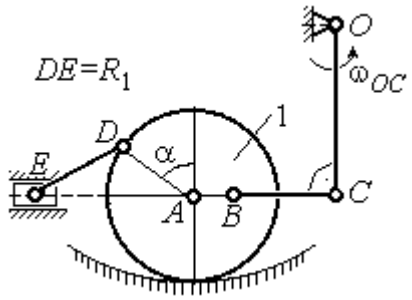
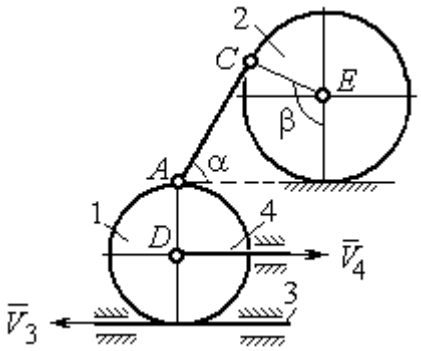
2.5. Задание К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Для заданного положения плоского механизма определить скорости точек и угловые скорости звеньев механизма.

Варианты заданий показаны на рис. 2.6 – 2.8. Исходные данные вариантов заданий выбираются из таблиц, приведённых на рисунках схем механизмов.

Варианты № 1, 11, 21	**Варианты № 2, 12, 22**
 Найти: $V_A, V_B, V_C, \omega_{AB}, \omega_{BC}, \omega_1, \omega_{BD}$	 Найти: V_A, V_B, V_K, $\omega_1, \omega_{AB}, \omega_{OA}$, ω_{BE}, ω_{BK}

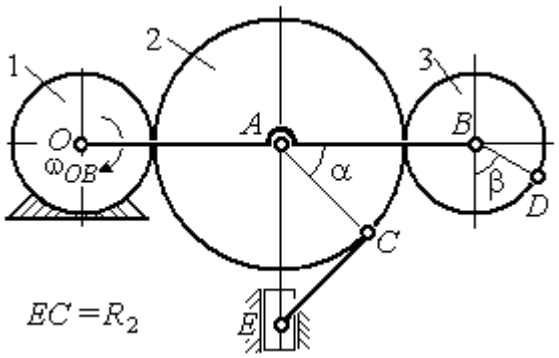
Номер варианта задания	R_1, см	r_1, см	AD, см	α, град	V_2, см/с	V_3, см/с	Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	OE, см	α, град	β, град	V_C, см/с
1	10	5	20	30	8	10	**2**	3	5	4	30	60	10
11	12	8	25	45	10	4	**12**	4	8	6	45	90	8
21	10	6	15	60	5	5	**22**	5	12	2	60	120	12

Варианты № 3, 13, 23	**Варианты № 4, 14, 24**
 Найти: V_A, V_B, V_C, V_D, V_E, $\omega_{BC}, \omega_1, \omega_{DE}$	 Найти: V_A, V_C, V_E, $\omega_1, \omega_2, \omega_{AC}$

Номер варианта задания	R_1, см	OC, см	AB, см	BC, см	α, град	ω_{OC}, рад/с	Номер варианта задания	R_1, см	R_2, см	α, град	β, град	V_3, см/с	V_4, см/с
3	12	18	10	35	60	4	**4**	10	15	30	60	8	4
13	10	15	10	25	90	8	**14**	6	10	45	90	4	6
23	15	20	5	20	120	6	**24**	10	12	60	120	3	3

Рис. 2.6. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

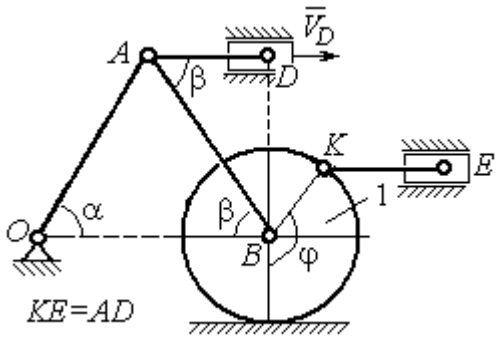
Варианты № 5, 15, 25



Найти: V_A, V_B, V_C, V_D, V_E, ω_2, ω_3, ω_{EC}

Номер варианта задания	R_1, см	R_2, см	R_3, см	α, град	β, град	ω_{OB}, рад/с
5	10	20	12	60	0	6
15	6	18	10	90	90	8
25	20	25	15	120	180	4

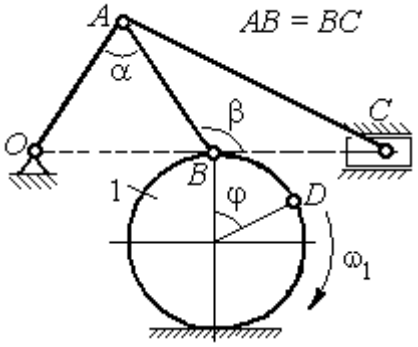
Варианты № 6, 16, 26



Найти: $V_A, V_B, V_K, V_E,$ ω_1, ω_{OA}, ω_{AB}, ω_{AD}, ω_{KE}

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	α, град	β, град	φ, град	V_D, см/с
6	10	20	30	60	60	12
16	12	26	30	30	90	8
26	15	30	60	60	120	15

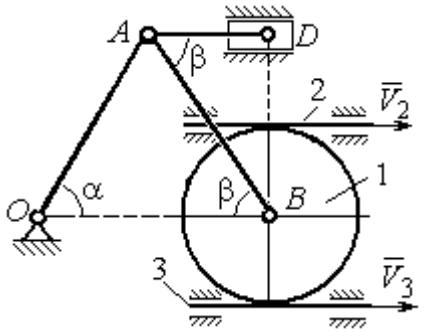
Варианты № 7, 17, 27



Найти: $V_A, V_B, V_C, \omega_1, \omega_{OA}, \omega_{AB}, \omega_{AC}$

Номер варианта задания	R_1, см	AB, см	α, град	β, град	φ, град	V_D, см/с
7	10	20	30	60	60	12
17	12	25	60	120	90	16
27	8	16	30	60	120	10

Варианты № 8, 18, 29

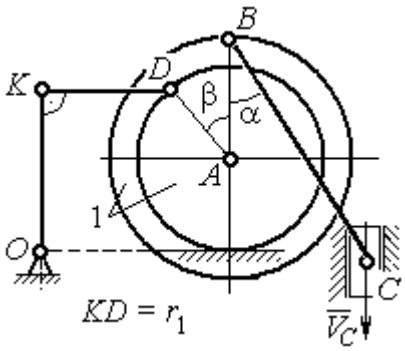
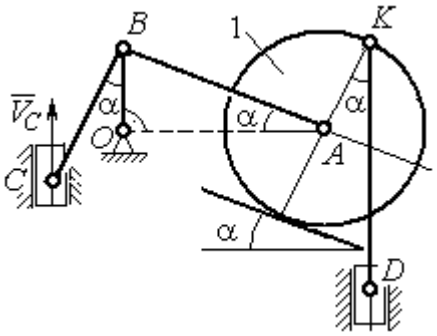


Найти: V_A, V_B, V_D, $\omega_1, \omega_{OA}, \omega_{AB}, \omega_{AD}$

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	α, град	β, град	V_2, см/с	V_3, см/с
8	10	20	30	60	12	4
18	12	26	30	30	8	2
28	15	30	60	60	6	3

Рис. 2.7. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 5 – 8, 15 – 18, 25 – 28

Окончание вариантов задания К2

Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
 Найти: $\omega_{OK}, \omega_{KD}, \omega_{BC}, \omega_1,$ V_A, V_B, V_K, V_D	 Найти: $V_A, V_B, V_D, V_K,$ $\omega_{CB}, \omega_1, \omega_{OB}, \omega_{AB}, \omega_{KD}$

Номер варианта задания	R_1, см	r_1, см	α, град	β, град	BC, см	V_C, см/с	Номер варианта задания	R_1, см	CB, см	OB, см	KD, см	α, град	V_C, см/с
9	20	12	45	60	60	8	**10**	10	20	30	60	30	4
19	24	16	60	90	50	4	**20**	12	26	30	50	45	2
29	16	10	30	120	40	6	**30**	15	30	60	60	60	3

Рис. 2.8. Задание К2. Определение скоростей точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Пример выполнения задания К2. Определение скоростей точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Задача 1. Плоский механизм (рис. 2.9) состоит из стержня OC и подвижных дисков 2 и 3 радиусами r_2, r_3, шарнирно закрепленными на стержне, соответственно, в точках A и C. Стержень OC вращается вокруг неподвижного центра O с угловой скоростью ω_{OC}. Диск 2, увлекаемый стержнем OC, катится без проскальзывания по неподвижной поверхности диска 1 радиусом r_1. Диск 3, также увлекаемый стержнем OC, катится без проскальзыва-

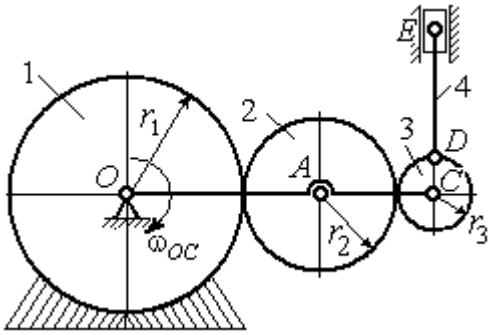


Рис. 2.9. Схема плоского механизма

ния по подвижному диску 2. В точке *D*, расположенной на краю диска 3, шарнирно прикреплен стержень 4, к которому в точке *E* шарнирно прикреплен поршень *E*, способный совершать только вертикальное перемещение. Для заданного положения механизма (см. рис. 2.9), когда стержень *OC* горизонтален, стержень *DE* направлен по линии вертикального диаметра диска 3, найти скорости точек *A*, *C*, *D*, *E*, угловые скорости дисков 2, 3 и стержня 4, если: r_1 = 6 см, r_2 = 4 см, r_3 = 2 см, *DE* = 10 см, ω_{OC} = 1 рад/с.

Решение

Определим скорость точки *A*, общей для стержня *OC* и диска 2: $V_A = \omega_{OC}(r_1 + r_2)$ = 10 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ перпендикулярен стержню *OC* и направлен в сторону его вращения (рис. 2.10).

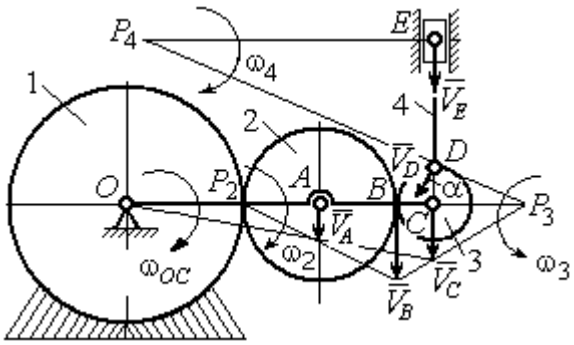


Рис. 2.10. Расчетная схема для определения скоростей точек механизма и угловых скоростей его звеньев

Диск 2 катится по неподвижной поверхности диска 1. Точка касания диска 2 с неподвижным диском 1 является мгновенным центром скоростей диска 2. На рис. 2.10 центр скоростей диска 2 обозначен точкой P_2. В этом случае скорость точки *A* может быть определена через угловую скорость диска ω_2 следующим образом: $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = 4\omega_2$. Так как V_A = 10 см/с, получим ω_2 = 2,5 рад/с.

Для того чтобы найти угловую скорость диска 3, необходимо определить положение его мгновенного центра скоростей. С этой целью вычислим скорости точек *B* и *C*. Скорость точки *B* может быть найдена через угловую скорость диска 2: $V_B = \omega_2 \cdot BP_2$ = 20 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_B$ перпендикулярен отрезку BP_2 и направлен в сторону мгновенного вращения диска 2 вокруг своего центра скоростей P_2.

Скорость точки C определяется через угловую скорость стержня OC: $V_C = \omega_{OC}(r_1 + 2r_2 + r_3)$ = 16 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_C$ перпендикулярен стержню OC и направлен в сторону его вращения (см. рис. 2.10).

Построение мгновенного центра скоростей P_3 диска 3 по известным скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ показано на рис. 2.10. Его положение определяется из условия, что отношение скоростей двух точек тела, совершающего плоскопараллельное движение, равно отношению расстояний от этих точек до мгновенного центра скоростей: $\frac{V_B}{V_C} = \frac{r_3 + CP_3}{CP_3}$. Разрешая пропорцию относительно неизвестной величины CP_3, получим: CP_3= 8 см. Скорость точки C выражается через угловую скорость диска 3 $V_C = \omega_3 \cdot CP_3$. Отсюда величина угловой скорости диска 3: $\omega_3 = \frac{V_C}{CP_3}$= 2 рад/с. Направление мгновенного вращения диска 3 вокруг своего центра скоростей определяется известными направлениями скоростей точек C и B, принадлежащих диску 3 (см. рис. 2.10). Скорость точки D $V_D = \omega_3 \cdot DP_3$ = $=2 \cdot \sqrt{2^2 + 8^2}$ = 16,5 см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ перпендикулярен отрезку DP_3 и направлен в сторону мгновенного вращения диска 3 вокруг центра P_3.

Для определения скорости поршня E воспользуемся теоремой о проекциях скоростей точек плоской фигуры, согласно которой проекции скоростей двух точек плоской фигуры на ось, проходящую через эти точки, равны между собой. Проведем ось через точки D и E. По построению, угол α между вектором $\vec{V}_D$ и осью DE равен углу $\angle DP_3C$ (см. рис. 2.10). Тогда, $\cos\alpha = \frac{CP_3}{DP_3} = \frac{8}{\sqrt{2^2 + 8^2}} = 0{,}97$, откуда $\alpha = 14^\circ$. На основании теоремы о проекциях скоростей точек плоской фигуры имеем равенство: $V_D \cos\alpha = V_E \cos 0$, откуда скорость точки E: V_E=16 см/с.

Мгновенный центр скоростей стержня 4 – точка P_4 – определяется как точка пересечения перпендикуляров к векторам скоростей $\vec{V}_D$ и $\vec{V}_E$, восстановленных, соответственно, из точек D и E (см. рис. 2.10). Угловая скорость стержня 4, совершающего мгновенный поворот вокруг своего центра скоростей, равна: $\omega_4 = \dfrac{V_E}{EP_4}$, где EP_4 – расстояние от точки E до мгновенного центра скоростей звена 4, $EP_4 = DE \cdot \mathrm{ctg}\alpha$ = 40 см. В результате, $\omega_4 = 0{,}4$ рад/с. Направление мгновенного вращения звена 4 вокруг своего центра скоростей определяется направлением скорости точки D.

Задача 2. В плоском стержневом механизме (рис. 2.11) кривошипы OA и ED вращаются вокруг неподвижных центров O и E. В крайней точке D кривошипа ED к нему прикреплён шатун DB, второй конец которого в точке B прикреплён к кривошипу OA. Шатун AC прикреплён в точке A к кривошипу AO, а другим своим концом – к ползуну C, способному совершать только вертикальное движение. Все соединения шарнирные. В заданном положении механизма кривошип OA вертикален, шатун DB расположен горизонтально, кривошип ED наклонен под углом 60° к горизонтали, а шатун AC отклонён на угол 30° от вертикального положения кривошипа AO. Найти скорости всех отмеченных на схеме точек и угловые скорости всех звеньев, если линейные размеры звеньев механизма AC = 6 см, AB = 2 см, BO = 8 см, DB = 10 см и скорость ползуна в данный момент V_C = 4 см/с.

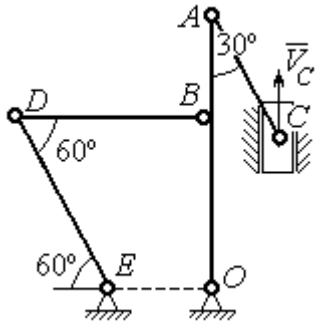


Рис. 2.11. Стержневой механизм

Решение

Кривошипы OA и ED совершают вращательные движения вокруг неподвижных центров. Скорости $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_B$ точек A и B перпендикулярны кривоши-

пу OA, а скорость $\vec{V}_D$ точки D перпендикулярна кривошипу ED. Направления векторов скоростей точек показаны на рис. 2.12.

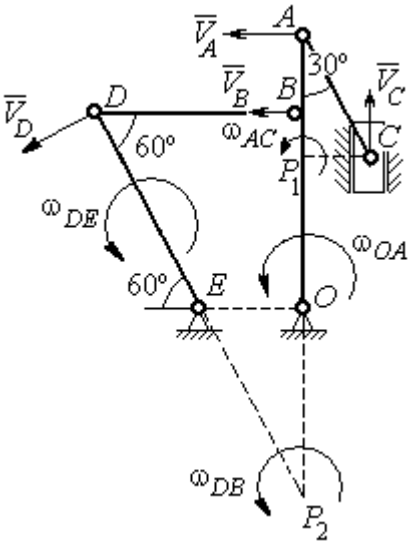


Рис. 2.12. Расчётная схема определения скоростей точек механизма и угловых скоростей его звеньев

Шатун AC совершает плоскопараллельное движение. Его мгновенный центр скоростей P_1 находится как точка пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$. Угловая скорость звена AC равна $\omega_{AC} = \dfrac{V_C}{P_1C} = \dfrac{V_C}{AC \cdot \sin 30^\circ} = \dfrac{4}{3}$ рад/с. Далее, полагая, что точка A принадлежит шатуну AC, найдем её скорость:

$$V_A = \omega_{AC} \cdot P_1A = \frac{4}{3} AC \cdot \cos 30^\circ = 4\sqrt{3} \text{ см/с.}$$

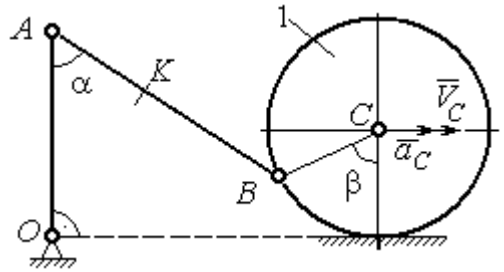
Теперь, исходя из того, что точка A принадлежит как шатуну AC, так и кривошипу OA, найдём его угловую скорость: $\omega_{AO} = \dfrac{V_A}{AO} = 0{,}4\sqrt{3}$ рад/с. Скорость точки B кривошипа $V_B = \omega_{AO} \cdot OB = 3{,}2\sqrt{3}$ см/с.

Шатун DB совершает плоскопараллельное движение. Зная направления скоростей точек B и D, построим мгновенный центр скоростей P_2 звена DB как точку пересечения перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_D$ (см. рис. 2.12). Тогда, угловая скорость шатуна DB $\omega_{DB} = \dfrac{V_B}{P_2B} = \dfrac{3{,}2\sqrt{3}}{DB \cdot \operatorname{tg} 60^\circ} = 0{,}32$ рад/с. Скорость точки D $V_D = \omega_{DB} \cdot P_2D = 0{,}32 \dfrac{DB}{\sin 30^\circ} = 6{,}4$ см/с. Угловая скорость кривошипа DE $\omega_{DE} = \dfrac{V_D}{DE} = \dfrac{6{,}4}{(OB / \sin 60^\circ)} = 0{,}69$ рад/с.

2.6. Задание К3. Определение ускорений точек твёрдого тела при плоскопараллельном движении

Для заданного положения плоского механизма определить ускорения точек звеньев механизма и угловые ускорения звеньев. Варианты заданий и исходные данные приведены на рис. 2.13 – 2.15.

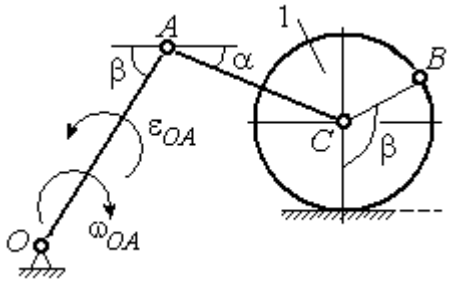
Варианты № 1, 11, 21



Найти: $a_A, a_K, \varepsilon_{AB}$

Номер варианта задания	AB, см	AK, см	α, град	β, град	R_1, см	V_C, см/с	a_C, см/с^2
1	16	10	60	120	10	12	6
11	20	16	30	60	8	10	8
21	18	10	60	180	6	8	4

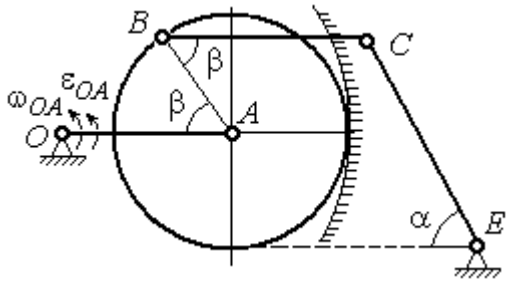
Варианты № 2, 12, 22



Найти: $a_C, a_B, \varepsilon_{AC}$

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	AC, см	α, град	β, град	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
2	5	10	12	30	60	2	4
12	8	24	20	30	120	1	2
22	6	12	15	60	90	2	3

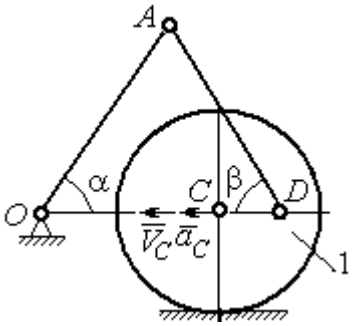
Варианты № 3, 13, 23



Найти: a_C, a_B, ε_{BC}

Номер варианта задания	BC, см	AO, см	α, град	β, град	R_1, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
3	16	15	60	90	10	2	3
13	18	12	90	60	8	3	2
23	14	12	30	120	10	2	4

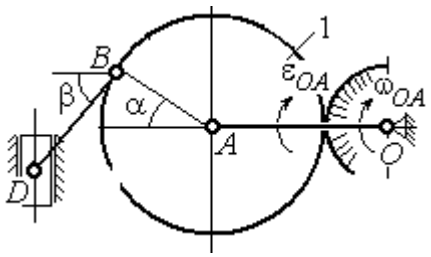
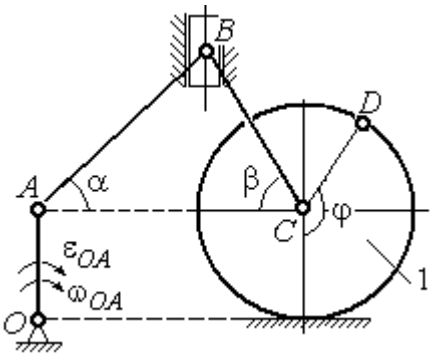
Варианты № 4, 14, 24



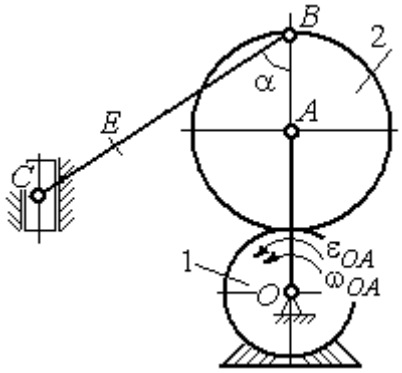
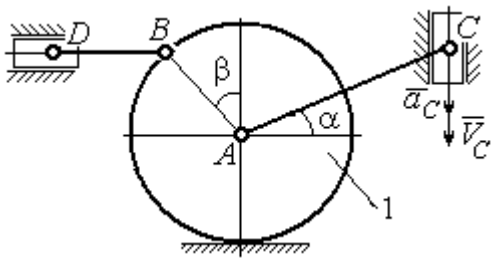
Найти: $a_A, a_D, \varepsilon_{DA}$

Номер варианта задания	R_1, см	OA, см	DC, см	α, град	β, град	V_C, см/с	a_C, см/с^2
4	10	28	5,78	60	30	10	2
14	8	24	4,62	30	90	8	3
24	6	20	6	45	45	12	2

Рис. 2.13. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 1 – 4, 11 – 14, 21 – 24

Варианты № 5, 15, 25	**Варианты № 6, 16, 26**
 Найти: $a_D, a_B, \varepsilon_{BD}$	 Найти: $a_B, a_D, \varepsilon_{BC}$

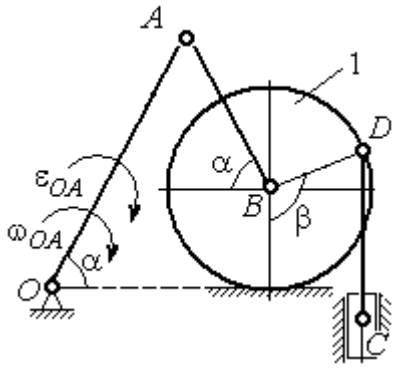
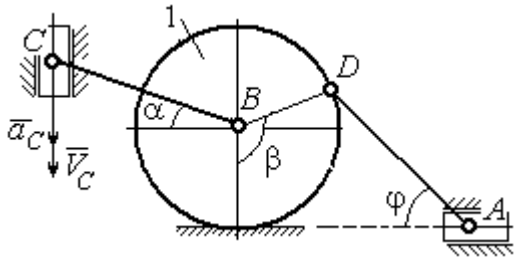
Номер варианта задания	*OA*, см	*BD*, см	α, град	β, град	R_1, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2	Номер варианта задания	R_1, см	*AB*, см	φ, град	α, град	β, град	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2
5	16	10	60	30	10	4	3	**6**	6	18	60	30	30	2	3
15	18	8	90	45	12	2	4	**16**	8	20	90	60	30	2	4
25	14	12	30	60	8	3	2	**26**	5	16	120	30	60	3	4

Варианты № 7, 17, 27	**Варианты № 8, 18, 28**
 Найти: $a_E, a_C, \varepsilon_{BC}$	 Найти: $a_D, a_B, \varepsilon_{BD}$

Номер варианта задания	*BC*, см	*BE*, см	α, град	R_1, см	R_2, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2	Номер варианта задания	R_1, см	*BD*, см	*AC*, см	α, град	β, град	V_C, см/с	a_C, см/с^2
7	22	10	60	2	10	2	3	**8**	4	5	12	60	60	12	5
17	28	15	30	3	6	3	4	**18**	6	10	16	45	90	10	8
27	20	8	45	4	8	2	2	**28**	8	8	16	30	120	8	6

Рис. 2.14. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 5 – 8, 15 – 18, 25 – 28

Окончание вариантов задания К3

Варианты № 9, 19, 29	**Варианты № 10, 20, 30**
 Найти: $a_C, a_B, \varepsilon_{AB}$	 Найти: $a_A, a_B, \varepsilon_{CB}$

Номер варианта задания	*OA*, см	*DC*, см	α, град	β, град	R_1, см	ω_{OA}, рад/с	ε_{OA}, рад/с^2	Номер варианта задания	R_1, см	*BC*, см	φ, град	α, град	β, град	V_C, см/с	a_C, см/с^2
9	18	10	30	120	4	2	3	**10**	6	14	60	30	120	15	3
19	20	12	60	60	6	3	4	**20**	5	18	45	60	90	10	5
29	18	8	60	90	4	2	3	**30**	4	16	30	45	60	12	4

Рис. 2.15. Задание К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении. Номера вариантов задания 9 – 10, 19 – 20, 29 – 30

Примеры решения задания К3. Определение ускорений точек тела при плоскопараллельном движении

Задача 1. Ступенчатый барабан 1 с радиусами ступенек R = 0,5 м и r = 0,3 м катится окружностью малой ступеньки по горизонтальной поверхности без скольжения (рис. 2.16). Барабан приводится в движение шатуном AC, один конец которого соединён с центром барабана в точке A, а другой – с ползуном C, перемещающимся вертикально. В положении механизма, когда шатун AC отклонён от вертикали на угол 60°, найти ускорение точки B барабана, лежащей на его горизонтальном диаметре, если заданы скорость и ускорение ползуна C: V_C = 9м/с, a_C = 4 м/с^2.

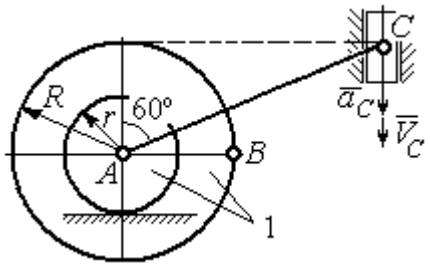


Рис. 2.16. Схема движения плоского механизма

Решение

Найдём угловые скорости ω_{AC}, ω_1 шатуна AC и барабана 1. Шатун совершает плоское движение. Его мгновенный центр скоростей P_2 находится на пересечении перпендикуляров к скоростям $\vec{V}_A$ и $\vec{V}_C$ (рис. 2.17). По условию, скорость точки C направлена вертикально вниз. Точка A принадлежит как шатуну AC, так и барабану 1. При качении барабана по горизонтальной поверхности скорость его центра – точки A параллельна поверхности качения барабана.

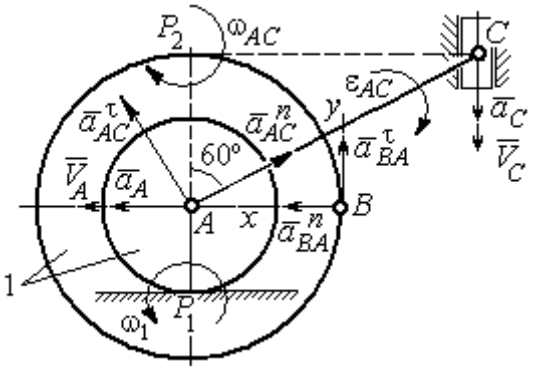


Рис. 2.17. Расчётная схема определения скоростей и ускорений точек механизма

Угловая скорость шатуна $\omega_{AC} = \dfrac{V_C}{CP_2} = \dfrac{9}{R\text{tg}60^\circ} = 6\sqrt{3}$ рад/с. Скорость точки A шатуна $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_2 = 3\sqrt{3}$ м/с. Угловая скорость барабана 1 $\omega_1 = \dfrac{V_A}{AP_1} = 10\sqrt{3}$ рад/с.

При расчёте угловой скорости барабана учтено, что качение барабана по неподвижной поверхности представляет собой плоское движение, при котором мгновенный центр скоростей находится в точке касания с поверхностью (в точке P_1 на рис. 2.17).

Выразим ускорение $\vec{a}_A$ точки A через полюс C на основании векторного равенства: $\vec{a}_A = \vec{a}_C + \vec{a}^{\,\tau}_{AC} + \vec{a}^{\,n}_{AC}$, где $\vec{a}_C$ – ускорение точки C, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}^{\,\tau}_{AC}$, $\vec{a}^{\,n}_{AC}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки A при вращении шатуна AC вокруг полюса C. Вектор нормального ускорения $\vec{a}^{\,n}_{AC}$ направлен вдоль шатуна AC от точки A к полюсу C и равен по величине $a^n_{AC} = \omega^2_{AC} \cdot AC = (6\sqrt{3})^2 \cdot 2R = 108$ м/с^2. Вектор касательного ускорения

$\vec{a}_{AC}^{\,\tau}$, модуль которого вычисляется по формуле $a_{AC}^{\tau} = \varepsilon_{AC} \cdot AC$, направлен перпендикулярно отрезку AC.

На данном этапе величина вектора касательного ускорения не может быть вычислена, поскольку угловое ускорение шатуна AC ε_{AC} неизвестно. На рис. 2.17 направление вектора касательного ускорения $\vec{a}_{AC}^{\,\tau}$ выбрано из предположения, что вращение шатуна ускоренное и направление углового ускорения совпадает с направлением его угловой скорости.

Направление вектора $\vec{a}_A$ ускорения точки A определяется из того, что центр барабана движется по прямой, параллельной горизонтальной поверхности качения. На рис. 2.17 направление вектора ускорения $\vec{a}_A$ выбрано из предположения, что качение барабана ускоренное.

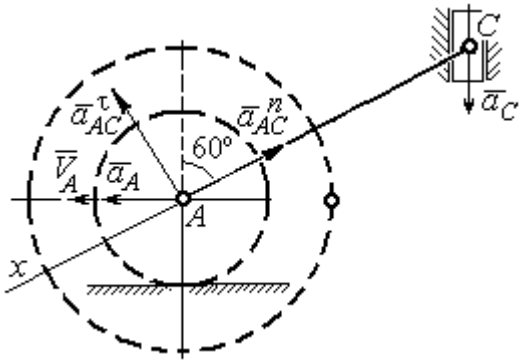


Рис. 2.18. Схема для определения ускорения центра барабана

Выберем ось x вдоль линии AC (рис. 2.18) и спроектируем векторное равенство $\vec{a}_A = \vec{a}_C + \vec{a}_{AC}^{\,\tau} + \vec{a}_{AC}^{\,n}$ на эту ось. При таком выборе оси проекция неизвестного ускорения $\vec{a}_{AC}^{\,\tau}$ обращается в нуль. Получим $a_A \cos 30^\circ = a_C \cos 60^\circ - a_{AC}^{n}$. Отсюда найдём ускорение центра барабана $a_A = \dfrac{1}{\cos 30^\circ}\left(a_C \cos 60^\circ - a_{AC}^{n}\right) = -122{,}4$ м/с^2. Отрицательное значение ускорения точки A означает, что на рис. 2.17, 2.18 вектор ускорения $\vec{a}_A$ должен иметь противоположное направление. Таким образом, вектор ускорения $\vec{a}_A$ направлен в сторону, противоположную вектору скорости $\vec{V}_A$, и движение барабана замедленное.

Для того чтобы найти ускорение точки B, выразим его через полюс A на основании векторного равенства $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}^{\,\tau} + \vec{a}_{BA}^{\,n}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение

точки A, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}_{BA}^{\,\tau}$, $\vec{a}_{BA}^{\,n}$ – касательная и нормальная составляющие ускорения точки B при вращении барабана вокруг полюса A.

Модуль вектора нормального ускорения $\vec{a}_{BA}^{\,n}$ равен по величине $a_{BA}^{n} = \omega_1^2 \cdot BA = (10\sqrt{3})^2 \cdot R = 150$ м/с^2. Вектор направлен вдоль радиуса барабана от точки B к полюсу A (см. рис. 2.17).

Модуль вектора касательного ускорения $\vec{a}_{BA}^{\,\tau}$ вычисляется по формуле $a_{BA}^{\tau} = \varepsilon_1 \cdot BA$, где ε_1 – угловое ускорение барабана. Значение углового ускорения катящегося барабана (в отличие от углового ускорения ε_{AC} шатуна AC) может быть найдено. Расчёт основан на том, что при движении барабана расстояние AP_1 от точки A до центра скоростей барабана P_1 остаётся постоянным, равным r. Тогда выражение $V_A = \omega_1 \cdot AP_1 = \omega_1 \cdot r$ для расчёта скорости точки A можно продифференцировать. Получим $\dfrac{dV_A}{dt} = \dfrac{d\omega_1}{dt} \cdot r$. Так как точка A движется по прямой, производная от скорости точки равна её полному ускорению, а производная от угловой скорости барабана равна его угловому ускорению. Тогда имеем: $a_A = \varepsilon_1 \cdot r$, откуда находим угловое ускорение $\varepsilon_1 = \dfrac{a_A}{r} = 40{,}8$ рад/с^2, а затем и модуль вектора касательного ускорения $a_{BA}^{\tau} = \varepsilon_1 \cdot BA = 20{,}4$ м/с^2.

Заметим, что для вычисления углового ускорения ε_{AC} шатуна AC подобные рассуждения неприменимы. Формулу $V_A = \omega_{AC} \cdot AP_2$ невозможно продифференцировать, так как при движении механизма расстояние AP_2 от точки A до центра скоростей P_2 шатуна AC является неизвестной функцией времени.

Выберем систему координат xBy как показано на рис. 2.17, и спроецируем на эти оси векторное равенство $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{BA}^{\,\tau} + \vec{a}_{BA}^{\,n}$. Полагая, что движение барабана ускоренное (т. е. вектора ускорений $\vec{a}_A$ и $\vec{a}_{BA}^{\,\tau}$ направлены, как показано на рис. 2.17), получим значения составляющих ускорения точки B:

$a_{Bx} = a_A + a_{BA}^n$, $a_{By} = a_{BA}^\tau$. Подставляя значения ускорений, найдём $a_{By} = 20{,}4$ м/с^2, $a_{Bx} = -122{,}4 + 150 = 27{,}6$ м/с^2. Вектор полного ускорения точки B направлен по диагонали прямоугольника, построенного на векторах $\vec{a}_{Bx}$, $\vec{a}_{By}$. Величина ускорения точки B: $a_B = \sqrt{a_{Bx}^2 + a_{By}^2} = 34{,}32$ м/с^2.

Задача 2. В плоском механизме (рис. 2.19) кривошип OA вращается вокруг оси O с угловой скоростью ω_{OA} и угловым ускорением ε_{OA}. Диск 2, шарнирно присоединённый к кривошипу в точке A, катится без проскальзывания по неподвижному диску 1. Радиусы дисков R_1 и R_2. На краю диска 2 в точке B шарнирно прикреплен стержень BC, соединенный с центром C диска 3. Радиус диска 3 равен радиусу диска 2: $R_3 = R_2$. Диск 3 катится без скольжения по горизонтальной поверхности, по прямой. Для положения механизма, изображенного на рис. 2.19, определить ускорение точки D и угловое ускорение стержня BC, если $\omega_{OA} = 4$ рад/с, $\varepsilon_{OA} = 2$ рад/с^2, $R_1 = 4$ см, $R_2 = 8$ см. Длина стержня $BC = 20$ см.

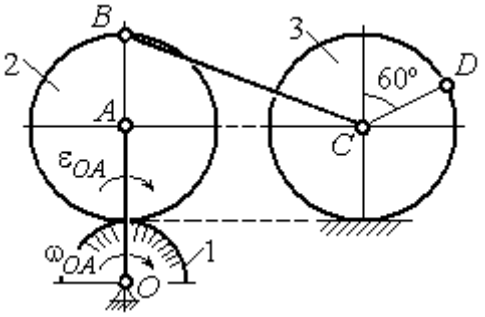


Рис. 2.19. Схема движения плоского механизма

Решение

Определение угловых скоростей звеньев механизма.

Рассмотрим вращательное движение кривошипа OA. Скорость точки A: $V_A = \omega_{OA} \cdot OA = 48$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_A$ направлен перпендикулярно кривошипу OA в сторону движения кривошипа (рис. 2.20).

При движении диска 2 точка P_2 соприкосновения второго диска с неподвижным первым является мгновенным центром скоростей диска 2. Угловая скорость диска 2: $\omega_2 = \dfrac{V_A}{AP_2} = \dfrac{48}{8} = 6$ рад/с.

Скорость точки B диска 2: $V_B = \omega_2 BP_2 = 6 \cdot 16 = 96$ см/с.

Для определения угловой скорости стержня BC заметим, что скорости двух точек стержня $\vec{V}_B$ и $\vec{V}_C$ параллельны, но точки B и C не лежат на общем перпендикуляре к скоростям. В этом случае мгновенный центр скоростей стержня BC отсутствует (бесконечно удалён), угловая скорость стержня равна нулю: $\omega_{BC} = 0$, а стержень совершает мгновенное поступательное движение. В результате имеем: $V_C = V_B = 96$ см/с.

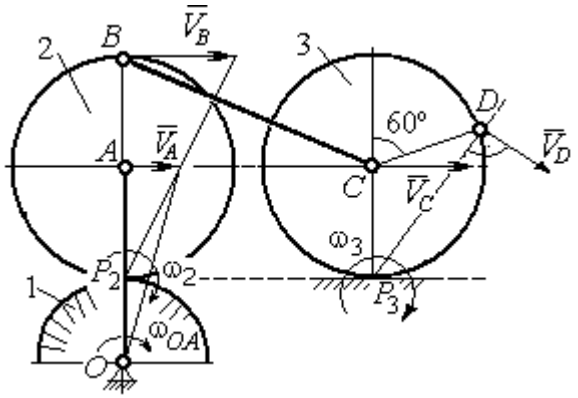


Рис. 2.20. Расчетная схема для определения угловых скоростей звеньев механизма

При качении диска 3 по неподвижной поверхности без проскальзывания точка P_3 касания его с поверхностью является мгновенным центром скоростей. Тогда угловая скорость диска 3: $\omega_3 = \dfrac{V_C}{CP_3} = 12$ рад/с. Скорость точки D диска 3: $V_D = \omega_3 \cdot DP_3$. Величину DP_3 находим из треугольника P_3DC. В результате $DP_3 = 2R_3\cos 30^\circ = 13{,}8$ см и $V_D = 165{,}6$ см/с. Вектор скорости $\vec{V}_D$ направлен в сторону движения диска 3 перпендикулярно линии DP_3 и (см. рис. 2.20).

Определение ускорений точек механизма.

Представим ускорение $\vec{a}_C$ точки C векторной суммой $\vec{a}_C = \vec{a}_B + \vec{a}^{\,n}_{CB} + \vec{a}^{\,\tau}_{CB}$, где $\vec{a}_B$ – ускорение точки B, выбранной в качестве полюса; $\vec{a}^{\,n}_{CB}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{CB}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки C при вращении стержня BC вокруг полюса B, $a^n_{CB} = \omega^2_{CB} \cdot CB$, $a^\tau_{CB} = \varepsilon_{CB} \cdot CB$.

Нормальная составляющая ускорения точки C $a^n_{CB} = 0$, так как стержень CB совершает мгновенное поступательное движение и $\omega_{BC} = 0$.

Направление касательной составляющей $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ неизвестно, так как неизвестно направление углового ускорения стержня ε_{CB}. Для определённости выберем направление углового ускорения стержня BC в сторону против хода часовой стрелки. На рис. 2.21 это направление показано дуговой стрелкой ε_{CB}.

В соответствии с выбранным направлением углового ускорения вектор $\vec{a}^{\tau}_{CB}$ строится перпендикулярно линии стержня BC в сторону углового ускорения ε_{CB} (см. рис. 2.21).

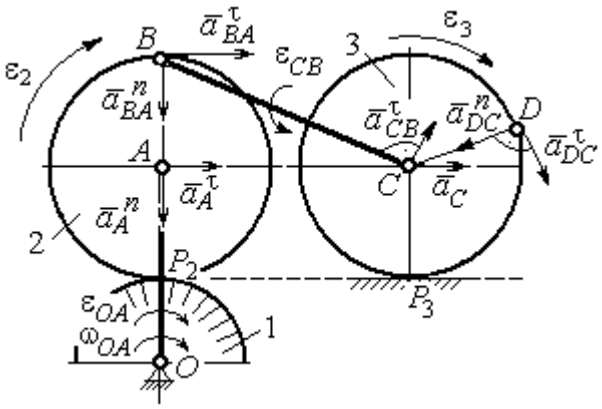


Рис. 2.21. Расчетная схема для определения ускорений точек механизма и угловых ускорений его звеньев

Выразим ускорение точки B через полюс A: $\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}^{n}_{BA} + \vec{a}^{\tau}_{BA}$, где $\vec{a}_A$ – ускорение полюса A; $\vec{a}^{n}_{BA}$, $\vec{a}^{\tau}_{BA}$ – нормальная и касательная составляющие ускорения точки B при вращении диска 2 вокруг полюса A. Величина нормальной составляющей ускорения точки B $a^{n}_{BA} = \omega_2^2 \cdot BA = 288$ см/с^2. Вектор $\vec{a}^{n}_{BA}$ направлен вдоль радиуса BA от точки B к полюсу A (см. рис. 2.21). Касательное ускорение точки B при вращении диска 2 вокруг полюса A вычисляется по формуле $a^{\tau}_{BA} = \varepsilon_2 \cdot BA$. Для определения углового ускорения ε_2 диска 2 заметим, что во время движения диска 2 расстояние AP_2 остается постоянным, равным R_2. Дифференцируя равенство $V_A = \omega_2 \cdot AP_2 = \omega_2 R_2$, получим: $\frac{dV_A}{dt} = \frac{d\omega_2}{dt} R_2$, или $a^{\tau}_{A} = \varepsilon_2 R_2$, откуда $\varepsilon_2 = \frac{a^{\tau}_{A}}{R_2}$.

Для того чтобы найти величину a^{τ}_{A}, рассмотрим вращательное движение кривошипа OA вокруг неподвижной оси O. Ускорение точки A представляется в виде векторного равенства $\vec{a}_A = \vec{a}^{n}_{A} + \vec{a}^{\tau}_{A}$, где $\vec{a}^{n}_{A}$ и $\vec{a}^{\tau}_{A}$ – известные

нормальная и касательная составляющие ускорения точки A кривошипа OA: $a_A^n = \omega_{OA}^2 \cdot OA = 192$ см/с^2, $a_A^\tau = \varepsilon_{OA} \cdot OA = 24$ см/с^2. Направления векторов нормального ускорения $\vec{a}_A^n$ и касательного ускорения $\vec{a}_A^\tau$ показаны на рис. 2.21.

Теперь найдём величину углового ускорения диска 2 и модуль касательного ускорения a_{BA}^τ точки B при вращении диска 2 вокруг полюса A: $\varepsilon_2 = \dfrac{a_A^\tau}{R_2} =$ $= 3$ рад/с^2, $a_{BA}^\tau = \varepsilon_2 \cdot BA = 24$ см/с^2.

Для определения ускорения точки C имеем векторное равенство $\vec{a}_C = \vec{a}_A^n + \vec{a}_A^\tau + \vec{a}_{BA}^n + \vec{a}_{BA}^\tau + \vec{a}_{CB}^\tau$. Выберем оси Cx, Cy, как показано на рис. 2.22, – вдоль отрезка BC и перпендикулярно ему и спроецируем на них имеющееся векторное равенство. Получим:

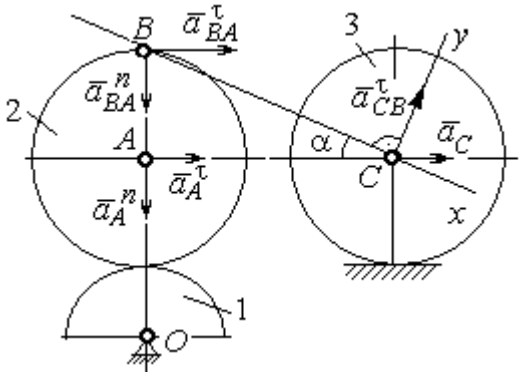


Рис. 2.22. Расчетная схема для вычисления ускорения точки С

$$a_C \cos\alpha = a_A^n \sin\alpha + a_A^\tau \cos\alpha + a_{BA}^n \sin\alpha + a_{BA}^\tau \cos\alpha;$$

$$a_C \sin\alpha = a_A^n \cos\alpha + a_A^\tau \sin\alpha + a_{BA}^n \cos\alpha + a_{BA}^\tau \sin\alpha + a_{CB}^\tau,$$

где α – угол между стержнем BC и линией центров AC; $\sin\alpha = \dfrac{AB}{BC} = 0{,}4$; $\cos\alpha = 0{,}92$. Решая систему, найдём: $a_C = 256{,}7$ см/с^2, $a_{CB}^\tau = -358{,}12$ см/с^2.

Модуль углового ускорения стержня BC: $\varepsilon_{CB} = \dfrac{\left|a_{CB}^\tau\right|}{BC} = 17{,}9$ рад/с^2.

Знак «минус» величины a_{CB}^τ означает, что вектор касательного ускорения $\vec{a}_{CB}^\tau$ на рис. 2.21 – 2.22 следует направить в противоположную сторону. Направление углового ускорения стержня BC, показанное на рис. 2.21 дуговой стрелкой ε_{CB}, также следует заменить на противоположное.

Выразим ускорение точки D через полюс C: $\vec{a}_D = \vec{a}_C + \vec{a}^{\,n}_{DC} + \vec{a}^{\,\tau}_{DC}$, где $\vec{a}_C$ – известное ускорение точки C; $\vec{a}^{\,n}_{DC}$, $\vec{a}^{\,\tau}_{DC}$ – нормальное и касательное составляющие ускорения точки D при вращении диска 3 вокруг полюса C. Величина нормального ускорения точки D: $a^n_{DC} = \omega_3^2 \cdot DC = 1152$ см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}^{\,n}_{DC}$ направлен по радиусу от точки D к полюсу C (рис. 2.23).

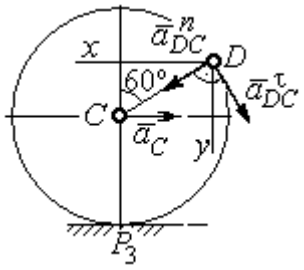


Рис.2.23. Расчетная схема для определения ускорения точки D

Для расчёта касательной составляющей a^{τ}_{DC} ускорения точки D найдём угловое ускорение диска 3. Продифференцируем по времени равенство $V_C = \omega_3 \cdot CP_3 = \omega_3 R_3$. Получим: $\frac{dV_C}{dt} = \frac{d\omega_3}{dt} R_3$, или $a_C = \varepsilon_3 R_3$. Угловое ускорение диска 3: $\varepsilon_3 = \frac{a_C}{R_3} = 32{,}09$ рад/с^2. Тогда величина касательной составляющей ускорения точки D: $a^{\tau}_{DC} = \varepsilon_3 \cdot DC = 256{,}7$ см/с^2. Направление вектора $\vec{a}^{\,\tau}_{DC}$ соответствует ускоренному движению диска 3.

Проведём оси Dx и Dy, как показано на рис. 2.23, и спроецируем векторное равенство ускорения точки D на оси:

$$a_{Dx} = -a_C + a^n_{DC}\cos 30^\circ - a^{\tau}_{DC}\cos 60^\circ, \quad a_{Dy} = a^n_{DC}\cos 60^\circ + a^{\tau}_{DC}\cos 30^\circ.$$

Решая систему, находим значения проекций модуля ускорения $a_{Dx} = 612{,}5$ см/с^2, $a_{Dy} = 798{,}3$ см/с^2. Величина ускорения точки D:

$$a_D = \sqrt{a^2_{Dx} + a^2_{Dy}} = 1006{,}2 \text{ см/с}^2.$$

3. СЛОЖНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТОЧКИ

3.1. Основные понятия сложного движения точки

В неподвижной системе координат рассматривается подвижное твердое тело и точка, перемещающаяся относительно тела.

Траектория точки в её движении относительно тела называется **относительной траекторией.** Скорость точки в этом движении называют **относительной скоростью**, ускорение – **относительным ускорением**.

Траектория точки, перемещающейся вместе с телом, называется переносной траекторией точки, скорость точки при таком её движении – **переносной скоростью**, а ускорение – **переносным ускорением**.

Суммарное движение точки вместе с телом и относительно тела называется **сложным движением**. Траектория точки относительно неподвижной системы координат называется **абсолютной траекторией точки**, скорость и ускорение – **абсолютной скоростью и абсолютным ускорением.**

При вычислении абсолютной скорости используется теорема о сложении скоростей: **при сложном движении абсолютная скорость точки равна геометрической сумме относительной и переносной скоростей:** $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$, где $\vec{V}$, $\vec{V}_e$, $\vec{V}_r$ – вектора абсолютной, переносной и относительной скоростей точки.

В случае, когда относительное движение точки задается естественным способом в виде закона изменения пути $S = S(t)$, величина относительной скорости точки равна модулю производной: $V_r = \left|\dot{S}_r\right|$. Если переносное движение точки есть вращение тела вокруг неподвижной оси, скорость точки в переносном движении будет: $V_e = \omega_e h_e$, где ω_e – величина угловой скорости вращения тела; h_e – кратчайшее расстояние от места положения точки на теле до оси вращения тела.

При вычислении абсолютного ускорения используется теорема Кориолиса о сложении ускорений: **при сложном движении абсолютное ускорение точки равно геометрической сумме трех ускорений – относительного, переносного и ускорения Кориолиса** $\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_к$, где $\vec{a}$ – вектор абсолютного ускорения точки; $\vec{a}_e, \vec{a}_r$ – вектора соответственно переносного и относительного ускорений точки; $\vec{a}_к$ – вектор ускорения Кориолиса. (Иногда его называют поворотным ускорением.)

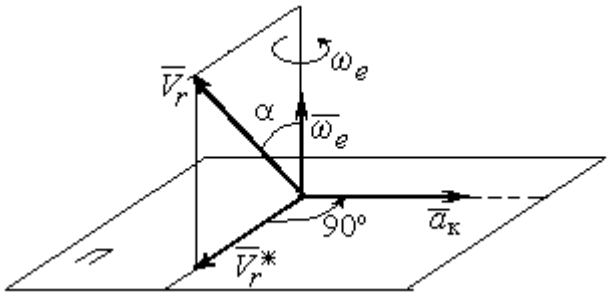


Рис. 3.1. Определение направления ускорения Кориолиса по правилу Жуковского

Вектор ускорения Кориолиса определяется векторным произведением $\vec{a}_к = 2(\vec{\omega}_e \times \vec{V}_r)$, где $\vec{\omega}_e$ – вектор угловой скорости переносного движения; $\vec{V}_r$ – вектор относительной скорости точки. Модуль ускорения Кориолиса: $|\vec{a}_к| = 2|\vec{\omega}_e| \cdot |\vec{V}_r| \sin\alpha$, где α – угол между вектором угловой скорости переносного движения и вектором относительной скорости точки (см. рис. 3.1). Направление вектора ускорения Кориолиса может быть получено по правилу построения вектора векторного произведения.

На рис. 3.1 показана последовательность выбора направления вектора ускорения Кориолиса по правилу Н. Е. Жуковского. Правило состоит в следующем: пусть имеется точка, движущаяся с относительной скоростью $\vec{V}_r$. Построим плоскость П, перпендикулярную вектору переносной угловой скорости $\vec{\omega}_e$, и спроецируем вектор $\vec{V}_r$ на эту плоскость. Проекцию обозначим $\vec{V}_r^*$ (см. рис. 3.1). Чтобы получить направление ускорения Кориолиса, следует вектор проекции относительной скорости $\vec{V}_r^*$ повернуть на 90° в плоскости П вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Если сложное движение точки происходит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, направление ускорения Кориолиса можно получить простым поворотом вектора относительной скорости на угол 90° вокруг оси переносного вращения в направлении этого вращения.

Относительное ускорение $\vec{a}_r$ представляется как сумма векторов относительного касательного $\vec{a}_r^{\tau}$ и относительного нормального $\vec{a}_r^{n}$ ускорений: $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n}$. Переносное ускорение точки $\vec{a}_e$ тела имеет своими составляющими переносное касательное $\vec{a}_e^{\tau}$ и переносное нормальное $\vec{a}_e^{n}$ ускорения так, что $\vec{a}_e = \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n}$.

Таким образом, абсолютное ускорение точки в сложном движении можно представить в виде векторного равенства

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\tau} + \vec{a}_r^{n} + \vec{a}_e^{\tau} + \vec{a}_e^{n} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

Модули относительного касательного и относительного нормального ускорений при естественном способе задания относительного движения точки равны: $a_r^{\tau} = \left|\dot{V}_r\right|$, $a_r^{n} = \dfrac{V_r^2}{\rho}$, где ρ – радиус кривизны относительной траектории. При движении точки по окружности радиус кривизны равен радиусу окружности, при движении по прямой – бесконечности, и в этом случае $a_r^{n} = 0$.

При вращательном переносном движении точки значения переносного касательного и нормального ускорений вычисляются по формулам: $a_e^{\tau} = \varepsilon_e h_e$, $a_e^{n} = \omega_e^2 h_e$, где ε_e – угловое ускорение вращательного переносного движения, $\varepsilon_e = \left|\dot{\omega}_e\right|$; h_e – расстояние от точки до оси вращения тела; ω_e – величина угловой скорости вращения тела.

Вектора ускорений строятся по общим правилам построения векторов нормального и касательного ускорений.

При поступательном переносном движении ускорение Кориолиса и переносное нормальное ускорение равны нулю: $a_{\text{к}} = 0,\ a_e^n = 0$. Абсолютное ускорение точки при поступательном переносном движении можно представить в виде векторного равенства $\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau}$.

3.2. Задание К4. Определение скорости и ускорения точки при сложном движении

Задание включает две задачи с вращательным и поступательным видами переносного движения точки.

Задача 1. Вращение тела относительно неподвижной оси задается законом изменения угла поворота: $\varphi_e = \varphi_e(t)$ или законом изменения его угловой скорости: $\omega_e = \omega_e(t)$. Движение точки относительно тела отсчитывается от её начального положения в точке C и задается законом изменения длины дуги окружности или отрезка прямой линии: $CM = S_r = S_r(t)$.

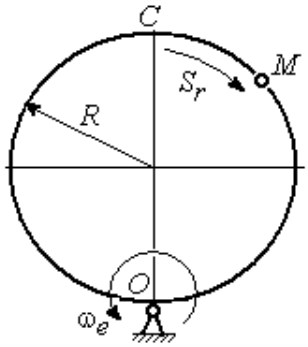
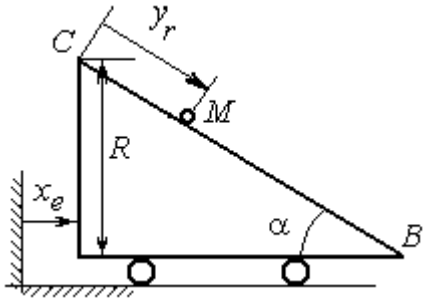
Определить абсолютные скорость и ускорение точки в заданный момент времени t_1.

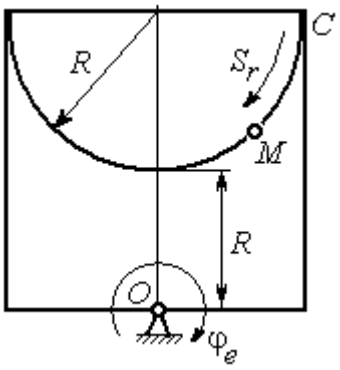
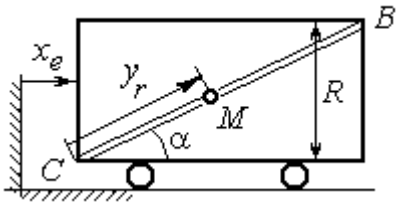
Задача 2. Поступательное движение тела, несущего точку, задается законом изменения координаты $x_e = x_e(t)$. Движение точки относительно тела отсчитывается от её начального положения в точке C и задается законом изменения длины дуги окружности или отрезка прямой линии: $CM = y_r = y_r(t)$.

Определить абсолютные скорость и ускорение точки в момент времени t_2, который либо задаётся в исходных данных задачи, либо на схемеописаны условия, из которых он находится.

Номера вариантов заданий даны на рис. 3.2 – 3.5.

Варианты исходных данных приведены в табл. 3.1.

Варианты № 1, 11, 21	
Задача 1	Задача 2
	 В момент $t = t_2$ точка M прошла половину пути CB

Варианты № 2, 12, 22	
Задача 1	Задача 2
	 В момент $t = t_2$ точка M прошла 2/3 пути CB

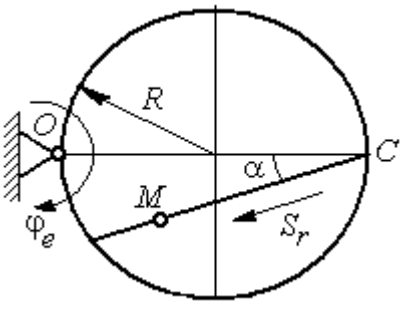
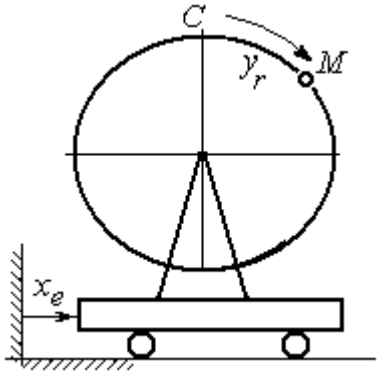
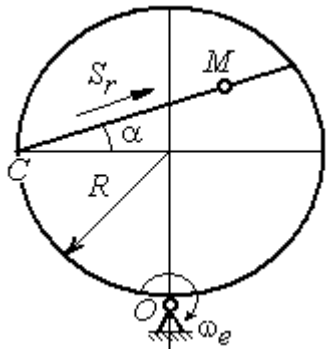
Варианты № 3, 13, 23	
Задача 1	Задача 2
	

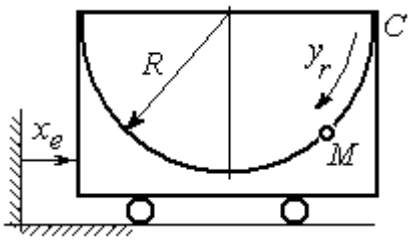
Рис. 3.2. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 1 – 3, 11 – 13, 21 – 23

Варианты № 4, 14, 24

Задача 1

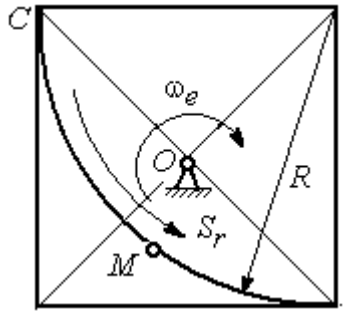


Задача 2

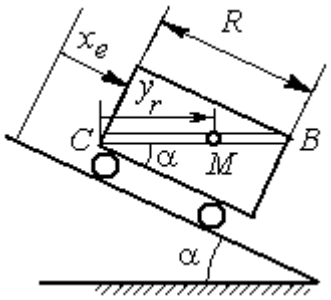


Варианты № 5, 15, 25

Задача 1



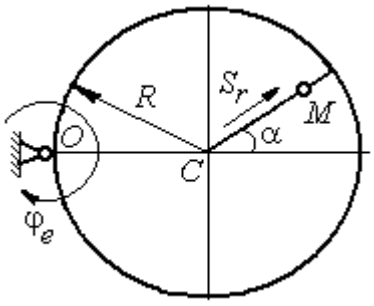
Задача 2



В момент $t = t_2$ точка M прошла путь CB

Варианты № 6, 16, 26

Задача 1



Задача 2

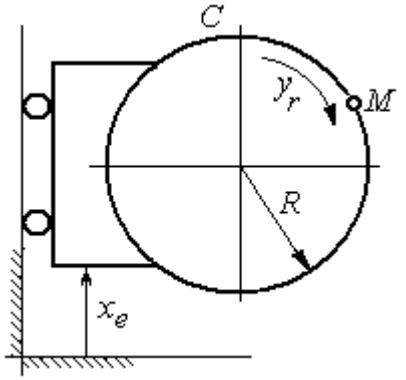
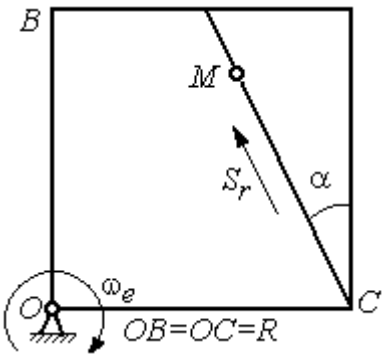


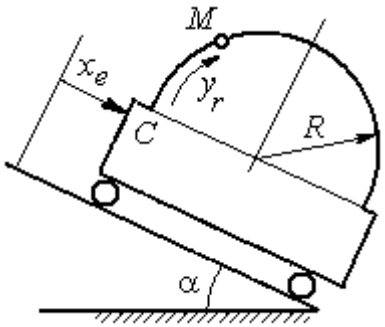
Рис. 3.3. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 4 – 6, 14 – 16, 24 – 26

Варианты № 7, 17, 27

Задача 1

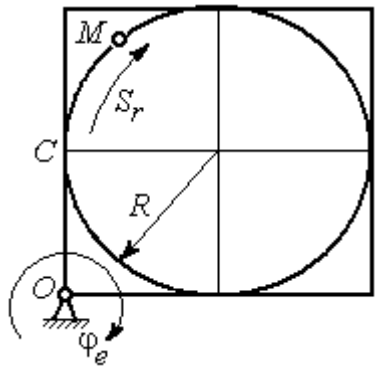


Задача 2

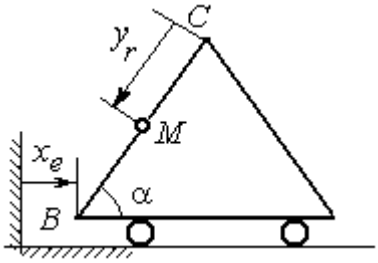


Варианты № 8, 18, 28

Задача 1



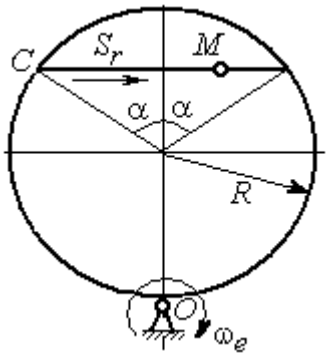
Задача 2



В момент $t = t_2$ точка M прошла половину пути $CB = R$

Варианты № 9, 19, 29

Задача 1



Задача 2

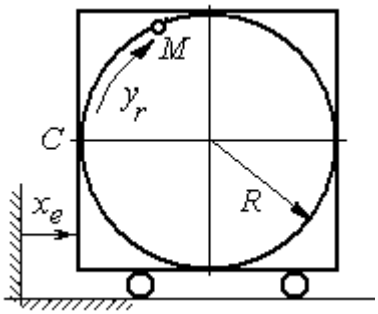
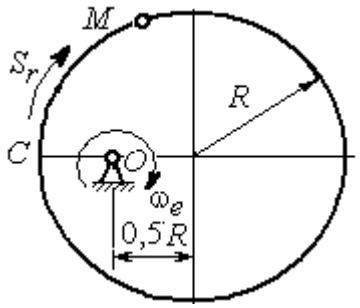


Рис. 3.4. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 7 – 9, 17 – 19, 27 – 29

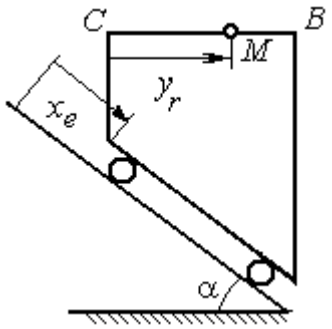
Окончание вариантов задания К4

Варианты № 10, 20, 30

Задача 1



Задача 2



В момент $t = t_2$ точка M прошла половину пути $CB = R$

Рис. 3.5. Задание К4. Сложное движение точки.
Номера вариантов задания 10, 20, 30

Таблица 3.1

Исходные данные для заданий по сложному движению точки

Номер варианта задания	Номер задачи	R, см	α, град	$C\breve{M} = S_r(t)$, см $C\breve{M} = y_r(t)$, см	$\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с $x_e(t)$, см	t_1, с t_2, с
1	1	3	–	$S_r = 2\pi\sin(\pi t/6)$	$\omega_e = 4t^2$	1
	2	4	30	$y_r = 4t^2$	$x_e = 2\cos(\pi t/6)$	–
2	1	2	–	$S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/6)$	$\varphi_e = 6\cos(\pi t/3)$	1
	2	3	60	$y_r = t^2 + t$	$x_e = 1 + \cos(\pi t)$	–
3	1	4	30	$S_r = 2\sqrt{3}\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$	$\varphi_e = 4t - t^2$	1
	2	6	–	$y_r = \pi\left[2t + \sin\pi t\right]$	$x_e = 5t - t^2$	1
4	1	4	60	$S_r = 2(t^3 + t)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	3	–	$y_r = \pi\left[2t + \cos(\pi t/2)\right]$	$x_e = t^3 - 4t$	1
5	1	6	–	$S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/6)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/3)$	1
	2	2	30	$y_r = t^2 + 2t$	$x_e = t^2 - 4t$	–
6	1	6	60	$S_r = t + 10\sin(\pi t/6)$	$\varphi_e = 2t^2 - 5t$	1
	2	3	–	$y_r = 4\pi\sin(\pi t/6)$	$x_e = \left[1 - \cos(\pi t/4)\right]$	1
7	1	8	30	$S_r = 2(t^3 + 3t)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	4	30	$y_r = 2\pi t^2$	$x_e = t^3 - 5t$	1

Продолжение табл. 3.1

Номер варианта задания	Номер задачи	R, см	α, град	$C\breve{M} = S_r(t)$, см $C\breve{M} = y_r(t)$, см	$\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с $x_e(t)$, см	t_1, с t_2, с
8	1	8	–	$S_r = 2\pi\left[t^2 + \sin\pi t\right]$	$\varphi_e = t^2 - 5t$	2
	2	6	30	$y_r = t(t+1)$	$x_e = \cos\pi t$	–
9	1	8	30	$S_r = 2t^2$	$\omega_e = \cos(\pi t/8)$	2
	2	3	–	$y_r = 4\pi\sin^2(\pi t/4)$	$x_e = (3-2t)^2$	1
10	1	6	–	$S_r = \pi(2t^3 + \sin\pi t)$	$\omega_e = 5t - 2t^3$	1
	2	4	30	$y_r = t^2 + 2t$	$x_e = 1 + \cos\pi t$	–
11	1	6	–	$S_r = 8\pi\sin(\pi t/12)$	$\omega_e = 2 + \cos(\pi t/4)$	2
	2	6	60	$y_r = 4\sin\pi t$	$x_e = t^2 - 2t$	–
12	1	18	–	$S_r = \pi(2t^2 + 2t)$	$\varphi_e(t) = 3t - t^2$	2
	2	6	30	$y_r = 2t^2 + t$	$x_e = 1 + \cos(\pi t)$	–
13	1	10	60	$S_r = t^3 + t$	$\varphi_e = 6\cos(\pi t/6)$	2
	2	6	–	$y_r = 6\pi\cos(\pi t/3)$	$x_e = t(t+1)$	1
14	1	4	30	$S_r = 8\sqrt{3}\sin(\pi t/12)$	$\omega_e = (3-2t)^2$	2
	2	3	–	$y_r = 2\pi\sin(\pi t/6)$	$x_e = 2t^2 - 5t$	1
15	1	8	–	$S_r = 4\pi\sin^2(\pi t/4)$	$\omega_e = 2 + \cos(\pi t/4)$	1
	2	5	60	$y_r = 5t + t^2$	$x_e = \cos(\pi t/6)$	–
16	1	12	90	$S_r = 3\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$	$\varphi_e = 2t - 3t^2$	1
	2	15	–	$y_r = \pi(4t + t^2)$	$x_e = 6\sin(\pi t/3)$	1
17	1	6	45	$S_r = 3\sqrt{2}\left[t^2 + 2\sin\pi t\right]$	$\omega_e(t) = 4t^2 - 6$	1
	2	6	60	$y_r = 8\pi\sin(\pi t/12)$	$x_e = \sqrt{2}\sin(\pi t/8)$	2
18	1	8	–	$S_r = 4\pi\sqrt{2}\sin(\pi t/8)$	$\varphi_e = 18t - 4t^2$	2
	2	8	60	$y_r = 3t + 2t^2$	$x_e = \sin\pi t$	–
19	1	8	60	$S_r = 2\sqrt{3}\left[t + \sin(\pi t/2)\right]$	$\omega_e = 5t - t^2$	1
	2	9	–	$y_r = 6\pi\cos(\pi t/3)$	$x_e = \cos(\pi t/6)$	1
20	1	4	–	$S_r = 4\pi\sin(\pi t/6)$	$\omega_e = 3t - 5$	1
	2	6	60	$y_r = 3t + 2t^2$	$x_e = \pi\sin\pi t$	–
21	1	3	–	$S_r = 4\pi\sqrt{2}\sin(\pi t/8)$	$\omega_e = 6t - 14$	2
	2	8	45	$y_r = (t^2 + 3t)$	$x_e = t + 2\sin\pi t$	–

Окончание табл. 3.1

Номер варианта задания	Номер задачи	R, см	α, град	$C\breve{M} = S_r(t)$, см $C\breve{M} = y_r(t)$, см	$\varphi_e(t)$, рад; $\omega_e(t)$, рад/с $x_e(t)$, см	t_1, с t_2, с
22	1	4	–	$S_r = 2\pi(t^2 + 2t)$	$\varphi_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	9	60	$y_r = 8\sin\pi t$	$x_e = 5t - t^2$	–
23	1	6	45	$S_r = 12\sin(\pi t/8)$	$\varphi_e = t^2 + \cos(\pi t/4)$	2
	2	6	–	$y_r = 6\pi[t + \sin(\pi t/6)]$	$x_e = 5t - t^2$	1
24	1	6	45	$S_r = 12\sin(\pi t/8)$	$\omega_e = t + 4\cos(\pi t/4)$	2
	2	6	–	$y_r = \pi(t^2 + 2t)$	$x_e = 6\cos(\pi t/6)$	1
25	1	6	–	$S_r = 2\pi t^2$	$\omega_e = 3\sin(\pi t/3)$	1
	2	4	45	$y_r = 2t(t + 3t)$	$x_e = 2(t^3 - 3t)$	–
26	1	6	120	$S_r = t^2 + t$	$\varphi_e = 12\cos(\pi t/12)$	2
	2	9	–	$y_r = \pi\sqrt{3}\sin(\pi t/3)$	$x_e = 2(t^2 - 3t)$	1
27	1	10	60	$S_r = \sqrt{3}(t^2 + t)$	$\omega_e = 6\cos(\pi t/6)$	2
	2	9	30	$y_r = \sqrt{3}\pi\sin(\pi t/3)$	$x_e = t + 4\cos(\pi t/4)$	1
28	1	2	–	$S_r = 6\pi\sin(\pi t/6)$	$\varphi_e = 2t + \cos(\pi t/2)$	1
	2	6		$y_r = 2t + 3t^2$	$x_e = t + \sin\pi t$	–
29	1	8	30	$S_r = (t^2 + 2t)$	$\omega_e = 6\sin(\pi t/12)$	2
	2	3	–	$y_r = 2\pi\sqrt{3}\sin(\pi t/3)$	$x_e = 5t - t^2$	1
30	1	2	–	$\pi(t^2 + 2t)$	$\omega_e(t) = 6\cos(\pi t/6)$	1
	2	3	60	$y_r = t + t^2$	$x_e = t + \sin\pi t$	–

Пример выполнения задания К4. Сложное движение точки

Задача 1. Фигура, состоящая из половины диска и равнобедренного треугольника (рис. 3.6), вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости фигуры и проходящей через вершину A треугольника. Вращательное движение задается законом изменения угла поворота фигуры $\varphi_e = 5t - 2t^2$ рад.

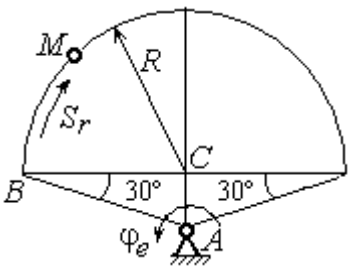


Рис. 3.6. Схема сложного движения точки

Положительное направление вращения отмечено на схеме дуговой стрелкой φ_e. По ободу диска от точки *B* движется точка *M*. Движение точки относительно диска задается законом изменения длины дуги окружности: $\overset{\cup}{BM} = S_r = 9\pi t^2$ см. Положительное направление движения точки *M* на рис. 3.6 показано дуговой стрелкой S_r. Радиус диска $R = 9$ см.

Найти абсолютную скорость и абсолютное ускорение точки *M* в момент времени $t_1 = 1$ с.

Решение

Вращение фигуры будет для точки *M* переносным движением. Относительное движение точки *M* – её движение по окружности обода диска.

Для определения **положения точки** *M* на ободе диска вычислим расстояние, которое она прошла на заданный момент времени. Длина дуги окружности, пройденной точкой за 1 с: $S_r(1) = 9\pi$ см. Положение точки *M* определяется центральным углом $\alpha = \dfrac{S_r(1)}{R} = \dfrac{9\pi}{9} = \pi$. Положение точки в момент времени $t_1 = 1$ с отмечено на рис. 3.7 точкой M_1.

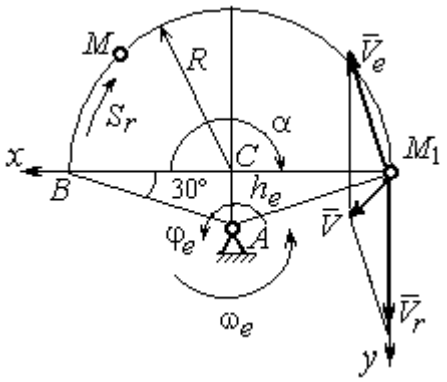


Рис. 3.7. Расчетная схема для вычисления абсолютной скорости точки при сложном движении

Для определения **скорости переносного движения** точки вычисляем значение производной: $\dot{\varphi}_e = 5 - 4t$. Угловая скорость вращения фигуры: $\omega_e = |\dot{\varphi}_e|$. При $t_1 = 1$ с $\dot{\varphi}_e(1) = 1$ рад/с. Положительная величина производной $\dot{\varphi}_e(1)$ показывает, что вращение фигуры в данный момент происходит в положительном направлении, что отмечено дуговой стрелкой ω_e на рис. 3.7.

В момент времени $t_1 = 1$ с точка *M* находится в положении M_1. Скорость V_e переносного движения точки в момент времени $t_1 = 1$ с $V_e(1) = \omega_e(1)h_e$, где

расстояние от точки M_1 до оси вращения фигуры $h_e = AM_1 = \dfrac{R}{\cos 30^\circ} = 6\sqrt{3}$ см.

Тогда $V_e(1) = 6\sqrt{3}$ см/с.

Вектор скорости переносного движения точки $\vec{V}_e$ перпендикулярен линии AM_1 и направлен в сторону вращения фигуры (см. рис. 3.7).

Относительное движение точки задано естественным способом, как закон изменения длины дуги *BM*. В этом случае **скорость относительного движения** точки $V_r = \left|\dot{S}_r\right| = \left|18\pi t\right|$. При t_1 = 1 с $V_r(1) = \left|\dot{S}_r(1)\right| = 18\pi$ = 56,5 см/с. Положительное значение производной $\dot{S}_r(1)$ указывает, что относительное движение точки в положении M_1 происходит в положительном направлении, указанном на рис. 3.7 дуговой стрелкой S_r. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости точки в положении M_1 направлен по касательной к траектории относительного движения в сторону положительного направления движения (см. рис. 3.7).

Абсолютную скорость точки находим по теореме сложения скоростей $\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Направление вектора абсолютной скорости, полученное по правилу сложения векторов, показано на рис. 3.5. Для определения величины абсолютной скорости выбираем прямоугольные оси координат M_1xy (см. рис. 3.7) и проецируем обе части векторного равенства теоремы сложения скоростей на эти оси. Получим:

$$V_x = V_e \cos 60^\circ = 3\sqrt{3} = 5{,}2 \text{ см/с};$$

$$V_y = -V_e \cos 30^\circ + V_r = -6\sqrt{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + 56{,}5 = 29{,}5 \text{ см/с}.$$

Модуль абсолютной скорости: $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{5{,}2^2 + 29{,}5^2} = 29{,}95$ см/с.

Абсолютное ускорение точки определяем по теореме Кориолиса, которая при вращательном переносном движении имеет вид:

$$\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_{\text{к}}.$$

Относительное касательное ускорение a_r^τ вычисляется по формуле: $a_r^\tau = \left|\ddot{S}_r\right|$. По условию задачи вторая производная $\ddot{S}_r = 18\pi$ = 56,5 см/с^2 – постоянная величина. Так как значение второй производной $\ddot{S}_r$ положительно, вектор ускорения $\vec{a}_r^\tau$ направлен по касательной к траектории относительного движения в точке M_1 в сторону положительного направления относительного движения, отмеченного дуговой стрелкой S_r.

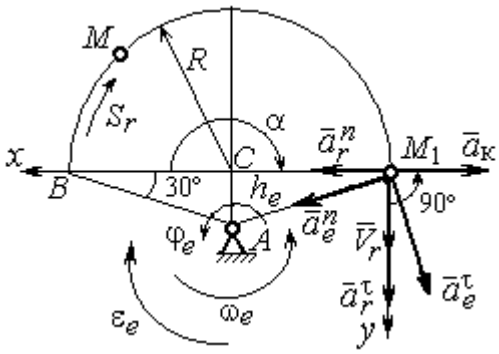


Рис. 3.8. Расчетная схема для определения абсолютного ускорения точки

Относительное нормальное ускорение точки вычисляется по формуле $a_r^n = \dfrac{V_r^2}{R}$ и в момент $t_1 = 1$ с равно: $a_r^n(1) = \dfrac{V_r^2(1)}{R} = \dfrac{(18\pi)^2}{9} = 355{,}3$ см/с^2. Вектор ускорения $\vec{a}_r^n$ направлен по радиусу диска к центру C (см. рис. 3.8).

Переносное касательное ускорение вычисляется по формуле: $a_e^\tau = \varepsilon_e h_e$, где угловое ускорение $\varepsilon_e = \left|\ddot{\varphi}_e\right|$. Вычислим производную $\ddot{\varphi}_e = -4$ рад/с^2. Угловое ускорение $\varepsilon_e = \left|\ddot{\varphi}_e\right| = 4$ рад/с^2 постоянно и не зависит от времени.

Отрицательное значение производной $\ddot{\varphi}_e < 0$ при условии, что расчетная величина угловой скорости положительна: $\dot{\varphi}_e > 0$, означает, что вращательное движение замедленное и переносное угловое ускорение ε_e направлено в сторону, противоположную направлению вращения.

Вектор $\vec{a}_e^\tau$ переносного касательного ускорения точки в её положении M_1 перпендикулярен линии AM_1 и направлен противоположно вектору переносной скорости $\vec{V}_e$ (см. рис. 3.8). Модуль переносного касательного ускорения: $a_e^\tau = a_e^\tau = \varepsilon_e h_e = 24\sqrt{3} = 41{,}6$ см/с^2.

Переносное нормальное ускорение a_e^n рассчитывается по формуле: $a_e^n = \omega_e^2 h_e$ и в момент времени $t_1 = 1$ с $a_e^n(1) = \omega_e^2(1)h_e = 6\sqrt{3} = 10{,}4$ см/с^2. Вектор переносного нормального ускорения $\vec{a}_e^n$ направлен по линии AM_1 к оси вращения (см. рис. 3.8).

По условию задачи вектор скорости относительного движения точки $\vec{V}_r$ лежит в плоскости, перпендикулярной оси переносного вращения, то есть перпендикулярен вектору угловой скорости переносного движения $\vec{\omega}_e$. Тогда модуль **ускорения Кориолиса** при $t_1 = 1$ с $a_к = 2\omega_e V_r = 2 \cdot 1 \cdot 18\pi = 113{,}1$ см/с^2.

Так как вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r \perp \vec{\omega}_e$, то по правилу Жуковского для определения направления ускорения Кориолиса достаточно повернуть вектор относительной скорости точки $\vec{V}_r$ на 90° в сторону переносного движения вокруг оси, параллельной оси вращения и проходящей через точку M_1 (см. рис. 3.8). Для определения абсолютного ускорения спроецируем на прямоугольные оси xM_1y (см. рис. 3.8) векторное равенство $\vec{a} = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e^{\,\tau} + \vec{a}_e^{\,n} + \vec{a}_к$. Получим: $a_y = a_e^{\tau}\cos 30^\circ + a_e^n \cos 60^\circ + a_r^{\tau} = 97{,}9$ см/с^2, $a_x = -a_e^{\tau}\cos 60^\circ + a_e^n \cos 30^\circ + a_r^n - a_к = 228{,}4$ см/с^2. Модуль абсолютного ускорения: $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 248{,}5$ см/с^2.

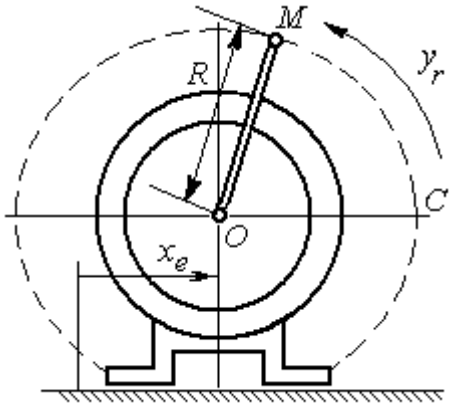


Рис. 3.9. Схема движения точки стержня, укреплённого на электромоторе

Задача 2. К вращающемуся валу электромотора прикреплён стержень OM длины $R = 6$ см. Во время работы электромотора точка M стержня из начального положения C перемещается по дуге окружности согласно уравнению $CM = y_r = \pi t^2$ см. При этом электромотор, установленный без креплений, совершает горизонтальные гармонические колебания на фундаменте по закону

$x_e = 5\sin(\pi t/3)$ см. Определить абсолютное ускорение точки M в момент времени $t_1 = 1$ с.

Решение

Точка M совершает сложное движение – относительно электромотора и вместе с ним. Относительным движением точки будет её движение по дуге окружности радиуса R, переносным – поступательное горизонтальное, прямолинейное движение электромотора.

Найдём положение точки относительно электродвигателя в заданный момент времени. Угол α, отсчитываемый стержнем OM от начального положения OC, в момент времени $t_1 = 1$ с составляет $\alpha = \dfrac{y_r(t_1)}{R} = \dfrac{\pi}{6} = 30°$. Положение точки в момент времени $t_1 = 1$ с отмечено на рис. 3.10 буквой M_1.

Относительное движение точки задано естественным способом, как закон изменения длины дуги. Относительная скорость $V_r = \dot{y}_r = 2\pi t$. В момент времени $t_1 = 1$ с V_r = 6,28 см/с. Вектор $\vec{V}_r$ относительной скорости направлен перпендикулярно стержню OM_1.

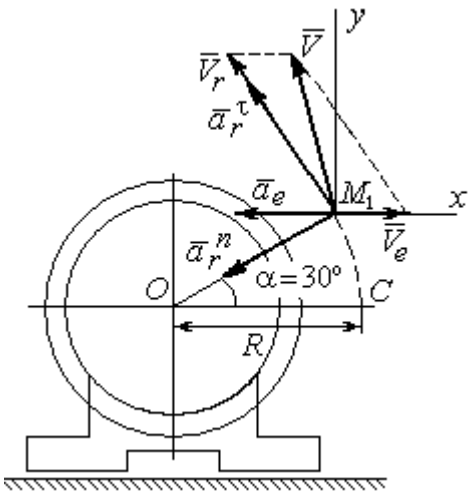


Рис. 3.10. Расчётная схема вычисления абсолютной скорости и абсолютного ускорения точки

Скорость точки в переносном движении – это скорость горизонтального движения электродвигателя:

$$V_e = \dot{x}_e = \frac{5\pi}{3}\cos(\pi t/3).$$

В момент времени $t_1 = 1$с $V_e = \dfrac{5\pi}{3}\cos 60^\circ$ = 2,62 см/с. Вектор $\vec{V}_e$ переносной скорости точки M направлен параллельно линии движения электродвигателя (см. рис. 3.10).

Абсолютная скорость точки определяется на основании теоремы сложения скоростей при сложном движении: $\vec{V}_M = \vec{V}_e + \vec{V}_r$. Для того чтобы найти величину абсолютной скорости, выберем оси xM_1y, как показано на рис. 3.10, и спроецируем векторное равенство сложения скоростей на эти оси. Получим: $V_{Mx} = V_e - V_r\cos 60^\circ = -0{,}52$ см/с (проекция направлена в отрицательную сторону оси x), $V_{My} = V_r\cos 30^\circ = 5{,}44$ см/с. Модуль абсолютной скорости $V_M = \sqrt{V_{Mx}^2 + V_{My}^2} = 5{,}46$ см/с. Вектор абсолютной скорости направлен по диагонали параллелограмма, построенного на векторах $\vec{V}_e$ и $\vec{V}_r$.

При поступательном переносном движении точки $\omega_e = 0$ и потому $a_к = 0$. Относительное ускорение точки при движении по окружности раскладывается на две составляющие $\vec{a}_r = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n}$, направленные вдоль стержня OM и перпендикулярно ему. Кроме того, при прямолинейном относительном движении $a_e^n = 0$. В результате, теорема о сложении ускорений принимает вид $\vec{a}_M = \vec{a}_r^{\,\tau} + \vec{a}_r^{\,n} + \vec{a}_e$, где модули векторов вычисляются по формулам $a_r^{\tau} = \dot{V}_r$, $a_r^n = \dfrac{V_r^2}{R}$, $a_e = a_e^{\tau} = \dot{V}_e = -\dfrac{5\pi^2}{9}\sin(\pi t/3)$ и в момент времени $t_1 = 1$с равны $a_r^{\tau} = 6{,}28$ см/с^2, $a_r^n = 6{,}57$ см/с^2, $a_e = -4{,}75$ см/с^2. Направления векторов ускорений показаны на рис. 3.10. Для вычисления модуля абсолютного ускорения точки спроецируем векторное равенство сложения ускорений на оси выбранной ранее системы координат xM_1y. Получим:

$$a_{Mx} = -a_r^{\tau}\cos 60^\circ - a_r^n\cos 30^\circ - a_e = -4{,}08 \text{ см/с}^2;$$

$$a_{My} = a_r^{\tau}\cos 30^\circ - a_r^n\cos 60^\circ = 2{,}15 \text{ см/с}^2.$$

Величина абсолютного ускорения $a_M = \sqrt{a_{Mx}^2 + a_{My}^2} = 4{,}61$ см/с^2.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ

по дисциплине

ДУХОВНО-НРАВСТВЕННАЯ КУЛЬТУРА И ПАТРИОТИЧЕСКОЕ ВОСПИТАНИЕ

Специальность:

21.05.03 Технология геологической разведки

Екатеринбург
2020

Оглавление

Методические указания по освоению дисциплины 3
Освоение лекционного курса 3
Самостоятельное изучение тем курса....3
Подготовка к практическим (семинарским) занятиям....6
Подготовка к тестированию 7
Подготовка к групповой дискуссии....9
Методические указания по подготовке к промежуточной аттестации....11

Методические указания по освоению дисциплины

Освоение лекционного курса

Лекции по дисциплине дают основной теоретический материал, являющийся базой для восприятия практического материала. После прослушивания лекции необходимо обратиться к рекомендуемой литературе, прочитать соответствующие темы, уяснить основные термины, проблемные вопросы и подходы к их решению, а также рассмотреть дополнительный материал по теме.

Главное в период подготовки к лекционным занятиям – научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои творческие способности и овладевать навыками творческой работы. Для этого необходимо строго соблюдать дисциплину учебы и поведения. Четкое планирование своего рабочего времени и отдыха является необходимым условием для успешной самостоятельной работы. В основу его нужно положить рабочие программы изучаемых в семестре дисциплин.

Каждому студенту следует составлять еженедельный и семестровый планы работы, а также план на каждый рабочий день. С вечера всегда надо распределять работу на завтрашний день. В конце каждого дня целесообразно подводить итог работы: тщательно проверить, все ли выполнено по намеченному плану, не было ли каких-либо отступлений, а если были, по какой причине это произошло. Нужно осуществлять самоконтроль, который является необходимым условием успешной учебы. Если что-то осталось невыполненным, необходимо изыскать время для завершения этой части работы, не уменьшая объема недельного плана.

Одним из важных элементов освоения лекционного курса является самостоятельная работа на лекции. Слушание и запись лекций – сложный вид вузовской аудиторной работы. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента. Краткие записи лекций, их конспектирование помогает усвоить учебный материал. Конспект является полезным тогда, когда записано самое существенное, основное и сделано это самим студентом. Не надо стремиться записать дословно всю лекцию. Такое «конспектирование» приносит больше вреда, чем пользы. Запись лекций рекомендуется вести по возможности собственными формулировками. Желательно запись осуществлять на одной странице, а следующую оставлять для проработки учебного материала самостоятельно в домашних условиях. Конспект лекции лучше подразделять на пункты, параграфы, соблюдая красную строку. Этому в большой степени будут способствовать пункты плана лекции, предложенные преподавателям. Принципиальные места, определения, формулы и другое следует сопровождать замечаниями «важно», «особо важно», «хорошо запомнить» и т.п. Можно делать это и с помощью разноцветных маркеров или ручек. Лучше если они будут собственными, чтобы не приходилось просить их у однокурсников и тем самым не отвлекать их во время лекции. Целесообразно разработать собственную «маркографию» (значки, символы), сокращения слов. Не лишним будет и изучение основ стенографии. Работая над конспектом лекций, всегда необходимо использовать не только учебник, но и ту литературу, которую дополнительно рекомендовал лектор. Именно такая серьезная, кропотливая работа с лекционным материалом позволит глубоко овладеть знаниями.

Самостоятельное изучение тем курса

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка основной и рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебниками и книгами (а также самостоятельное теоретическое исследование проблем, обозначенных

преподавателем на лекциях) – это важнейшее условие формирования научного способа познания. Основные приемы можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным (что необходимо для семинаров, что для экзаменов, что пригодится для написания курсовых и выпускных квалификационных работ, а что выходит за рамками официальной учебной деятельности, и расширяет общую культуру);

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и дипломных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями и научными руководителями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные книги, учебники и статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать); Таким образом, чтение научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того на сколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студенты с этой целью заводят специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении научного текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);

- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);

- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);

- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к научному тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;

- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;

- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц, цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;

- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым или в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках учебной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с научным текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

- Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

- Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

- Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

- Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

- Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять

план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны 15 распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование - наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

Подготовка к практическим (семинарским) занятиям

Важной формой самостоятельной работы студента является систематическая и планомерная подготовка к практическому (семинарскому) занятию. После лекции студент должен познакомиться с планом практических занятий и списком обязательной и дополнительной литературы, которую необходимо прочитать, изучить и законспектировать. Разъяснение по вопросам новой темы студенты получают у преподавателя в конце предыдущего практического занятия.

Подготовка к практическому занятию требует, прежде всего, чтения рекомендуемых источников и монографических работ, их реферирования, подготовки докладов и сообщений. Важным этапом в самостоятельной работе студента является повторение материала по конспекту лекции. Одна из главных составляющих внеаудиторной подготовки – работа с книгой. Она предполагает: внимательное прочтение, критическое осмысление содержания, обоснование собственной позиции по дискуссионным моментам, постановки интересующих вопросов, которые могут стать предметом обсуждения на семинаре.

В начале практического занятия должен присутствовать организационный момент и вступительная часть. Преподаватель произносит краткую вступительную речь, где формулируются основные вопросы и проблемы, способы их решения в процессе работы.

Практические занятия не повторяют, а существенно дополняют лекционные занятия, помогая студентам в подготовке к промежуточной аттестации. Практические занятия являются одной из важнейших форм обучения студентов: они позволяют студентам закрепить, углубить и конкретизировать знания по курсу, подготовиться к практической деятельности. В процессе работы на практических занятиях студент должен совершенствовать умения и навыки самостоятельного анализа источников и научной литературы, что необходимо для научно-исследовательской работы.

Одним из важных элементов практических занятий является изучение и анализ источников теологического, религиозного или правового характера, осуществляемый под руководством преподавателя, что необходимо для получения практических навыков в области научно-исследовательской, экспертно-консультативной и представительско-посреднической деятельности по окончании обучения.

Подготовка к тестированию

Тестирование - система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося.

Тестовая система предусматривает вопросы / задания, на которые слушатель должен дать один или несколько вариантов правильного ответа из предложенного списка ответов. При поиске ответа необходимо проявлять внимательность. Прежде всего, следует иметь в виду, что в предлагаемом задании всегда будет один правильный и один неправильный ответ. Это оговаривается перед каждым тестовым вопросом. Всех правильных или всех неправильных ответов (если это специально не оговорено в формулировке вопроса) быть не может. Нередко в вопросе уже содержится смысловая подсказка, что правильным является только один ответ, поэтому при его нахождении продолжать дальнейшие поиски уже не требуется.

На отдельные тестовые задания не существует однозначных ответов, поскольку хорошее знание и понимание содержащегося в них материала позволяет найти такие ответы самостоятельно. Именно на это слушателям и следует ориентироваться, поскольку полностью запомнить всю получаемую информацию и в точности ее воспроизвести при ответе невозможно. Кроме того, вопросы в тестах могут быть обобщенными, не затрагивать каких-то деталей.

Тестовые задания сгруппированы по темам учебной дисциплины. Количество тестовых вопросов/заданий по каждой теме дисциплины определено так, чтобы быть достаточным для оценки знаний обучающегося по всему пройденному материалу.

При подготовке к тестированию студенту следует внимательно перечитать конспект лекций, основную и дополнительную литературу по той теме (разделу), по которому предстоит писать тест.

Для текущей аттестации по дисциплине «Духовно-нравственная культура и патриотическое воспитание» применяются тесты, которые выполняются по разделам № 1-4.

Предлагаются задания по изученным темам в виде открытых и закрытых вопросов (35 вопросов в каждом варианте).

Образец тестового задания

1. Древнейший человек на Земле появился около 3 млн. лет назад. Когда появились первые люди на Урале?
а) 1млн. лет назад,
б) 300 тыс. лет назад,
в) около. 150 тыс. лет назад.

2.В каком регионе Урала находится укрепленное поселение бронзового века “Аркаим”:
а) в Курганской
б) в Челябинской,
в) в Свердловской.

3.Уральский город, где расположена известная наклонная башня Демидовых:
а) Кунгур
б) Невьянск
в) Екатеринбург
г) Соликамск

4. В каком году была основана Екатеринбургская горнозаводская школа?
а) 1723
б) 1783
в) 1847

5. Почему на гербе Уральского государственного горного университета изображена императорская корона?
а) потому что он был основан императором Николаем II
б) по личной просьбе представительницы царского дома Романовых О.Н. Куликовской-Романовой, посетившей Горный университет
в) для красоты

6. Из приведенных волевых качеств определите те, которые необходимы для выполнения патриотического долга.
а) Решительность, выдержка, настойчивость в преодолении препятствий и трудностей.
б) Агрессивность, настороженность, терпимость к себе и сослуживцам.
в) Терпимость по отношению к старшим, лояльность по отношению к окружающим

7. Печорин в произведении М.Ю. Лермонтова “Герой нашего времени” был ветераном этой войны:
а) Русско – турецкой
б) Кавказской
в) Крымской
г) Германской

Ключи:
1. б
2. б

3. б
4. а
5. а
6. а
7. б

Тест выполняется на отдельном листе с напечатанными тестовыми заданиями, выдаваемом преподавателем, на котором нужно обвести правильный вариант ответа. Тест подписывается сверху следующим образом: фамилия, инициалы, № группы, дата.

Оценка за тестирование определяется простым суммированием баллов за правильные ответы на вопросы.

В зависимости от типа вопроса ответ считается правильным, если:

- в тестовом задании закрытой формы с выбором ответа выбран правильный ответ;
- в тестовом задании открытой формы дан правильный ответ;
- в тестовом задании на установление правильной последовательности установлена правильная последовательность;
- в тестовом задании на установление соответствия, если сопоставление произведено верно для всех пар.

18-35 баллов (50-100%) – оценка «зачтено»

0-17 баллов (0-49%) - оценка «не зачтено»

Подготовка к групповой дискуссии

Групповая дискуссия — это одна из организационных форм познавательной деятельности обучающихся, позволяющая закрепить полученные ранее знания, восполнить недостающую информацию, сформировать умения решать проблемы, укрепить позиции, научить культуре ведения дискуссии. Тематика обсуждения выдается на первых занятиях. Подготовка осуществляется во внеаудиторное время. Регламент – 3-5 мин. на выступление. В оценивании результатов наравне с преподавателем принимают участие студенты группы.

Обсуждение проблемы (нравственной, политической, научной, профессиональной и др.) происходит коллективно, допускается корректная критика высказываний (мнений) своих сокурсников с обязательным приведением аргументов критики.

Участие каждого обучающегося в диалоге, обсуждении должно быть неформальным, но предметным.

Темы для групповых дискуссий по разделам

Тема для групповой дискуссии по разделу 1. История инженерного дела в России. Создание и развитие Уральского государственного горного университета.

Студентам заранее дается перечень великих уральцев XVIII – начала XX вв. (Демидовы, И.С. Мясников и Твердышевы, Г.В. де Генин, В.А. Глинка, М.Е. Грум-Гржимайло и др.), внесших существенный вклад в развитие металлургической и горной промышленности. Студенты разбиваются на несколько групп, каждой из которых дается один исторический персонаж. Задача студентов по литературным и интернет-источникам подробно познакомиться с биографией и трудами своего героя. В назначенный для дискуссии день они должны не только рассказать о нем и его трудах, но и, главным образом, указать на то, каким образом их жизнь и деятельность повлияла на культуру и жизненный уклад их современников, простых уральцев.

Тема для групповой дискуссии по разделу 2. «Основы российского патриотического самосознания»

Студенты должны заранее освежить в памяти произведения школьной программы: К.М. Симонова «Жди меня», М.Ю. Лермонтова «Бородино», Л.Н. Толстого «Война и мир», А.А. Фадеева «Молодая гвардия».

Вопросы, выносимые на обсуждение:

Какие специфические грани образа патриота представлены в произведениях К.М. Симонова «Жди меня», М.Ю. Лермонтова «Бородино», Л.Н. Толстого «Война и мир», А.А. Фадеева «Молодая гвардия», выделите общее и особенное.

Какие еще произведения, в которых главные герои проявляют патриотические качества, вы можете назвать. Соотнесите их с героями вышеупомянутых писателей.

Тема для групповой дискуссии по разделу 3. Религиозная культура в жизни человека и общества.

Описание изначальной установки:

Группа делится на 2 части: «верующие» и «светские». Каждая группа должна высказать аргументированные суждения по следующей теме:

«Может ли верующий человек прожить без храма/мечети/синагоги и другие культовые сооружения?»

Вопросы для обсуждения:

1. Зачем человеку нужен храм/мечеть/синагога и др. культовые сооружения?
2. Почему совесть называют голосом Божиим в человеке?
3. Что означает выражение «вечные ценности»?
4. Что мешает человеку прийти в храм/мечеть/синагогу и др. культовое сооружение?

Каждый из групп должна представить развернутые ответы на поставленные вопросы со ссылкой на религиоведческие источники и нормативно-правовые акты, аргументированно изложить свою позицию.

Тема для групповой дискуссии по разделу 4. «Основы духовной и социально-психологической безопасности»

***Тема дискуссии:* «Воспитание трезвенных убеждений»**

Основой дискуссии как метода активного обучения и контроля полученных знаний является равноценное владение материалом дискуссии всеми студентами. Для этого при предварительной подготовке рекомендуется наиболее тщательно повторить темы раздела, касающиеся формирования системы ценностей, манипуляций сознанием, мпомобов ведения консциентальной войны, методике утверждения трезвости как базовой национальной ценности.

В начале дискуссии демонстрируется фильм Н. Михалкова «Окна Овертона» из серии Бесогон ТВ: https://www.youtube.com/watch?time_continue=8&v=BlIiy4QfQIk

Затем перед студентами ставится проблемная задача: сформулировать ответ на вопрос «Возможно ли применение данной технологии формирования мировоззрения в благих целях — для воспитания трезвенных убеждений?»

Возможные варианты точек зрения:

1. Это манипулятивная технология, применение ее для воспитания трезвенных убеждений неэтично.

2. Это универсальная социально-педагогическая технология, применение ее во зло или во благо зависит от намерений автора. Испоьзование ее в целях формирования трезвенных убеждений обосновано и может реализоваться в практической деятельности тех, кто овладел курсом «Основы утверждения трезвости»

Результатом дискуссии не могут быть однозначные выводы и формулировки. Действие ее всегда пролонгировано, что дает студентам возможность для дальнейшего обдумывания рассмотренных проблемных ситуаций, для поиска дополнительной информации по воспитанию трезвенных убеждений.

Незадолго до проведения групповой дискуссии преподаватель разделяет группу на несколько подгрупп, которая, согласно сценарию, будет представлять определенную точку зрения, информацию. При подготовке к групповой дискуссии студенту необходимо собрать материал по теме с помощью анализа научной литературы и источников.

Используя знание исторического, теологического и правового материала, исходя из изложенных изначальных концепций, каждая группа должна изложить свою точку зрения на обсуждаемый вопрос, подкрепив ее соответствующими аргументами.

Каждый из групп по очереди приводит аргументы в защиту своей позиции. Соответственно другая группа должна пытаться привести контраргументы, свидетельствующие о нецелесообразности, пагубности позиции предыдущей группы и стремится доказать, аргументированно изложить свою позицию.

Критерии оценивания: качество высказанных суждений, умение отстаивать свое мнение, культура речи, логичность.

Критерии оценки одной дискуссии:

Суждения зрелые, обоснованные, высказаны с использованием профессиональной терминологии, логично – 8-10 баллов.

Суждения не совсем зрелые или необоснованные, при ответе использована профессиональная терминология, суждение логично – 4 – 7 баллов.

Суждения незрелые, необоснованные, бытовая речь, нелогичный ответ – 2– 3 балла:

Суждения нет, бытовая речь, нелогичный ответ – 2– 3 балла.

Оценка «зачтено» выставляется обучающемуся, если он набрал 8-10 баллов

Оценка «зачтено» выставляется обучающемуся, если он набрал 4-7 баллов

Оценка «зачтено» выставляется обучающемуся, если он набрал 2-3 балла

Оценка «неудовлетворительно» выставляется обучающемуся, если он набрал 0-1 балл.

Максимальное количество баллов, которые можно набрать, работая на дискуссии – 40 баллов.

Методические указания по подготовке к промежуточной аттестации

Каждый учебный семестр заканчивается промежуточной аттестацией в виде зачетно-экзаменационной сессии. Подготовка к зачетно-экзаменационной сессии, сдача зачетов и экзаменов является также самостоятельной работой студента. Основное в подготовке к сессии – повторение всего учебного материала дисциплины, по которому необходимо сдавать зачет или экзамен. Только тот студент успевает, кто хорошо усвоил учебный материал. Если студент плохо работал в семестре, пропускал лекции, слушал их невнимательно, не конспектировал, не изучал рекомендованную литературу, то в процессе

подготовки к сессии ему придется не повторять уже знакомое, а заново в короткий срок изучать весь учебный материал. Все это зачастую невозможно сделать из-за нехватки времени. Для такого студента подготовка к зачету или экзамену будет трудным, а иногда и непосильным делом, а конечный результат – возможное отчисление из учебного заведения.

Ознакомление обучающихся с процедурой и алгоритмом оценивания (в течение первой недели начала изучения дисциплины).

Сообщение результатов оценивания обучающимся.

Оформление необходимой документации.

Зачет - форма контроля промежуточной аттестации, в результате которого обучающийся получает оценку по шкале: «зачтено», «не зачтено».

Зачет проводится по расписанию.

Цель зачета – завершить курс изучения дисциплины, проверить сложившуюся у обучающегося систему знаний, понятий, отметить степень полученных знаний, определить сформированность компетенций.

Зачет подводит итог знаний, умений и навыков обучающихся по дисциплине, всей учебной работы по данному предмету.

К зачету по дисциплине «Духовно-нравственная культура и патриотическое воспитание» необходимо начинать готовиться с первой лекции, практического (семинарского) занятия, так как материал, набираемый памятью постепенно, неоднократно подвергавшийся обсуждению, образует качественные знания, формирует необходимые компетенции.

Зачет по дисциплине «Духовно-нравственная культура и патриотическое воспитание» проводится в письменной форме путем выполнения зачетного тестового задания.

При опоздании к началу зачета обучающийся на зачет не допускается. Использование средств связи, «шпаргалок», подсказок зачете является основанием для удаления обучающегося с зачета, а в зачетной ведомости проставляется оценка «не зачтено».

Для подготовки зачету (составления конспекта ответа) обучающийся должен иметь лист (несколько листов) формата А-4.

Лист (листы) формата А-4, на котором будет выполняться подготовка к ответу зачетного задания, должен быть подписан обучающимся в начале работы в правом верхнем углу. Здесь следует указать:

- Ф. И. О. обучающегося;
- группу, курс
- дату выполнения работы
- название дисциплины «Духовно-нравственная культура и патриотическое воспитание».

Страницы листов с ответами должны быть пронумерованы.

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины «Духовно-нравственная культура и патриотическое воспитание» проводится в форме теста. Выполнение теста предполагает выбор правильного варианта ответа на вопрос из числа предложенных.

На зачете преподаватель может задать обучающемуся дополнительные и уточняющие вопросы. Дополнительные вопросы задаются помимо вопросов теста и связаны, как правило, с плохим ответом. Уточняющие вопросы задаются в рамках теста и направлены на уточнение мысли студента.

Система оценивания по оценочным средствам промежуточного контроля

Форма и описание контрольного мероприятия	Балловая стоимость	Критерии начисления баллов

	контрольного мероприятия	
Тест - система стандартизированных заданий, позволяющая автоматизировать процедуру измерения уровня знаний и умений обучающегося	0-35 баллов (35 заданий)	Правильность ответов
Итого	35 баллов	

Оценка за тестирование определяется простым суммированием баллов за правильные ответы на вопросы.

В зависимости от типа вопроса ответ считается правильным, если:

- в тестовом задании закрытой формы с выбором ответа выбран правильный ответ;
- в тестовом задании открытой формы дан правильный ответ;
- в тестовом задании на установление правильной последовательности установлена правильная последовательность;
- в тестовом задании на установление соответствия, если сопоставление произведено верно для всех пар.

Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов текущего контроля и баллов по промежуточной аттестации.

55 - 110 балла (50-100%) - оценка «зачтено»

0 - 54 балла (0-49%) - оценка «не зачтено».

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ Б1.О.ДВ.02.02 КОММУНИКАТИВНАЯ КУЛЬТУРА ЛИЧНОСТИ

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Методические рекомендации по работе с текстом лекций	5
2	Методические рекомендации по подготовке к опросу	8
3	Методические рекомендации по подготовке доклада (презентации)	9
4	Методические рекомендации по написанию эссе	11
5	Методические рекомендации по подготовке к семинарским занятиям	14
6	Методические рекомендации по подготовке к дискуссии	15
	Методические рекомендации по написанию реферата	17
7	Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов	18
	Заключение	22
	Список использованных источников	23

ВВЕДЕНИЕ

Инициативная самостоятельная работа студента есть неотъемлемая составная часть учебы в вузе. В современном формате высшего образования значительно возрастает роль самостоятельной работы студента. Правильно спланированная и организованная самостоятельная работа обеспечивает достижение высоких результатов в учебе.

Самостоятельная работа студента (СРС) - это планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия, при сохранении ведущей роли студентов.

Целью СРС является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками по профилю будущей специальности, опытом творческой, исследовательской деятельности, развитие самостоятельности. Ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровней. Самостоятельная работа студента – важнейшая составная часть учебного процесса, обязательная для каждого студента, объем которой определяется учебным планом. Методологическую основу СРС составляет деятельностный подход, при котором цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, т. е. на реальные ситуации, в которых студентам надо проявить знание конкретной дисциплины. Предметно и содержательно СРС определяется государственным образовательным стандартом, действующими учебными планами и образовательными программами различных форм обучения, рабочими программами учебных дисциплин, средствами обеспечения СРС: учебниками, учебными пособиями и методическими руководствами, учебно-программными комплексами и т.д.

Самостоятельная работа студентов может рассматриваться как организационная форма обучения - система педагогических условий, обеспечивающих управление учебной деятельностью студентов по освоению знаний и умений в области учебной и научной деятельности без посторонней помощи.

Самостоятельная работа студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развития исследовательских умений;
- получения навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

Самостоятельная работа студента - это особым образом организованная деятельность, включающая в свою структуру такие компоненты, как:

- уяснение цели и поставленной учебной задачи;
- четкое и системное планирование самостоятельной работы;
- поиск необходимой учебной и научной информации;
- освоение информации и ее логическая переработка;
- использование методов исследовательской, научно-исследовательской работы для решения поставленных задач;
- выработка собственной позиции по поводу полученной задачи;

- представление, обоснование и защита полученного решения;
- проведение самоанализа и самоконтроля.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы: аудиторная и внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию: текущие консультации, коллоквиум, прием и разбор домашних заданий и другие.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия: подготовка презентаций, составление глоссария, подготовка к практическим занятиям, подготовка рецензий, аннотаций на статью, подготовка к дискуссиям, круглым столам.

СРС может включать следующие формы работ:

- изучение лекционного материала;
- работа с источниками литературы: поиск, подбор и обзор литературы и электронных источников информации по заданной проблеме курса;
- выполнение домашних заданий, выдаваемых на практических занятиях: тестов, докладов, контрольных работ и других форм текущего контроля;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельное изучение; подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к контрольной работе или коллоквиуму;
- подготовка к зачету, экзамену, другим аттестациям;
- написание реферата, эссе по заданной проблем;
- выполнение расчетно-графической работы;
- выполнение выполнение курсовой работы или проекта;
- анализ научной публикации по определенной преподавателем теме, ее реферирование;
- исследовательская работа и участие в научных студенческих конференциях, семинарах и олимпиадах.

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения. Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов online и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

Подготовка к самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

.

1. Методические рекомендации по работе с текстом лекций

На лекционных занятиях необходимо конспектировать учебный материал. Обращать внимание на формулировки, определения, раскрывающие содержание тех или иных понятий, научные выводы и практические рекомендации, положительный опыт в ораторском мастерстве. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента, и помогает усвоить учебный материал.

Желательно оставлять в рабочих конспектах поля, на которых делать пометки, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений, фиксировать вопросы, вызывающие личный интерес, варианты ответов на них, сомнения, проблемы, спорные положения. Рекомендуется вести записи на одной стороне листа, оставляя вторую сторону для размышлений, разборов, вопросов, ответов на них, для фиксирования деталей темы или связанных с ней фактов, которые припоминаются самим студентом в ходе слушания.

Слушание лекций - сложный вид интеллектуальной деятельности, успех которой обусловлен *умением слушать*, и стремлением воспринимать материал, нужное записывая в тетрадь. Запись лекции помогает сосредоточить внимание на главном, в ходе самой лекции продумать и осмыслить услышанное, осознать план и логику изложения материала преподавателем.

Такая работа нередко вызывает трудности у студентов: некоторые стремятся записывать все дословно, другие пишут отрывочно, хаотично. Чтобы избежать этих ошибок, целесообразно придерживаться ряда правил.

1. После записи ориентирующих и направляющих внимание данных (тема, цель, план лекции, рекомендованная литература) важно попытаться проследить, как они раскрываются в содержании, подкрепляются формулировками, доказательствами, а затем и выводами.

2. Записывать следует основные положения и доказывающие их аргументы, наиболее яркие примеры и факты, поставленные преподавателем вопросы для самостоятельной проработки.

3. Стремиться к четкости записи, ее последовательности, выделяя темы, подтемы, вопросы и подвопросы, используя цифровую и буквенную нумерацию (римские и арабские цифры, большие и малые буквы), красные строки, выделение абзацев, подчеркивание главного и т.д.

Форма записи материала может быть различной - в зависимости от специфики изучаемого предмета. Это может быть стиль учебной программы (назывные предложения), уместны и свои краткие пояснения к записям.

Студентам не следует подробно записывать на лекции «все подряд», но обязательно фиксировать то, что преподаватели диктуют – это базовый конспект, содержащий основные положения лекции: определения, выводы, параметры, критерии, аксиомы, постулаты, парадигмы, концепции, ситуации, а также мысли-маяки (ими часто являются афоризмы, цитаты, остроумные изречения). Запись лекции лучше вести в сжатой форме, короткими и четкими фразами. Каждому студенту полезно выработать свою систему сокращений, в которой он мог бы разобраться легко и безошибочно.

Даже отлично записанная лекция предполагает дальнейшую самостоятельную работу над ней (осмысление ее содержания, логической структуры, выводов). С целью доработки конспекта лекции необходимо в первую очередь прочитать записи, восстановить текст в памяти, а также исправить описки, расшифровать не принятые ранее сокращения, заполнить пропущенные места, понять текст, вникнуть в его смысл. Далее прочитать материал по рекомендуемой литературе, разрешая в ходе чтения возникшие ранее затруднения, вопросы, а также дополняя и исправляя свои записи. В ходе доработки конспекта углубляются, расширяются и закрепляются знания, а также дополняется, исправляется и совершенствуется конспект. Доработанный конспект и рекомендуемая

литература используется при подготовке к практическому занятию. Знание лекционного материала при подготовке к практическому занятию обязательно.

Особенно важно в процессе самостоятельной работы над лекцией выделить новый понятийный аппарат, уяснить суть новых понятий, при необходимости обратиться к словарям и другим источникам, заодно устранив неточности в записях. Главное - вести конспект аккуратно и регулярно, только в этом случае он сможет стать подспорьем в изучении дисциплины.

Работа над лекцией стимулирует самостоятельный поиск ответов на самые различные вопросы: над какими понятиями следует поработать, какие обобщения сделать, какой дополнительный материал привлечь.

Важным средством, направляющим самообразование, является выполнение различных заданий по тексту лекции, например, составление ее развернутого плана или тезисов; ответы на вопросы проблемного характера, (скажем, об основных тенденциях развития той или иной проблемы); составление проверочных тесты по проблеме, написание по ней реферата, составление графических схем.

По своим задачам лекции могут быть разных жанров: *установочная лекция* вводит в изучение курса, предмета, проблем (что и как изучать), а *обобщающая лекция* позволяет подвести итог (зачем изучать), выделить главное, усвоить законы развития знания, преемственности, новаторства, чтобы применить обобщенный позитивный опыт к решению современных практических задач. Обобщающая лекция ориентирует в истории и современном состоянии научной проблемы.

В процессе освоения материалов обобщающих лекций студенты могут выполнять задания разного уровня. Например: задания *репродуктивного* уровня (составить развернутый план обобщающей лекции, составить тезисы по материалам лекции); задания *продуктивного* уровня (ответить на вопросы проблемного характера, составить опорный конспект по схеме, выявить основные тенденции развития проблемы); задания *творческого* уровня (составить проверочные тесты по теме, защитить реферат и графические темы по данной проблеме). Обращение к ранее изученному материалу не только помогает восстановить в памяти известные положения, выводы, но и приводит разрозненные знания в систему, углубляет и расширяет их. Каждый возврат к старому материалу позволяет найти в нем что-то новое, переосмыслить его с иных позиций, определить для него наиболее подходящее место в уже имеющейся системе знаний.

.

2. Методические указания по подготовке к опросу

Самостоятельная работа обучающихся включает подготовку к устному или письменному опросу на семинарских занятиях. Для этого обучающийся изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

Письменный опрос

Письменный опрос является одной из форм текущего контроля успеваемости студента. При изучении материала студент должен убедиться, что хорошо понимает основную терминологию темы, умеет ее использовать в нужном контексте. Желательно составить краткий конспект ответа на предполагаемые вопросы письменной работы, чтобы убедиться в том, что студент владеет материалом и может аргументировано, логично и грамотно письменно изложить ответ на вопрос. Следует обратить особое внимание на написание профессиональных терминов, чтобы избегать грамматических ошибок в работе. При изучении новой для студента терминологии рекомендуется изготовить карточки, которые содержат новый термин и его расшифровку, что значительно облегчит работу над материалом.

Устный опрос

Целью устного собеседования являются обобщение и закрепление изученного курса. Студентам предлагаются для освещения сквозные концептуальные проблемы. При подготовке следует использовать лекционный материал и учебную литературу. Для более глубокого постижения курса и более основательной подготовки рекомендуется познакомиться с указанной дополнительной литературой. Готовясь к семинару, студент должен, прежде всего, ознакомиться с общим планом семинарского занятия. Следует внимательно прочесть свой конспект лекции по изучаемой теме и рекомендуемую к теме семинара литературу. С незнакомыми терминами и понятиями следует ознакомиться в предлагаемом глоссарии, словаре или энциклопедии [1].

Критерии качества устного ответа.

1. Правильность ответа по содержанию.
2. Полнота и глубина ответа.
3. Сознательность ответа (учитывается понимание излагаемого материала).
4. Логика изложения материала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться профессиональной терминологией).
5. Рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели).
6. Своевременность и эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе).
7. Использование дополнительного материала (приветствуется, но не обязательно для всех студентов).
8. Рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов)[2].

---

[1] Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

[2]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: http://priab.ru/images/metod_agro/Metod_Inostran_yazyk_35.03.04_Agro_15.01.2016.pdf

Ответ на каждый вопрос из плана семинарского занятия должен быть содержательным и аргументированным. Для этого следует использовать документы, монографическую, учебную и справочную литературу.

Для успешной подготовки к устному опросу, студент должен законспектировать рекомендуемую литературу, внимательно осмыслить лекционный материал и сделать выводы. Объем временина на подготовку к устному опросу зависимости от сложности темы и особенностей организации обучающимся своей самостоятельной работы.

3.Методические рекомендации по подготовке доклада (презентации)

Доклад – публичное сообщение по заданной теме, представляющее собой развернутое изложение на определенную тему, вид самостоятельной работы, который используется в учебных и внеаудиторных занятиях и способствует формированию навыков исследовательской работы, освоению методов научного познания, приобретению навыков публичного выступления, расширяет познавательные интересы, приучает критически мыслить.

При подготовке доклада используется дополнительная литература, систематизируется материал. Работа над докладом не только позволяет учащемуся приобрести новые знания, но и способствует формированию важных научно-исследовательских навыков самостоятельной работы с научной литературой, что повышает познавательный интерес к научному познанию.

Приветствуется использование мультимедийных технологий, подготовка докладов-презентаций.

Доклад должен соответствовать следующим требованиям:

- тема доклада должна быть согласованна с преподавателем и соответствовать теме занятия;

- иллюстрации (слайды в презентации) должны быть достаточными, но не чрезмерными;

- материалы, которыми пользуется студент при подготовке доклада-презентации, должны тсоответствовать научно-методическим требованиям ВУЗа и быть указаны в докладе;

- необходимо соблюдать регламент: 7-10 минут выступления.

Преподаватель может дать тему сразу нескольким студентам одной группы, по принципу: докладчик и оппонент. Студенты могут подготовить два выступления с противоположными точками зрения и устроить дискуссию по проблемной теме. Докладчики и содокладчики во многом определяют содержание, стиль, активность данного занятия, для этого необходимо:

- использовать технические средства;
- знать и хорошо ориентироваться в теме всей презентации (семинара);
- уметь дискутировать и быстро отвечать на вопросы;
- четко выполнять установленный регламент: докладчик - 7-10 мин.; содокладчик - 5 мин.; дискуссия - 10 мин;
- иметь представление о композиционной структуре доклада.

После выступления докладчик и содокладчик, должны ответить на вопросы слушателей.

В подготовке доклада выделяют следующие этапы:

1. Определение цели доклада: информировать, объяснить, обсудить что-то (проблему, решение, ситуацию и т. п.)

2. Подбор литературы, иллюстративных примеров.

3. Составление плана доклада, систематизация материала, композиционное оформление доклада в виде печатного /рукописного текста и электронной презентации.

Общая структура доклада

Построение доклада включает три части: вступление, основную часть и заключение.

Вступление.

Вступление должно содержать:

- название презентации (доклада);
- сообщение основной идеи;
- обоснование актуальности обсуждаемого вопроса;
- современную оценку предмета изложения;

- краткое перечисление рассматриваемых вопросов;
- живую интересную форму изложения;
- акцентирование оригинальности подхода.

Основная часть.

Основная часть состоит из нескольких разделов, постепенно раскрывающих тему. Возможно использование иллюстрации (графики, диаграммы, фотографии, карты, рисунки) Если необходимо, для обоснования темы используется ссылка на источники с доказательствами, взятыми из литературы (цитирование авторов, указание цифр, фактов, определений). Изложение материала должно быть связным, последовательным, доказательным.

Задача основной части - представить достаточно данных для того, чтобы слушатели и заинтересовались темой и захотели ознакомиться с материалами. При этом логическая структура теоретического блока не должны даваться без наглядных пособий, аудио-визуальных и визуальных материалов.

Заключение.

Заключение - это ясное четкое обобщение, в котором подводятся итоги, формулируются главные выводы, подчеркивается значение рассмотренной проблемы, предлагаются самые важные практические рекомендации. Требования к оформлению доклада. Объем машинописного текста доклада должен быть рассчитан на произнесение доклада в течение 7 -10 минут (3-5 машинописных листа текста с докладом).

Доклад оценивается по следующим критериям:

Критерии оценки доклада, сообщения	*Количество баллов*
Содержательность, информационная насыщенность доклада	1
Наличие аргументов	1
Наличие выводов	1
Наличие презентации доклада	1
Владение профессиональной лексикой	1
Итого:	5

Электронные презентации выполняются в программе MS PowerPoint в виде слайдов в следующем порядке: • титульный лист с заголовком темы и автором исполнения презентации; • план презентации (5-6 пунктов - это максимум); • основная часть (не более 10 слайдов); • заключение (вывод). Общие требования к стилевому оформлению презентации: • дизайн должен быть простым и лаконичным; • основная цель - читаемость, а не субъективная красота; цветовая гамма должна состоять не более чем из двух-трех цветов; • всегда должно быть два типа слайдов: для титульных и для основного текста; • размер шрифта должен быть: 24–54 пункта (заголовок), 18–36 пунктов (обычный текст); • текст должен быть свернут до ключевых слов и фраз. Полные развернутые предложения на слайдах таких презентаций используются только при цитировании; каждый слайд должен иметь заголовок; • все слайды должны быть выдержаны в одном стиле; • на каждом слайде должно быть не более трех иллюстраций; • слайды должны быть пронумерованы с указанием общего количества слайдов

4. Методические рекомендации по написанию эссе

Эссе - это самостоятельная письменная работа на тему, предложенную преподавателем. Цель эссе состоит в развитии навыков самостоятельного творческого мышления и письменного изложения собственных мыслей. Писать эссе чрезвычайно полезно, поскольку это позволяет автору научиться четко и грамотно формулировать мысли, структурировать информацию, использовать основные категории анализа, выделять причинно-следственные связи, иллюстрировать понятия соответствующими примерами, аргументировать свои выводы; овладеть научным стилем речи.

Эссе должно содержать: четкое изложение сути поставленной проблемы, включать самостоятельно проведенный анализ этой проблемы с использованием концепций и аналитического инструментария, рассматриваемого в рамках дисциплины, выводы, обобщающие авторскую позицию по поставленной проблеме. В зависимости от специфики дисциплины формы эссе могут значительно дифференцироваться. В некоторых случаях это может быть анализ имеющихся статистических данных по изучаемой проблеме, анализ материалов из средств массовой информации и использованием изучаемых моделей, подробный разбор предложенной задачи с развернутыми мнениями, подбор и детальный анализ примеров, иллюстрирующих проблему и т.д.

Построение эссе - это ответ на вопрос или раскрытие темы, которое основано на классической системе доказательств.

Структура эссе

1. *Титульный лист* (заполняется по единой форме);
2. *Введение* - суть и обоснование выбора данной темы, состоит из ряда компонентов, связанных логически и стилистически.

На этом этапе очень важно правильно *сформулировать вопрос, на который вы собираетесь найти ответ в ходе своего исследования.*

3. *Основная часть* - теоретические основы выбранной проблемы и изложение основного вопроса.

Данная часть предполагает развитие аргументации и анализа, а также обоснование их, исходя из имеющихся данных, других аргументов и позиций по этому вопросу. В этом заключается основное содержание эссе и это представляет собой главную трудность. Поэтому важное значение имеют подзаголовки, на основе которых осуществляется структурирование аргументации; именно здесь необходимо обосновать (логически, используя данные или строгие рассуждения) предлагаемую аргументацию/анализ. Там, где это необходимо, в качестве аналитического инструмента можно использовать графики, диаграммы и таблицы.

В зависимости от поставленного вопроса анализ проводится на основе следующих категорий:

Причина - следствие, общее - особенное, форма - содержание, часть - целое, постоянство - изменчивость.

В процессе построения эссе необходимо помнить, что один параграф должен содержать только одно утверждение и соответствующее доказательство, подкрепленное графическим и иллюстративным материалом. Следовательно, наполняя содержанием разделы аргументацией (соответствующей подзаголовкам), необходимо в пределах параграфа ограничить себя рассмотрением одной главной мысли.

Хорошо проверенный (и для большинства — совершено необходимый) способ построения любого эссе - использование подзаголовков для обозначения ключевых моментов аргументированного изложения: это помогает посмотреть на то, что предполагается сделать (и ответить на вопрос, хорош ли замысел). Такой подход поможет следовать точно определенной цели в данном исследовании. Эффективное использование подзаголовков - не только обозначение основных пунктов, которые необходимо осветить.

Их последовательность может также свидетельствовать о наличии или отсутствии логичности в освещении темы.

4. *Заключение* - обобщения и аргументированные выводы по теме с указанием области ее применения и т.д. Подытоживает эссе или еще раз вносит пояснения, подкрепляет смысл и значение изложенного в основной части. Методы, рекомендуемые для составления заключения: повторение, иллюстрация, цитата, впечатляющее утверждение. Заключение может содержать такой очень важный, дополняющий эссе элемент, как указание на применение (импликацию) исследования, не исключая взаимосвязи с другими проблемами.

Структура аппарата доказательств, необходимых для написания эссе

Доказательство - это совокупность логических приемов обоснования истинности какого-либо суждения с помощью других истинных и связанных с ним суждений. Оно связано с убеждением, но не тождественно ему: аргументация или доказательство должны основываться на данных науки и общественно-исторической практики, убеждения же могут быть основаны на предрассудках, неосведомленности людей в вопросах экономики и политики, видимости доказательности. Другими словами, доказательство или аргументация - это рассуждение, использующее факты, истинные суждения, научные данные и убеждающее нас в истинности того, о чем идет речь.

Структура любого доказательства включает в себя три составляющие: тезис, аргументы и выводы или оценочные суждения.

Тезис - это положение (суждение), которое требуется доказать. *Аргументы* - это категории, которыми пользуются при доказательстве истинности тезиса. *Вывод* - это мнение, основанное на анализе фактов. *Оценочные суждения* - это мнения, основанные на наших убеждениях, верованиях или взглядах. *Аргументы* обычно делятся на следующие группы:

1. *Удостоверенные факты* — фактический материал (или статистические данные).
2. *Определения* в процессе аргументации используются как описание понятий, связанных с тезисом.
3. *Законы* науки и ранее доказанные теоремы тоже могут использоваться как аргументы доказательства.

Требования к фактическим данным и другим источникам

При написании эссе чрезвычайно важно то, как используются эмпирические данные и другие источники (особенно качество чтения). Все (фактические) данные соотносятся с конкретным временем и местом, поэтому прежде, чем их использовать, необходимо убедится в том, что они соответствуют необходимому для исследований времени и месту. Соответствующая спецификация данных по времени и месту — один из способов, который может предотвратить чрезмерное обобщение, результатом которого может, например, стать предположение о том, что все страны по некоторым важным аспектам одинаковы (если вы так полагаете, тогда это должно быть доказано, а не быть голословным утверждением).

Всегда можно избежать чрезмерного обобщения, если помнить, что в рамках эссе используемые данные являются иллюстративным материалом, а не заключительным актом, т.е. они подтверждают аргументы и рассуждения и свидетельствуют о том, что автор умеет использовать данные должным образом. Нельзя забывать также, что данные, касающиеся спорных вопросов, всегда подвергаются сомнению. От автора не ждут определенного или окончательного ответа. Необходимо понять сущность фактического материала, связанного с этим вопросом (соответствующие индикаторы? насколько надежны данные для построения таких индикаторов? к какому заключению можно прийти на основании имеющихся данных и индикаторов относительно причин и следствий? и т.д.), и продемонстрировать это в эссе. Нельзя ссылаться на работы, которые автор эссе не читал сам.

Как подготовить и написать эссе?

Качество любого эссе зависит от трех взаимосвязанных составляющих, таких как:

1. Исходный материал, который будет использован (конспекты прочитанной литературы, лекций, записи результатов дискуссий, собственные соображения и накопленный опыт по данной проблеме).

2. Качество обработки имеющегося исходного материала (его организация, аргументация и доводы).

3. Аргументация (насколько точно она соотносится с поднятыми в эссе проблемами).

Процесс написания эссе можно разбить на несколько стадий: обдумывание - планирование - написание - проверка - правка.

Планирование - определение цели, основных идей, источников информации, сроков окончания и представления работы.

Цель должна определять действия.

Идеи, как и цели, могут быть конкретными и общими, более абстрактными. Мысли, чувства, взгляды и представления могут быть выражены в форме аналогий, ассоциации, предположений, рассуждений, суждений, аргументов, доводов и т.д.

Аналогии - выявление идеи и создание представлений, связь элементов значений.

Ассоциации - отражение взаимосвязей предметов и явлений действительности в форме закономерной связи между нервно - психическими явлениями (в ответ на тот или иной словесный стимул выдать «первую пришедшую в голову» реакцию).

Предположения - утверждение, не подтвержденное никакими доказательствами.

Рассуждения - формулировка и доказательство мнений.

Аргументация - ряд связанных между собой суждений, которые высказываются для того, чтобы убедить читателя (слушателя) в верности (истинности) тезиса, точки зрения, позиции.

Суждение - фраза или предложение, для которого имеет смысл вопрос: истинно или ложно?

Доводы - обоснование того, что заключение верно абсолютно или с какой-либо долей вероятности. В качестве доводов используются факты, ссылки на авторитеты, заведомо истинные суждения (законы, аксиомы и т.п.), доказательства (прямые, косвенные, «от противного», «методом исключения») и т.д.

Перечень, который получится в результате перечисления идей, поможет определить, какие из них нуждаются в особенной аргументации.

*Источники***.** Тема эссе подскажет, где искать нужный материал. Обычно пользуются библиотекой, Интернет-ресурсами, словарями, справочниками. Пересмотр означает редактирование текста с ориентацией на качество и эффективность.

Качество текста складывается из четырех основных компонентов: ясности мысли, внятности, грамотности и корректности.

Мысль - это содержание написанного. Необходимо четко и ясно формулировать идеи, которые хотите выразить, в противном случае вам не удастся донести эти идеи и сведения до окружающих.

Внятность - это доступность текста для понимания. Легче всего ее можно достичь, пользуясь логично и последовательно тщательно выбранными словами, фразами и взаимосвязанными абзацами, раскрывающими тему.

Грамотность отражает соблюдение норм грамматики и правописания. Если в чем-то сомневаетесь, загляните в учебник, справьтесь в словаре или руководстве по стилистике или дайте прочитать написанное человеку, чья манера писать вам нравится.

Корректность — это стиль написанного. Стиль определятся жанром, структурой работы, целями, которые ставит перед собой пишущий, читателями, к которым он обращается.

5. Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям

Семинар представляет собой комплексную форму и завершающее звено в изучении определенных тем, предусмотренных программой учебной дисциплины. Комплексность данной формы занятий определяется тем, что в ходе её проведения сочетаются выступления обучающихся и преподавателя: рассмотрение обсуждаемой проблемы и анализ различных, часто дискуссионных позиций; обсуждение мнений обучающихся и разъяснение (консультация) преподавателя; углубленное изучение теории и приобретение навыков умения ее использовать в практической работе.

По своему назначению семинар, в процессе которого обсуждается та или иная научная проблема, способствует:

- углубленному изучению определенного раздела учебной дисциплины, закреплению знаний;
- отработке методологии и методических приемов познания;
- выработке аналитических способностей, умения обобщения и формулирования выводов;
- приобретению навыков использования научных знаний в практической деятельности;
- выработке умения кратко, аргументированно и ясно излагать обсуждаемые вопросы;
- осуществлению контроля преподавателя за ходом обучения.

Семинары представляет собой *дискуссию* в пределах обсуждаемой темы (проблемы). Дискуссия помогает участникам семинара приобрести более совершенные знания, проникнуть в суть изучаемых проблем. Выработать методологию, овладеть методами анализа социально-экономических процессов. Обсуждение должно носить творческий характер с четкой и убедительной аргументацией.

По своей структуре семинар начинается со вступительного слова преподавателя, в котором кратко излагаются место и значение обсуждаемой темы (проблемы) в данной дисциплине, напоминаются порядок и направления ее обсуждения. Конкретизируется ранее известный обучающимся план проведения занятия. После этого начинается процесс обсуждения вопросов обучающимися. Завершается занятие подведением итогоа обсуждения, заключительным словом преподавателя.

Проведение семинарских занятий в рамках учебной группы (20 - 25 человек) позволяет обеспечить активное участие в обсуждении проблемы всех присутствующих.

По ходу обсуждения темы помните, что изучение теории должно быть связано с определением (выработкой) средств, путей применения теоретических положений в практической деятельности, например, при выполнении функций государственного служащего. В то же время важно не свести обсуждение научной проблемы только к пересказу случаев из практики работы, к критике имеющих место недостатков. Дискуссии имеют важное значение: учат дисциплине ума, умению выступать по существу, мыслить логически, выделяя главное, критически оценивать выступления участников семинара.

В процессе проведения семинара обучающиеся могут использовать разнообразные по своей форме и характеру пособия, демонстрируя фактический, в том числе статистический материал, убедительно подтверждающий теоретические выводы и положения. В завершение обсудите результаты работы семинара и сделайте выводы, что хорошо усвоено, а над чем следует дополнительно поработать.

В целях эффективности семинарских занятий необходима обстоятельная подготовка к их проведению. В начале семестра (учебного года) возьмите в библиотеке необходимые методические материалы для своевременной подготовки к семинарам. Готовясь к конкретной теме занятия следует ознакомиться с новыми официальными документами, статьями в периодических журналах, вновь вышедшими монографиями.

6. Методические рекомендации по подготовке к дискуссии

Современная практика предлагает широкий круг типов семинарских занятий. Среди них особое место занимает *семинар-дискуссия,* где в диалоге хорошо усваивается новая информация, видны убеждения студента, обсуждаются противоречия (явные и скрытые) и недостатки. Для обсуждения берутся конкретные актуальные вопросы, с которыми студенты предварительно ознакомлены. Дискуссия является одной из наиболее эффективных технологий группового взаимодействия, обладающей особыми возможностями в обучении, развитии и воспитании будущего специалиста.

Дискуссия (от лат. discussio - рассмотрение, исследование) - способ организации совместной деятельности с целью интенсификации процесса принятия решений в группе посредством обсуждения какого-либо вопроса или проблемы.

Дискуссия обеспечивает активное включение студентов в поиск истины; создает условия для открытого выражения ими своих мыслей, позиций, отношений к обсуждаемой теме и обладает особой возможностью воздействия на установки ее участников в процессе группового взаимодействия. Дискуссию можно рассматривать как *метод интерактивного обучения* и как особую технологию, включающую в себя другие методы и приемы обучения: «мозговой штурм», «анализ ситуаций» и т.д.

Обучающий эффект дискуссии определяется предоставляемой участнику возможностью получить разнообразную информацию от собеседников, продемонстрировать и повысить свою компетентность, проверить и уточнить свои представления и взгляды на обсуждаемую проблему, применить имеющиеся знания в процессе совместного решения учебных и профессиональных задач.

Развивающая функция дискуссии связана со стимулированием творчества обучающихся, развитием их способности к анализу информации и аргументированному, логически выстроенному доказательству своих идей и взглядов, с повышением коммуникативной активности студентов, их эмоциональной включенности в учебный процесс.

Влияние дискуссии на личностное становление студента обусловливается ее целостно - ориентирующей направленностью, созданием благоприятных условий для проявления индивидуальности, самоопределения в существующих точках зрения на определенную проблему, выбора своей позиции; для формирования умения взаимодействовать с другими, слушать и слышать окружающих, уважать чужие убеждения, принимать оппонента, находить точки соприкосновения, соотносить и согласовывать свою позицию с позициями других участников обсуждения.

Безусловно, наличие оппонентов, противоположных точек зрения всегда обостряет дискуссию, повышает ее продуктивность, позволяет создавать с их помощью конструктивный конфликт для более эффективного решения обсуждаемых проблем.

Существует несколько видов дискуссий, использование того или иного типа дискуссии зависит от характера обсуждаемой проблемы и целей дискуссии.

Дискуссия- диалог чаще всего применяется для совместного обсуждения учебных и производственных проблем, решение которых может быть достигнуто путем взаимодополнения, группового взаимодействия по принципу «индивидуальных вкладов» или на основе согласования различных точек зрения, достижения консенсуса.

Дискуссия - спор используется для всестороннего рассмотрения сложных проблем, не имеющих однозначного решения даже в науке, социальной, политической жизни, производственной практике и т.д. Она построена на принципе «позиционного противостояния» и ее цель - не столько решить проблему, сколько побудить участников дискуссии задуматься над проблемой, уточнить и определить свою позицию; научить аргументировано отстаивать свою точку зрения и в то же время осознать право других иметь свой взгляд на эту проблему, быть индивидуальностью.

Условия эффективного проведения дискуссии:

- информированность и подготовленность студентов к дискуссии,

- свободное владение материалом, привлечение различных источников для аргументации отстаиваемых положений;

- правильное употребление понятий, используемых в дискуссии, их единообразное понимание;

- корректность поведения, недопустимость высказываний, задевающих личность оппонента; установление регламента выступления участников;

- полная включенность группы в дискуссию, участие каждого студента в ней.

Подготовка студентов к дискуссии: если тема объявлена заранее, то следует ознакомиться с указанной литературой, необходимыми справочными материалами, продумать свою позицию, четко сформулировать аргументацию, выписать цитаты, мнения специалистов.

В проведении дискуссии выделяется несколько этапов.

Этап 1-й, введение в дискуссию: формулирование проблемы и целей дискуссии; определение значимости проблемы, совместная выработка правил дискуссии; выяснение однозначности понимания темы дискуссии, используемых в ней терминов, понятий.

Этап 2-й, обсуждение проблемы: обмен участниками мнениями по каждому вопросу. Цель этапа - собрать максимум мнений, идей, предложений, соотнося их друг с другом.

Этап 3-й, подведение итогов обсуждения: выработка студентами согласованного мнения и принятие группового решения.

Далее подводятся итоги дискуссии, заслушиваются и защищаются проектные задания. После этого проводится "мозговой штурм" по нерешенным проблемам дискуссии, а также выявляются прикладные аспекты, которые можно рекомендовать для включения в курсовые и дипломные работы или в апробацию на практике.

Семинары-дискуссии проводятся с целью выявления мнения студентов по актуальным и проблемным вопросам.

7. Методические рекомендации по написанию реферата

Слово "реферат" (от латинского – referre – докладывать, сообщать) означает сжатое изложение в устной или письменной форме содержания какого–либо вопроса или темы на основе критического обзора информации.

Написание реферата - вид самостоятельной работы студента, содержащий информацию, дополняющую и развивающую основную тему, изучаемую на аудиторных занятиях. Реферат может включать обзор нескольких источников и служить основой для доклада на семинарах, конференциях.

При подготовке реферата необходимо соблюдать следующие правила.

Ясно и четко сформулировать цель и задачи реферата, отражающие тему или решение проблемы.

Найти литературу по выбранной теме; составить перечень источников, обязательных к прочтению.

Только после предварительной подготовки следует приступать к написанию реферата. Прежде всего, составить план, выделить в нем части.

Введение. В этом разделе раскрывается цель и задачи работы; здесь необходимо сформулировать проблему, которая будет проанализирована в реферате, изложить своё отношение к ней, то есть мотивацию выбора; определить особенность постановки данной проблемы авторами изученной литературы; объяснить актуальность и социальную значимость выбранной темы.

Основная часть. Разделы, главы, параграфы основной части должны быть направлены на рассмотрение узловых моментов в теме реферата. Изложение содержания изученной литературы предполагает его критическое осмысление, глубокий логический анализ.

Каждый раздел основной части реферата предполагает детальное изучение отдельного вопроса темы и последовательное изложение структуры текстового материала с обязательными ссылками на первоисточник. В целом, содержание основной части должно отражать позиции отдельных авторов, сравнительную характеристику этих позиций, выделение узловых вопросов дискурса по выбранной для исследования теме.

Заключение. В заключении автор реферата должен сформулировать личную позицию в отношении изученной проблемы и предложить, может быть, свои способы её решения. Целесообразно сделать общие выводы по теме реферата и ещё раз отметить её актуальность и социальную значимость.

Список использованных источников и литературы.

Написание рефератов является одной из форм обучения студентов, направленной на организацию и повышение уровня самостоятельной работы, а также на усиление контроля за этой работой.

В отличие от теоретических семинаров, при проведении которых приобретаются, в частности, навыки высказывания своих суждений и изложения мнений других авторов в устной форме, написание рефератов формирует навыки изложения своих мыслей в письменной форме грамотным языком, хорошим стилем.

В зависимости от содержания и назначения в учебном процессе рефераты можно подразделить на два основных типа: научно-проблемные и обзорно-информационные.

Научно-проблемный реферат. При написании такого реферата следует изучить и кратко изложить имеющиеся в литературе суждения по определенному, спорному в теории, вопросу (проблеме) по данной теме, высказать по этому вопросу (проблеме) собственную точку зрения с соответствующим ее обоснованием.

Обзорно-информационный реферат. Разновидностями такого реферата могут быть следующие:

1) краткое изложение основных положений той или иной книги, монографии, содержащих материалы, относящиеся к изучаемой теме по курсу дисциплины;

2) подбор и краткое изложение содержания статей по определенной проблеме (теме, вопросу), опубликованных в различных журналах за определенный период, либо в сборниках («научных трудах», «ученых записках» и т.д.).

Темы рефератов определяются преподавателем. Литература либо рекомендуется преподавателем, либо подбирается аспирантами самостоятельно, что является одним из элементов самостоятельной работы.

Объем реферата должен быть в пределах 15 страниц машинописного текста через 1,5 интервала. При оформлении реферата необходимо ориентироваться на правила и установленные стандарты для учебных и научных работ.

Реферат сдается в указанные преподавателем сроки.

Критерии оценивания:

- достижение поставленной цели и задач исследования (новизна и актуальность поставленных в реферате проблем, правильность формулирования цели, определения задач исследования, правильность выбора методов решения задач и реализации цели; соответствие выводов решаемым задачам, поставленной цели, убедительность выводов);
- уровень эрудированности автора по изученной теме (знание автором состояния изучаемой проблематики, цитирование источников, степень использования в работе результатов исследований);
- личные заслуги автора реферата (новые знания, которые получены помимо основной образовательной программы, новизна материала и рассмотренной проблемы, научное значение исследуемого вопроса);
- культура письменного изложения материала (логичность подачи материала, грамотность автора);
- культура оформления материалов работы (соответствие реферата всем стандартным требованиям);
- знания и умения на уровне требований стандарта данной дисциплины: знание фактического материала, усвоение общих понятий и идей;
- степень обоснованности аргументов и обобщений (полнота, глубина, всестороннее раскрытие темы, корректность аргументации и системы доказательств, характер и достоверность примеров, иллюстративного материала, наличие знаний интегрированного характера, способность к обобщению);
- качество и ценность полученных результатов (степень завершенности реферативного исследования, спорность или однозначность выводов);
- корректное использование литературных источников, грамотное оформление ссылок.

8. Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов

Экзамен - одна из важнейших частей учебного процесса, имеющая огромное значение.

Во-первых, готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, семинарах, практических и лабораторных занятиях, разбирается в том, что осталось непонятным, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью. А это чрезвычайно важно для будущего специалиста.

Во-вторых, каждый хочет быть волевым и сообразительным., выдержанным и целеустремленным, иметь хорошую память, научиться быстро находить наиболее рациональное решение в трудных ситуациях. Очевидно, что все эти качества не только украшают человека, но и делают его наиболее действенным членом коллектива. Подготовка и сдача экзамена помогают студенту глубже усвоить изучаемые дисциплины, приобрести навыки и качества, необходимые хорошему специалисту.

Конечно, успех на экзамене во многом обусловлен тем, насколько систематически и глубоко работал студент в течение семестра. Совершенно очевидно, что серьезно продумать и усвоить содержание изучаемых дисциплин за несколько дней подготовки к экзамену просто невозможно даже для очень способного студента. И, кроме того, хорошо известно, что быстро выученные на память разделы учебной дисциплины так же быстро забываются после сдачи экзамена.

При подготовке к экзамену студенты не только повторяют и дорабатывают материал дисциплины, которую они изучали в течение семестра, они обобщают полученные знания, осмысливают методологию предмета, его систему, выделяют в нем основное и главное, воспроизводят общую картину с тем, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины. Вся эта обобщающая работа проходит в условиях напряжения воли и сознания, при значительном отвлечении от повседневной жизни, т. е. в условиях, благоприятствующих пониманию и запоминанию.

Подготовка к экзаменам состоит в приведении в порядок своих знаний. Даже самые способные студенты не в состоянии в короткий период зачетно-экзаменационной сессии усвоить материал целого семестра, если они над ним не работали в свое время. Для тех, кто мало занимался в семестре, экзамены принесут мало пользы: что быстро пройдено, то быстро и забудется. И хотя в некоторых случаях студент может «проскочить» через экзаменационный барьер, в его подготовке останется серьезный пробел, трудно восполняемый впоследствии.

Определив назначение и роль экзаменов в процессе обучения, попытаемся на этой основе пояснить, как лучше готовиться к ним.

Экзаменам, как правило, предшествует защита курсовых работ (проектов) и сдача зачетов. К экзаменам допускаются только студенты, защитившие все курсовые работы проекты) и сдавшие все зачеты. В вузе сдача зачетов организована так, что при систематической работе в течение семестра, своевременной и успешной сдаче всех текущих работ, предусмотренных графиком учебного процесса, большая часть зачетов не вызывает повышенной трудности у студента. Студенты, работавшие в семестре по плану, подходят к экзаменационной сессии без напряжения, без излишней затраты сил в последнюю, «зачетную» неделю.

Подготовку к экзамену следует начинать с первого дня изучения дисциплины. Как правило, на лекциях подчеркиваются наиболее важные и трудные вопросы или разделы дисциплины, требующие внимательного изучения и обдумывания. Нужно эти вопросы выделить и обязательно постараться разобраться в них, не дожидаясь экзамена, проработать их, готовясь к семинарам, практическим или лабораторным занятиям, попробовать самостоятельно решить несколько типовых задач. И если, несмотря на это, часть материала осталась неусвоенной, ни в коем случае нельзя успокаиваться, надеясь на то, что это не попадется на экзамене. Факты говорят об обратном; если те или другие

вопросы учебной дисциплины не вошли в экзаменационный билет, преподаватель может их задать (и часто задает) в виде дополнительных вопросов.

Точно такое же отношение должно быть выработано к вопросам и задачам, перечисленным в программе учебной дисциплины, выдаваемой студентам в начале семестра. Обычно эти же вопросы и аналогичные задачи содержатся в экзаменационных билетах. Не следует оставлять без внимания ни одного раздела дисциплины: если не удалось в чем-то разобраться самому, нужно обратиться к товарищам; если и это не помогло выяснить какой-либо вопрос до конца, нужно обязательно задать этот вопрос преподавателю на предэкзаменационной консультации. Чрезвычайно важно приучить себя к умению самостоятельно мыслить, учиться думать, понимать суть дела. Очень полезно после проработки каждого раздела восстановить в памяти содержание изученного материала. кратко записав это на листе бумаги. создать карту памяти (умственную карту), изобразить необходимые схемы и чертежи (логико-графические схемы), например, отобразить последовательность вывода теоремы или формулы. Если этого не сделать, то большая часть материала останется не понятой, а лишь формально заученной, и при первом же вопросе экзаменатора студент убедится в том, насколько поверхностно он усвоил материал.

В период экзаменационной сессии происходит резкое изменение режима работы, отсутствует посещение занятий по расписанию. При всяком изменении режима работы очень важно скорее приспособиться к новым условиям. Поэтому нужно сразу выбрать такой режим работы, который сохранился бы в течение всей сессии, т. е. почти на месяц. Необходимо составить для себя новый распорядок дня, чередуя занятия с отдыхом. Для того чтобы сократить потерю времени на включение в работу, рабочие периоды целесообразно делать длительными, разделив день примерно на три части: с утра до обеда, с обеда до ужина и от ужина до сна.

Каждый рабочий период дня надо заканчивать отдыхом. Наилучший отдых в период экзаменационной сессии - прогулка, кратковременная пробежка или какой-либо неутомительный физический труд.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программа учебной дисциплины и студенческий конспект, которые указывают, что наиболее важно знать и уметь делать. Основной материал должен прорабатываться по учебнику (если такой имеется) и учебным пособиям, так как конспекта далеко недостаточно для изучения дисциплины. Учебник должен быть изучен в течение семестра, а перед экзаменом сосредоточьте внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением по памяти его краткого содержания в логической последовательности.

За один - два дня до экзамена назначается консультация. Если ее правильно использовать, она принесет большую пользу. Во время консультации студент имеет полную возможность получить ответ на нее ни ясные ему вопросы. А для этого он должен проработать до консультации все темы дисциплины. Кроме того, преподаватель будет отвечать на вопросы других студентов, что будет для вас повторением и закреплением знаний. И еще очень важное обстоятельство: преподаватель на консультации, как правило, обращает внимание на те вопросы, по которым на предыдущих экзаменах ответы были неудовлетворительными, а также фиксирует внимание на наиболее трудных темах дисциплины. Некоторые студенты не приходят на консультации либо потому, что считают, что у них нет вопросов к преподавателю, либо полагают, что у них и так мало времени и лучше самому прочитать материал в конспекте или и учебнике. Это глубокое заблуждение. Никакая другая работа не сможет принести столь значительного эффекта накануне экзамена, как консультация преподавателя.

Но консультация не может возместить отсутствия длительной работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На консультации студент получает ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы и,

следовательно, дорабатывается материал. Консультации рекомендуется посещать, подготовив к ним все вопросы, вызывающие сомнения. Если студент придет на консультацию, не проработав всего материала, польза от такой консультации будет невелика.

Итак, *основные советы* для подготовки к сдаче зачетов и экзаменов состоят в следующем:

- лучшая подготовка к зачетам и экзаменам - равномерная работа в течение всего семестра;
- используйте программы учебных дисциплин - это организует вашу подготовку к зачетам и экзаменам;
- учитывайте, что для полноценного изучения учебной дисциплины необходимо время;
- составляйте планы работы во времени;
- работайте равномерно и ритмично;
- курсовые работы (проекты) желательно защищать за одну - две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии;
- все зачеты необходимо сдавать до начала экзаменационной сессии;
- помните, что конспект не заменяет учебник и учебные пособия, а помогает выбрать из него основные вопросы и ответы;
- при подготовке наибольшее внимание и время уделяйте трудным и непонятным вопросам учебной дисциплины;
- грамотно используйте консультации;
- соблюдайте правильный режим труда и отдыха во время сессии, это сохранит работоспособность и даст хорошие результаты;
- учитесь владеть собой на зачете и экзамене;
- учитесь точно и кратко передавать свои мысли, поясняя их, если нужно, логико-графическими схемами.

Очень важным условием для правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальный сон, иначе в день экзамена не будет чувства бодрости и уверенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания по выполнению самостоятельной работы обучающихся являются неотъемлемой частью процесса обучения в вузе. Правильная организация самостоятельной работы позволяет обучающимся развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, способствует формированию навыков совершенствования профессионального мастерства. Также внеаудиторное время включает в себя подготовку к аудиторным занятиям и изучение отдельных тем, расширяющих и углубляющих представления обучающихся по разделам изучаемой дисциплины.

Таким образом, обучающийся используя методические указания может в достаточном объеме усвоить и успешно реализовать конкретные знания, умения, навыки и получить опыт при выполнении следующих условий:

1) систематическая самостоятельная работа по закреплению полученных знаний и навыков;

2) добросовестное выполнение заданий;

3) выяснение и уточнение отдельных предпосылок, умозаключений и выводов, содержащихся в учебном курсе;

4) сопоставление точек зрения различных авторов по затрагиваемым в учебном курсе проблемам; выявление неточностей и некорректного изложения материала в периодической и специальной литературе;

5) периодическое ознакомление с последними теоретическими и практическими достижениями в области управления персоналом;

6) проведение собственных научных и практических исследований по одной или нескольким актуальным проблемам для *HR*;

7) подготовка научных статей для опубликования в периодической печати, выступление на научно-практических конференциях, участие в работе студенческих научных обществ, круглых столах и диспутах по проблемам управления персоналом.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется преподавателем в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально - ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

2. Методические рекомендации по написанию реферата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hse.spb.ru/edu/recommendations/method-referat-2005.phtml

3. Фролова Н. А. Реферирование и аннотирование текстов по специальности (на материале немецкого языка): Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. - С.5.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

КОММУНИКАТИВНАЯ КУЛЬТУРА ЛИЧНОСТИ

Автор: Гладкова И. В., доцент, канд. филос. н.

Екатеринбург, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Методические рекомендации по работе с текстом лекций	5
2	Методические рекомендации по подготовке к опросу	8
3	Методические рекомендации по подготовке доклада (презентации)	9
4	Методические рекомендации по написанию эссе	11
5	Методические рекомендации по подготовке к семинарским занятиям	14
6	Методические рекомендации по подготовке к дискуссии	15
7	Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов	17
	Заключение	20
	Список использованных источников	21

ВВЕДЕНИЕ

Инициативная самостоятельная работа студента есть неотъемлемая составная часть учебы в вузе. В современном формате высшего образования значительно возрастает роль самостоятельной работы студента. Правильно спланированная и организованная самостоятельная работа обеспечивает достижение высоких результатов в учебе.

Самостоятельная работа студента (СРС) - это планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия, при сохранении ведущей роли студентов.

Целью СРС является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками по профилю будущей специальности, опытом творческой, исследовательской деятельности, развитие самостоятельности. Ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровней. Самостоятельная работа студента – важнейшая составная часть учебного процесса, обязательная для каждого студента, объем которой определяется учебным планом. Методологическую основу СРС составляет деятельностный подход, при котором цели обучения ориентированы на формирование умений решать типовые и нетиповые задачи, т. е. на реальные ситуации, в которых студентам надо проявить знание конкретной дисциплины. Предметно и содержательно СРС определяется государственным образовательным стандартом, действующими учебными планами и образовательными программами различных форм обучения, рабочими программами учебных дисциплин, средствами обеспечения СРС: учебниками, учебными пособиями и методическими руководствами, учебно-программными комплексами и т.д.

Самостоятельная работа студентов может рассматриваться как организационная форма обучения - система педагогических условий, обеспечивающих управление учебной деятельностью студентов по освоению знаний и умений в области учебной и научной деятельности без посторонней помощи.

Самостоятельная работа студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развития исследовательских умений;
- получения навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

Самостоятельная работа студента - это особым образом организованная деятельность, включающая в свою структуру такие компоненты, как:

- уяснение цели и поставленной учебной задачи;
- четкое и системное планирование самостоятельной работы;
- поиск необходимой учебной и научной информации;

- освоение информации и ее логическая переработка;
- использование методов исследовательской, научно-исследовательской работы для решения поставленных задач;
- выработка собственной позиции по поводу полученной задачи;
- представление, обоснование и защита полученного решения;
- проведение самоанализа и самоконтроля.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы: аудиторная и внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию: текущие консультации, коллоквиум, прием и разбор домашних заданий и другие.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия: подготовка презентаций, составление глоссария, подготовка к практическим занятиям, подготовка рецензий, аннотаций на статью, подготовка к дискуссиям, круглым столам.

СРС может включать следующие формы работ:

- изучение лекционного материала;
- работа с источниками литературы: поиск, подбор и обзор литературы и электронных источников информации по заданной проблеме курса;
- выполнение домашних заданий, выдаваемых на практических занятиях: тестов, докладов, контрольных работ и других форм текущего контроля;
- изучение материала, вынесенного на самостоятельное изучение; подготовка к практическим занятиям;
- подготовка к контрольной работе или коллоквиуму;
- подготовка к зачету, экзамену, другим аттестациям;
- написание реферата, эссе по заданной проблем;
- выполнение расчетно-графической работы;
- выполнение выполнение курсовой работы или проекта;
- анализ научной публикации по определенной преподавателем теме, ее реферирование;
- исследовательская работа и участие в научных студенческих конференциях, семинарах и олимпиадах.

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета /экзамена, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения. Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентов online и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

Подготовка к самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

.

1. Методические рекомендации по работе с текстом лекций

На лекционных занятиях необходимо конспектировать учебный материал. Обращать внимание на формулировки, определения, раскрывающие содержание тех или иных понятий, научные выводы и практические рекомендации, положительный опыт в ораторском мастерстве. Внимательное слушание и конспектирование лекций предполагает интенсивную умственную деятельность студента, и помогает усвоить учебный материал.

Желательно оставлять в рабочих конспектах поля, на которых делать пометки, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений, фиксировать вопросы, вызывающие личный интерес, варианты ответов на них, сомнения, проблемы, спорные положения. Рекомендуется вести записи на одной стороне листа, оставляя вторую сторону для размышлений, разборов, вопросов, ответов на них, для фиксирования деталей темы или связанных с ней фактов, которые припоминаются самим студентом в ходе слушания.

Слушание лекций - сложный вид интеллектуальной деятельности, успех которой обусловлен *умением слушать*, и стремлением воспринимать материал, нужное записывая в тетрадь. Запись лекции помогает сосредоточить внимание на главном, в ходе самой лекции продумать и осмыслить услышанное, осознать план и логику изложения материала преподавателем.

Такая работа нередко вызывает трудности у студентов: некоторые стремятся записывать все дословно, другие пишут отрывочно, хаотично. Чтобы избежать этих ошибок, целесообразно придерживаться ряда правил.

1. После записи ориентирующих и направляющих внимание данных (тема, цель, план лекции, рекомендованная литература) важно попытаться проследить, как они раскрываются в содержании, подкрепляются формулировками, доказательствами, а затем и выводами.

2. Записывать следует основные положения и доказывающие их аргументы, наиболее яркие примеры и факты, поставленные преподавателем вопросы для самостоятельной проработки.

3. Стремиться к четкости записи, ее последовательности, выделяя темы, подтемы, вопросы и подвопросы, используя цифровую и буквенную нумерацию (римские и арабские цифры, большие и малые буквы), красные строки, выделение абзацев, подчеркивание главного и т.д.

Форма записи материала может быть различной - в зависимости от специфики изучаемого предмета. Это может быть стиль учебной программы (назывные предложения), уместны и свои краткие пояснения к записям.

Студентам не следует подробно записывать на лекции «все подряд», но обязательно фиксировать то, что преподаватели диктуют – это базовый конспект, содержащий основные положения лекции: определения, выводы, параметры, критерии, аксиомы, постулаты, парадигмы, концепции, ситуации, а также мысли-маяки (ими часто являются афоризмы, цитаты, остроумные изречения). Запись лекции лучше вести в сжатой форме, короткими и четкими фразами. Каждому студенту полезно выработать свою систему сокращений, в которой он мог бы разобраться легко и безошибочно.

Даже отлично записанная лекция предполагает дальнейшую самостоятельную работу над ней (осмысление ее содержания, логической структуры, выводов). С целью доработки конспекта лекции необходимо в первую очередь прочитать записи, восстановить текст в памяти, а также исправить описки, расшифровать не принятые ранее сокращения, заполнить пропущенные места, понять текст, вникнуть в его смысл. Далее прочитать материал по рекомендуемой литературе, разрешая в ходе чтения возникшие ранее затруднения, вопросы, а также дополняя и исправляя свои записи. В ходе доработки конспекта углубляются, расширяются и закрепляются знания, а также дополняется, исправляется и совершенствуется конспект. Доработанный конспект и

рекомендуемая литература используется при подготовке к практическому занятию. Знание лекционного материала при подготовке к практическому занятию обязательно.

Особенно важно в процессе самостоятельной работы над лекцией выделить новый понятийный аппарат, уяснить суть новых понятий, при необходимости обратиться к словарям и другим источникам, заодно устранив неточности в записях. Главное - вести конспект аккуратно и регулярно, только в этом случае он сможет стать подспорьем в изучении дисциплины.

Работа над лекцией стимулирует самостоятельный поиск ответов на самые различные вопросы: над какими понятиями следует поработать, какие обобщения сделать, какой дополнительный материал привлечь.

Важным средством, направляющим самообразование, является выполнение различных заданий по тексту лекции, например, составление ее развернутого плана или тезисов; ответы на вопросы проблемного характера, (скажем, об основных тенденциях развития той или иной проблемы); составление проверочных тесты по проблеме, написание по ней реферата, составление графических схем.

По своим задачам лекции могут быть разных жанров: *установочная лекция* вводит в изучение курса, предмета, проблем (что и как изучать), а *обобщающая лекция* позволяет подвести итог (зачем изучать), выделить главное, усвоить законы развития знания, преемственности, новаторства, чтобы применить обобщенный позитивный опыт к решению современных практических задач. Обобщающая лекция ориентирует в истории и современном состоянии научной проблемы.

В процессе освоения материалов обобщающих лекций студенты могут выполнять задания разного уровня. Например: задания *репродуктивного* уровня (составить развернутый план обобщающей лекции, составить тезисы по материалам лекции); задания *продуктивного* уровня (ответить на вопросы проблемного характера, составить опорный конспект по схеме, выявить основные тенденции развития проблемы); задания *творческого* уровня (составить проверочные тесты по теме, защитить реферат и графические темы по данной проблеме). Обращение к ранее изученному материалу не только помогает восстановить в памяти известные положения, выводы, но и приводит разрозненные знания в систему, углубляет и расширяет их. Каждый возврат к старому материалу позволяет найти в нем что-то новое, переосмыслить его с иных позиций, определить для него наиболее подходящее место в уже имеющейся системе знаний.

.

2. Методические указания по подготовке к опросу

Самостоятельная работа обучающихся включает подготовку к устному или письменному опросу на семинарских занятиях. Для этого обучающийся изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

Письменный опрос

Письменный опрос является одной из форм текущего контроля успеваемости студента. При изучении материала студент должен убедиться, что хорошо понимает основную терминологию темы, умеет ее использовать в нужном контексте. Желательно составить краткий конспект ответа на предполагаемые вопросы письменной работы, чтобы убедиться в том, что студент владеет материалом и может аргументировано, логично и грамотно письменно изложить ответ на вопрос. Следует обратить особое внимание на написание профессиональных терминов, чтобы избегать грамматических ошибок в работе. При изучении новой для студента терминологии рекомендуется изготовить карточки, которые содержат новый термин и его расшифровку, что значительно облегчит работу над материалом.

Устный опрос

Целью устного собеседования являются обобщение и закрепление изученного курса. Студентам предлагаются для освещения сквозные концептуальные проблемы. При подготовке следует использовать лекционный материал и учебную литературу. Для более глубокого постижения курса и более основательной подготовки рекомендуется познакомиться с указанной дополнительной литературой. Готовясь к семинару, студент должен, прежде всего, ознакомиться с общим планом семинарского занятия. Следует внимательно прочесть свой конспект лекции по изучаемой теме и рекомендуемую к теме семинара литературу. С незнакомыми терминами и понятиями следует ознакомиться в предлагаемом глоссарии, словаре или энциклопедии [1].

Критерии качества устного ответа.

1. Правильность ответа по содержанию.
2. Полнота и глубина ответа.
3. Сознательность ответа (учитывается понимание излагаемого материала).
4. Логика изложения материала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться профессиональной терминологией).
5. Рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели).
6. Своевременность и эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе).
7. Использование дополнительного материала (приветствуется, но не обязательно для всех студентов).
8. Рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов)[2].

---

[1] Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

[2]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: http://priab.ru/images/metod_agro/Metod_Inostran_yazyk_35.03.04_Agro_15.01.2016.pdf

Ответ на каждый вопрос из плана семинарского занятия должен быть содержательным и аргументированным. Для этого следует использовать документы, монографическую, учебную и справочную литературу.

Для успешной подготовки к устному опросу, студент должен законспектировать рекомендуемую литературу, внимательно осмыслить лекционный материал и сделать выводы. Объем временина на подготовку к устному опросу зависимости от сложности темы и особенностей организации обучающимся своей самостоятельной работы.

3.Методические рекомендации по подготовке доклада (презентации)

Доклад – публичное сообщение по заданной теме, представляющее собой развернутое изложение на определенную тему, вид самостоятельной работы, который используется в учебных и внеаудиторных занятиях и способствует формированию навыков исследовательской работы, освоению методов научного познания, приобретению навыков публичного выступления, расширяет познавательные интересы, приучает критически мыслить.

При подготовке доклада используется дополнительная литература, систематизируется материал. Работа над докладом не только позволяет учащемуся приобрести новые знания, но и способствует формированию важных научно-исследовательских навыков самостоятельной работы с научной литературой, что повышает познавательный интерес к научному познанию.

Приветствуется использование мультимедийных технологий, подготовка докладов-презентаций.

Доклад должен соответствовать следующим требованиям:

- тема доклада должна быть согласованна с преподавателем и соответствовать теме занятия;

- иллюстрации (слайды в презентации) должны быть достаточными, но не чрезмерными;

- материалы, которыми пользуется студент при подготовке доклада-презентации, должны тсоответствовать научно-методическим требованиям ВУЗа и быть указаны в докладе;

- необходимо соблюдать регламент: 7-10 минут выступления.

Преподаватель может дать тему сразу нескольким студентам одной группы, по принципу: докладчик и оппонент. Студенты могут подготовить два выступления с противоположными точками зрения и устроить дискуссию по проблемной теме. Докладчики и содокладчики во многом определяют содержание, стиль, активность данного занятия, для этого необходимо:

- использовать технические средства;
- знать и хорошо ориентироваться в теме всей презентации (семинара);
- уметь дискутировать и быстро отвечать на вопросы;
- четко выполнять установленный регламент: докладчик - 7-10 мин.; содокладчик - 5 мин.; дискуссия - 10 мин;
- иметь представление о композиционной структуре доклада.

После выступления докладчик и содокладчик, должны ответить на вопросы слушателей.

В подготовке доклада выделяют следующие этапы:

1. Определение цели доклада: информировать, объяснить, обсудить что-то (проблему, решение, ситуацию и т. п.)

2. Подбор литературы, иллюстративных примеров.

3. Составление плана доклада, систематизация материала, композиционное оформление доклада в виде печатного /рукописного текста и электронной презентации.

Общая структура доклада

Построение доклада включает три части: вступление, основную часть и заключение.

Вступление.

Вступление должно содержать:

- название презентации (доклада);
- сообщение основной идеи;
- обоснование актуальности обсуждаемого вопроса;

- современную оценку предмета изложения;
- краткое перечисление рассматриваемых вопросов;
- живую интересную форму изложения;
- акцентирование оригинальности подхода.

Основная часть.

Основная часть состоит из нескольких разделов, постепенно раскрывающих тему. Возможно использование иллюстрации (графики, диаграммы, фотографии, карты, рисунки) Если необходимо, для обоснования темы используется ссылка на источники с доказательствами, взятыми из литературы (цитирование авторов, указание цифр, фактов, определений). Изложение материала должно быть связным, последовательным, доказательным.

Задача основной части - представить достаточно данных для того, чтобы слушатели и заинтересовались темой и захотели ознакомиться с материалами. При этом логическая структура теоретического блока не должны даваться без наглядных пособий, аудио-визуальных и визуальных материалов.

Заключение.

Заключение - это ясное четкое обобщение, в котором подводятся итоги, формулируются главные выводы, подчеркивается значение рассмотренной проблемы, предлагаются самые важные практические рекомендации. Требования к оформлению доклада. Объем машинописного текста доклада должен быть рассчитан на произнесение доклада в течение 7 -10 минут (3-5 машинописных листа текста с докладом).

Доклад оценивается по следующим критериям:

Критерии оценки доклада, сообщения	*Количество баллов*
Содержательность, информационная насыщенность доклада	1
Наличие аргументов	1
Наличие выводов	1
Наличие презентации доклада	1
Владение профессиональной лексикой	1
Итого:	5

Электронные презентации выполняются в программе MS PowerPoint в виде слайдов в следующем порядке: • титульный лист с заголовком темы и автором исполнения презентации; • план презентации (5-6 пунктов - это максимум); • основная часть (не более 10 слайдов); • заключение (вывод). Общие требования к стилевому оформлению презентации: • дизайн должен быть простым и лаконичным; • основная цель - читаемость, а не субъективная красота; цветовая гамма должна состоять не более чем из двух-трех цветов; • всегда должно быть два типа слайдов: для титульных и для основного текста; • размер шрифта должен быть: 24–54 пункта (заголовок), 18–36 пунктов (обычный текст); • текст должен быть свернут до ключевых слов и фраз. Полные развернутые предложения на слайдах таких презентаций используются только при цитировании; каждый слайд должен иметь заголовок; • все слайды должны быть выдержаны в одном стиле; • на каждом слайде должно быть не более трех иллюстраций; • слайды должны быть пронумерованы с указанием общего количества слайдов

4. Методические рекомендации по написанию эссе

Эссе - это самостоятельная письменная работа на тему, предложенную преподавателем. Цель эссе состоит в развитии навыков самостоятельного творческого мышления и письменного изложения собственных мыслей. Писать эссе чрезвычайно полезно, поскольку это позволяет автору научиться четко и грамотно формулировать мысли, структурировать информацию, использовать основные категории анализа, выделять причинно-следственные связи, иллюстрировать понятия соответствующими примерами, аргументировать свои выводы; овладеть научным стилем речи.

Эссе должно содержать: четкое изложение сути поставленной проблемы, включать самостоятельно проведенный анализ этой проблемы с использованием концепций и аналитического инструментария, рассматриваемого в рамках дисциплины, выводы, обобщающие авторскую позицию по поставленной проблеме. В зависимости от специфики дисциплины формы эссе могут значительно дифференцироваться. В некоторых случаях это может быть анализ имеющихся статистических данных по изучаемой проблеме, анализ материалов из средств массовой информации и использованием изучаемых моделей, подробный разбор предложенной задачи с развернутыми мнениями, подбор и детальный анализ примеров, иллюстрирующих проблему и т.д.

Построение эссе - это ответ на вопрос или раскрытие темы, которое основано на классической системе доказательств.

Структура эссе

1. *Титульный лист* (заполняется по единой форме);

2. *Введение* - суть и обоснование выбора данной темы, состоит из ряда компонентов, связанных логически и стилистически.

На этом этапе очень важно правильно *сформулировать вопрос, на который вы собираетесь найти ответ в ходе своего исследования.*

3. *Основная часть* - теоретические основы выбранной проблемы и изложение основного вопроса.

Данная часть предполагает развитие аргументации и анализа, а также обоснование их, исходя из имеющихся данных, других аргументов и позиций по этому вопросу. В этом заключается основное содержание эссе и это представляет собой главную трудность. Поэтому важное значение имеют подзаголовки, на основе которых осуществляется структурирование аргументации; именно здесь необходимо обосновать (логически, используя данные или строгие рассуждения) предлагаемую аргументацию/анализ. Там, где это необходимо, в качестве аналитического инструмента можно использовать графики, диаграммы и таблицы.

В зависимости от поставленного вопроса анализ проводится на основе следующих категорий:

Причина - следствие, общее - особенное, форма - содержание, часть - целое, постоянство - изменчивость.

В процессе построения эссе необходимо помнить, что один параграф должен содержать только одно утверждение и соответствующее доказательство, подкрепленное графическим и иллюстративным материалом. Следовательно, наполняя содержанием разделы аргументацией (соответствующей подзаголовкам), необходимо в пределах параграфа ограничить себя рассмотрением одной главной мысли.

Хорошо проверенный (и для большинства — совершено необходимый) способ построения любого эссе - использование подзаголовков для обозначения ключевых моментов аргументированного изложения: это помогает посмотреть на то, что предполагается сделать (и ответить на вопрос, хорош ли замысел). Такой подход поможет следовать точно определенной цели в данном исследовании. Эффективное использование подзаголовков - не только обозначение основных пунктов, которые необходимо осветить.

Их последовательность может также свидетельствовать о наличии или отсутствии логичности в освещении темы.

4. *Заключение* - обобщения и аргументированные выводы по теме с указанием области ее применения и т.д. Подытоживает эссе или еще раз вносит пояснения, подкрепляет смысл и значение изложенного в основной части. Методы, рекомендуемые для составления заключения: повторение, иллюстрация, цитата, впечатляющее утверждение. Заключение может содержать такой очень важный, дополняющий эссе элемент, как указание на применение (импликацию) исследования, не исключая взаимосвязи с другими проблемами.

Структура аппарата доказательств, необходимых для написания эссе

Доказательство - это совокупность логических приемов обоснования истинности какого-либо суждения с помощью других истинных и связанных с ним суждений. Оно связано с убеждением, но не тождественно ему: аргументация или доказательство должны основываться на данных науки и общественно-исторической практики, убеждения же могут быть основаны на предрассудках, неосведомленности людей в вопросах экономики и политики, видимости доказательности. Другими словами, доказательство или аргументация - это рассуждение, использующее факты, истинные суждения, научные данные и убеждающее нас в истинности того, о чем идет речь.

Структура любого доказательства включает в себя три составляющие: тезис, аргументы и выводы или оценочные суждения.

Тезис - это положение (суждение), которое требуется доказать. *Аргументы* - это категории, которыми пользуются при доказательстве истинности тезиса. *Вывод* - это мнение, основанное на анализе фактов. *Оценочные суждения* - это мнения, основанные на наших убеждениях, верованиях или взглядах. *Аргументы* обычно делятся на следующие группы:

1. *Удостоверенные факты* — фактический материал (или статистические данные).
2. *Определения* в процессе аргументации используются как описание понятий, связанных с тезисом.
3. *Законы* науки и ранее доказанные теоремы тоже могут использоваться как аргументы доказательства.

Требования к фактическим данным и другим источникам

При написании эссе чрезвычайно важно то, как используются эмпирические данные и другие источники (особенно качество чтения). Все (фактические) данные соотносятся с конкретным временем и местом, поэтому прежде, чем их использовать, необходимо убедится в том, что они соответствуют необходимому для исследований времени и месту. Соответствующая спецификация данных по времени и месту — один из способов, который может предотвратить чрезмерное обобщение, результатом которого может, например, стать предположение о том, что все страны по некоторым важным аспектам одинаковы (если вы так полагаете, тогда это должно быть доказано, а не быть голословным утверждением).

Всегда можно избежать чрезмерного обобщения, если помнить, что в рамках эссе используемые данные являются иллюстративным материалом, а не заключительным актом, т.е. они подтверждают аргументы и рассуждения и свидетельствуют о том, что автор умеет использовать данные должным образом. Нельзя забывать также, что данные, касающиеся спорных вопросов, всегда подвергаются сомнению. От автора не ждут определенного или окончательного ответа. Необходимо понять сущность фактического материала, связанного с этим вопросом (соответствующие индикаторы? насколько надежны данные для построения таких индикаторов? к какому заключению можно прийти на основании имеющихся данных и индикаторов относительно причин и следствий? и т.д.), и продемонстрировать это в эссе. Нельзя ссылаться на работы, которые автор эссе не читал сам.

Как подготовить и написать эссе?

Качество любого эссе зависит от трех взаимосвязанных составляющих, таких как:

1. Исходный материал, который будет использован (конспекты прочитанной литературы, лекций, записи результатов дискуссий, собственные соображения и накопленный опыт по данной проблеме).

2. Качество обработки имеющегося исходного материала (его организация, аргументация и доводы).

3. Аргументация (насколько точно она соотносится с поднятыми в эссе проблемами).

Процесс написания эссе можно разбить на несколько стадий: обдумывание - планирование - написание - проверка - правка.

Планирование - определение цели, основных идей, источников информации, сроков окончания и представления работы.

Цель должна определять действия.

Идеи, как и цели, могут быть конкретными и общими, более абстрактными. Мысли, чувства, взгляды и представления могут быть выражены в форме аналогий, ассоциации, предположений, рассуждений, суждений, аргументов, доводов и т.д.

Аналогии - выявление идеи и создание представлений, связь элементов значений.

Ассоциации - отражение взаимосвязей предметов и явлений действительности в форме закономерной связи между нервно - психическими явлениями (в ответ на тот или иной словесный стимул выдать «первую пришедшую в голову» реакцию).

Предположения - утверждение, не подтвержденное никакими доказательствами.

Рассуждения - формулировка и доказательство мнений.

Аргументация - ряд связанных между собой суждений, которые высказываются для того, чтобы убедить читателя (слушателя) в верности (истинности) тезиса, точки зрения, позиции.

Суждение - фраза или предложение, для которого имеет смысл вопрос: истинно или ложно?

Доводы - обоснование того, что заключение верно абсолютно или с какой-либо долей вероятности. В качестве доводов используются факты, ссылки на авторитеты, заведомо истинные суждения (законы, аксиомы и т.п.), доказательства (прямые, косвенные, «от противного», «методом исключения») и т.д.

Перечень, который получится в результате перечисления идей, поможет определить, какие из них нуждаются в особенной аргументации.

*Источники***.** Тема эссе подскажет, где искать нужный материал. Обычно пользуются библиотекой, Интернет-ресурсами, словарями, справочниками. Пересмотр означает редактирование текста с ориентацией на качество и эффективность.

Качество текста складывается из четырех основных компонентов: ясности мысли, внятности, грамотности и корректности.

Мысль - это содержание написанного. Необходимо четко и ясно формулировать идеи, которые хотите выразить, в противном случае вам не удастся донести эти идеи и сведения до окружающих.

Внятность - это доступность текста для понимания. Легче всего ее можно достичь, пользуясь логично и последовательно тщательно выбранными словами, фразами и взаимосвязанными абзацами, раскрывающими тему.

Грамотность отражает соблюдение норм грамматики и правописания. Если в чем-то сомневаетесь, загляните в учебник, справьтесь в словаре или руководстве по стилистике или дайте прочитать написанное человеку, чья манера писать вам нравится.

Корректность — это стиль написанного. Стиль определятся жанром, структурой работы, целями, которые ставит перед собой пишущий, читателями, к которым он обращается.

5. Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям

Семинар представляет собой комплексную форму и завершающее звено в изучении определенных тем, предусмотренных программой учебной дисциплины. Комплексность данной формы занятий определяется тем, что в ходе её проведения сочетаются выступления обучающихся и преподавателя: рассмотрение обсуждаемой проблемы и анализ различных, часто дискуссионных позиций; обсуждение мнений обучающихся и разъяснение (консультация) преподавателя; углубленное изучение теории и приобретение навыков умения ее использовать в практической работе.

По своему назначению семинар, в процессе которого обсуждается та или иная научная проблема, способствует:

- углубленному изучению определенного раздела учебной дисциплины, закреплению знаний;
- отработке методологии и методических приемов познания;
- выработке аналитических способностей, умения обобщения и формулирования выводов;
- приобретению навыков использования научных знаний в практической деятельности;
- выработке умения кратко, аргументированно и ясно излагать обсуждаемые вопросы;
- осуществлению контроля преподавателя за ходом обучения.

Семинары представляет собой *дискуссию* в пределах обсуждаемой темы (проблемы). Дискуссия помогает участникам семинара приобрести более совершенные знания, проникнуть в суть изучаемых проблем. Выработать методологию, овладеть методами анализа социально-экономических процессов. Обсуждение должно носить творческий характер с четкой и убедительной аргументацией.

По своей структуре семинар начинается со вступительного слова преподавателя, в котором кратко излагаются место и значение обсуждаемой темы (проблемы) в данной дисциплине, напоминаются порядок и направления ее обсуждения. Конкретизируется ранее известный обучающимся план проведения занятия. После этого начинается процесс обсуждения вопросов обучающимися. Завершается занятие подведением итогоа обсуждения, заключительным словом преподавателя.

Проведение семинарских занятий в рамках учебной группы (20 - 25 человек) позволяет обеспечить активное участие в обсуждении проблемы всех присутствующих.

По ходу обсуждения темы помните, что изучение теории должно быть связано с определением (выработкой) средств, путей применения теоретических положений в практической деятельности, например, при выполнении функций государственного служащего. В то же время важно не свести обсуждение научной проблемы только к пересказу случаев из практики работы, к критике имеющих место недостатков. Дискуссии имеют важное значение: учат дисциплине ума, умению выступать по существу, мыслить логически, выделяя главное, критически оценивать выступления участников семинара.

В процессе проведения семинара обучающиеся могут использовать разнообразные по своей форме и характеру пособия, демонстрируя фактический, в том числе статистический материал, убедительно подтверждающий теоретические выводы и положения. В завершение обсудите результаты работы семинара и сделайте выводы, что хорошо усвоено, а над чем следует дополнительно поработать.

В целях эффективности семинарских занятий необходима обстоятельная подготовка к их проведению. В начале семестра (учебного года) возьмите в библиотеке необходимые методические материалы для своевременной подготовки к семинарам. Готовясь к конкретной теме занятия следует ознакомиться с новыми официальными документами, статьями в периодических журналах, вновь вышедшими монографиями.

6. Методические рекомендации по подготовке к дискуссии

Современная практика предлагает широкий круг типов семинарских занятий. Среди них особое место занимает *семинар-дискуссия,* где в диалоге хорошо усваивается новая информация, видны убеждения студента, обсуждаются противоречия (явные и скрытые) и недостатки. Для обсуждения берутся конкретные актуальные вопросы, с которыми студенты предварительно ознакомлены. Дискуссия является одной из наиболее эффективных технологий группового взаимодействия, обладающей особыми возможностями в обучении, развитии и воспитании будущего специалиста.

Дискуссия (от лат. discussio - рассмотрение, исследование) - способ организации совместной деятельности с целью интенсификации процесса принятия решений в группе посредством обсуждения какого-либо вопроса или проблемы.

Дискуссия обеспечивает активное включение студентов в поиск истины; создает условия для открытого выражения ими своих мыслей, позиций, отношений к обсуждаемой теме и обладает особой возможностью воздействия на установки ее участников в процессе группового взаимодействия. Дискуссию можно рассматривать как *метод интерактивного обучения* и как особую технологию, включающую в себя другие методы и приемы обучения: «мозговой штурм», «анализ ситуаций» и т.д.

Обучающий эффект дискуссии определяется предоставляемой участнику возможностью получить разнообразную информацию от собеседников, продемонстрировать и повысить свою компетентность, проверить и уточнить свои представления и взгляды на обсуждаемую проблему, применить имеющиеся знания в процессе совместного решения учебных и профессиональных задач.

Развивающая функция дискуссии связана со стимулированием творчества обучающихся, развитием их способности к анализу информации и аргументированному, логически выстроенному доказательству своих идей и взглядов, с повышением коммуникативной активности студентов, их эмоциональной включенности в учебный процесс.

Влияние дискуссии на личностное становление студента обусловливается ее целостно - ориентирующей направленностью, созданием благоприятных условий для проявления индивидуальности, самоопределения в существующих точках зрения на определенную проблему, выбора своей позиции; для формирования умения взаимодействовать с другими, слушать и слышать окружающих, уважать чужие убеждения, принимать оппонента, находить точки соприкосновения, соотносить и согласовывать свою позицию с позициями других участников обсуждения.

Безусловно, наличие оппонентов, противоположных точек зрения всегда обостряет дискуссию, повышает ее продуктивность, позволяет создавать с их помощью конструктивный конфликт для более эффективного решения обсуждаемых проблем.

Существует несколько видов дискуссий, использование того или иного типа дискуссии зависит от характера обсуждаемой проблемы и целей дискуссии.

Дискуссия- диалог чаще всего применяется для совместного обсуждения учебных и производственных проблем, решение которых может быть достигнуто путем взаимодополнения, группового взаимодействия по принципу «индивидуальных вкладов» или на основе согласования различных точек зрения, достижения консенсуса.

Дискуссия - спор используется для всестороннего рассмотрения сложных проблем, не имеющих однозначного решения даже в науке, социальной, политической жизни, производственной практике и т.д. Она построена на принципе «позиционного противостояния» и ее цель - не столько решить проблему, сколько побудить участников дискуссии задуматься над проблемой, уточнить и определить свою позицию; научить аргументировано отстаивать свою точку зрения и в то же время осознать право других иметь свой взгляд на эту проблему, быть индивидуальностью.

Условия эффективного проведения дискуссии:

- информированность и подготовленность студентов к дискуссии,

- свободное владение материалом, привлечение различных источников для аргументации отстаиваемых положений;

- правильное употребление понятий, используемых в дискуссии, их единообразное понимание;

- корректность поведения, недопустимость высказываний, задевающих личность оппонента; установление регламента выступления участников;

- полная включенность группы в дискуссию, участие каждого студента в ней.

Подготовка студентов к дискуссии: если тема объявлена заранее, то следует ознакомиться с указанной литературой, необходимыми справочными материалами, продумать свою позицию, четко сформулировать аргументацию, выписать цитаты, мнения специалистов.

В проведении дискуссии выделяется несколько этапов.

Этап 1-й, введение в дискуссию: формулирование проблемы и целей дискуссии;

определение значимости проблемы, совместная выработка правил дискуссии; выяснение однозначности понимания темы дискуссии, используемых в ней терминов, понятий.

Этап 2-й, обсуждение проблемы: обмен участниками мнениями по каждому вопросу. Цель этапа - собрать максимум мнений, идей, предложений, соотнося их друг с другом.

Этап 3-й, подведение итогов обсуждения: выработка студентами согласованного мнения и принятие группового решения.

Далее подводятся итоги дискуссии, заслушиваются и защищаются проектные задания. После этого проводится "мозговой штурм" по нерешенным проблемам дискуссии, а также выявляются прикладные аспекты, которые можно рекомендовать для включения в курсовые и дипломные работы или в апробацию на практике.

Семинары-дискуссии проводятся с целью выявления мнения студентов по актуальным и проблемным вопросам.

7. Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов

Экзамен - одна из важнейших частей учебного процесса, имеющая огромное значение.

Во-первых, готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, семинарах, практических и лабораторных занятиях, разбирается в том, что осталось непонятным, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью. А это чрезвычайно важно для будущего специалиста.

Во-вторых, каждый хочет быть волевым и сообразительным., выдержанным и целеустремленным, иметь хорошую память, научиться быстро находить наиболее рациональное решение в трудных ситуациях. Очевидно, что все эти качества не только украшают человека, но и делают его наиболее действенным членом коллектива. Подготовка и сдача экзамена помогают студенту глубже усвоить изучаемые дисциплины, приобрести навыки и качества, необходимые хорошему специалисту.

Конечно, успех на экзамене во многом обусловлен тем, насколько систематически и глубоко работал студент в течение семестра. Совершенно очевидно, что серьезно продумать и усвоить содержание изучаемых дисциплин за несколько дней подготовки к экзамену просто невозможно даже для очень способного студента. И, кроме того, хорошо известно, что быстро выученные на память разделы учебной дисциплины так же быстро забываются после сдачи экзамена.

При подготовке к экзамену студенты не только повторяют и дорабатывают материал дисциплины, которую они изучали в течение семестра, они обобщают полученные знания, осмысливают методологию предмета, его систему, выделяют в нем основное и главное, воспроизводят общую картину с тем, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины. Вся эта обобщающая работа проходит в условиях напряжения воли и сознания, при значительном отвлечении от повседневной жизни, т. е. в условиях, благоприятствующих пониманию и запоминанию.

Подготовка к экзаменам состоит в приведении в порядок своих знаний. Даже самые способные студенты не в состоянии в короткий период зачетно-экзаменационной сессии усвоить материал целого семестра, если они над ним не работали в свое время. Для тех, кто мало занимался в семестре, экзамены принесут мало пользы: что быстро пройдено, то быстро и забудется. И хотя в некоторых случаях студент может «проскочить» через экзаменационный барьер, в его подготовке останется серьезный пробел, трудно восполняемый впоследствии.

Определив назначение и роль экзаменов в процессе обучения, попытаемся на этой основе пояснить, как лучше готовиться к ним.

Экзаменам, как правило, предшествует защита курсовых работ (проектов) и сдача зачетов. К экзаменам допускаются только студенты, защитившие все курсовые работы проекты) и сдавшие все зачеты. В вузе сдача зачетов организована так, что при систематической работе в течение семестра, своевременной и успешной сдаче всех текущих работ, предусмотренных графиком учебного процесса, большая часть зачетов не вызывает повышенной трудности у студента. Студенты, работавшие в семестре по плану, подходят к экзаменационной сессии без напряжения, без излишней затраты сил в последнюю, «зачетную» неделю.

Подготовку к экзамену следует начинать с первого дня изучения дисциплины. Как правило, на лекциях подчеркиваются наиболее важные и трудные вопросы или разделы дисциплины, требующие внимательного изучения и обдумывания. Нужно эти вопросы выделить и обязательно постараться разобраться в них, не дожидаясь экзамена, проработать их, готовясь к семинарам, практическим или лабораторным занятиям, попробовать самостоятельно решить несколько типовых задач. И если, несмотря на это, часть материала осталась неусвоенной, ни в коем случае нельзя успокаиваться, надеясь

на то, что это не попадется на экзамене. Факты говорят об обратном; если те или другие вопросы учебной дисциплины не вошли в экзаменационный билет, преподаватель может их задать (и часто задает) в виде дополнительных вопросов.

Точно такое же отношение должно быть выработано к вопросам и задачам, перечисленным в программе учебной дисциплины, выдаваемой студентам в начале семестра. Обычно эти же вопросы и аналогичные задачи содержатся в экзаменационных билетах. Не следует оставлять без внимания ни одного раздела дисциплины: если не удалось в чем-то разобраться самому, нужно обратиться к товарищам; если и это не помогло выяснить какой-либо вопрос до конца, нужно обязательно задать этот вопрос преподавателю на предэкзаменационной консультации. Чрезвычайно важно приучить себя к умению самостоятельно мыслить, учиться думать, понимать суть дела. Очень полезно после проработки каждого раздела восстановить в памяти содержание изученного материала. кратко записав это на листе бумаги. создать карту памяти (умственную карту), изобразить необходимые схемы и чертежи (логико-графические схемы), например, отобразить последовательность вывода теоремы или формулы. Если этого не сделать, то большая часть материала останется не понятой, а лишь формально заученной, и при первом же вопросе экзаменатора студент убедится в том, насколько поверхностно он усвоил материал.

В период экзаменационной сессии происходит резкое изменение режима работы, отсутствует посещение занятий по расписанию. При всяком изменении режима работы очень важно скорее приспособиться к новым условиям. Поэтому нужно сразу выбрать такой режим работы, который сохранился бы в течение всей сессии, т. е. почти на месяц. Необходимо составить для себя новый распорядок дня, чередуя занятия с отдыхом. Для того чтобы сократить потерю времени на включение в работу, рабочие периоды целесообразно делать длительными, разделив день примерно на три части: с утра до обеда, с обеда до ужина и от ужина до сна.

Каждый рабочий период дня надо заканчивать отдыхом. Наилучший отдых в период экзаменационной сессии - прогулка, кратковременная пробежка или какой-либо неутомительный физический труд.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программа учебной дисциплины и студенческий конспект, которые указывают, что наиболее важно знать и уметь делать. Основной материал должен прорабатываться по учебнику (если такой имеется) и учебным пособиям, так как конспекта далеко недостаточно для изучения дисциплины. Учебник должен быть изучен в течение семестра, а перед экзаменом сосредоточьте внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением по памяти его краткого содержания в логической последовательности.

За один - два дня до экзамена назначается консультация. Если ее правильно использовать, она принесет большую пользу. Во время консультации студент имеет полную возможность получить ответ на нее ни ясные ему вопросы. А для этого он должен проработать до консультации все темы дисциплины. Кроме того, преподаватель будет отвечать на вопросы других студентов, что будет для вас повторением и закреплением знаний. И еще очень важное обстоятельство: преподаватель на консультации, как правило, обращает внимание на те вопросы, по которым на предыдущих экзаменах ответы были неудовлетворительными, а также фиксирует внимание на наиболее трудных темах дисциплины. Некоторые студенты не приходят на консультации либо потому, что считают, что у них нет вопросов к преподавателю, либо полагают, что у них и так мало времени и лучше самому прочитать материал в конспекте или и учебнике. Это глубокое заблуждение. Никакая другая работа не сможет принести столь значительного эффекта накануне экзамена, как консультация преподавателя.

Но консультация не может возместить отсутствия длительной работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На

консультации студент получает ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы и, следовательно, дорабатывается материал. Консультации рекомендуется посещать, подготовив к ним все вопросы, вызывающие сомнения. Если студент придет на консультацию, не проработав всего материала, польза от такой консультации будет невелика.

Итак, *основные советы* для подготовки к сдаче зачетов и экзаменов состоят в следующем:

- лучшая подготовка к зачетам и экзаменам - равномерная работа в течение всего семестра;
- используйте программы учебных дисциплин - это организует вашу подготовку к зачетам и экзаменам;
- учитывайте, что для полноценного изучения учебной дисциплины необходимо время;
- составляйте планы работы во времени;
- работайте равномерно и ритмично;
- курсовые работы (проекты) желательно защищать за одну - две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии;
- все зачеты необходимо сдавать до начала экзаменационной сессии;
- помните, что конспект не заменяет учебник и учебные пособия, а помогает выбрать из него основные вопросы и ответы;
- при подготовке наибольшее внимание и время уделяйте трудным и непонятным вопросам учебной дисциплины;
- грамотно используйте консультации;
- соблюдайте правильный режим труда и отдыха во время сессии, это сохранит работоспособность и даст хорошие результаты;
- учитесь владеть собой на зачете и экзамене;
- учитесь точно и кратко передавать свои мысли, поясняя их, если нужно, логико-графическими схемами.

Очень важным условием для правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальный сон, иначе в день экзамена не будет чувства бодрости и уверенности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания по выполнению самостоятельной работы обучающихся являются неотъемлемой частью процесса обучения в вузе. Правильная организация самостоятельной работы позволяет обучающимся развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, способствует формированию навыков совершенствования профессионального мастерства. Также внеаудиторное время включает в себя подготовку к аудиторным занятиям и изучение отдельных тем, расширяющих и углубляющих представления обучающихся по разделам изучаемой дисциплины.

Таким образом, обучающийся используя методические указания может в достаточном объеме усвоить и успешно реализовать конкретные знания, умения, навыки и получить опыт при выполнении следующих условий:

1) систематическая самостоятельная работа по закреплению полученных знаний и навыков;

2) добросовестное выполнение заданий;

3) выяснение и уточнение отдельных предпосылок, умозаключений и выводов, содержащихся в учебном курсе;

4) сопоставление точек зрения различных авторов по затрагиваемым в учебном курсе проблемам; выявление неточностей и некорректного изложения материала в периодической и специальной литературе;

5) периодическое ознакомление с последними теоретическими и практическими достижениями в области управления персоналом;

6) проведение собственных научных и практических исследований по одной или нескольким актуальным проблемам для *HR*;

7) подготовка научных статей для опубликования в периодической печати, выступление на научно-практических конференциях, участие в работе студенческих научных обществ, круглых столах и диспутах по проблемам управления персоналом.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально - ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

2. Методические рекомендации по написанию реферата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hse.spb.ru/edu/recommendations/method-referat-2005.phtml

3. Фролова Н. А. Реферирование и аннотирование текстов по специальности (на материале немецкого языка): Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. - С.5.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Прорек
компле

_____

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ПРАКТИКА

(В. СЫСЕРТЬ)

Специальность

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: **очная, заочная**

год набора: 2021

Одобрена на заседании кафедры

Геофизики

(название кафедры)

Зав.кафедрой _____

(подпись)

Талалай А. Г.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 05.10.2020

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией факультета

Геолог

(назва

Председатель _____

Бондарев В.И.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 13.10.2020

(Дата)

Екатеринбург
2020

Глава 1

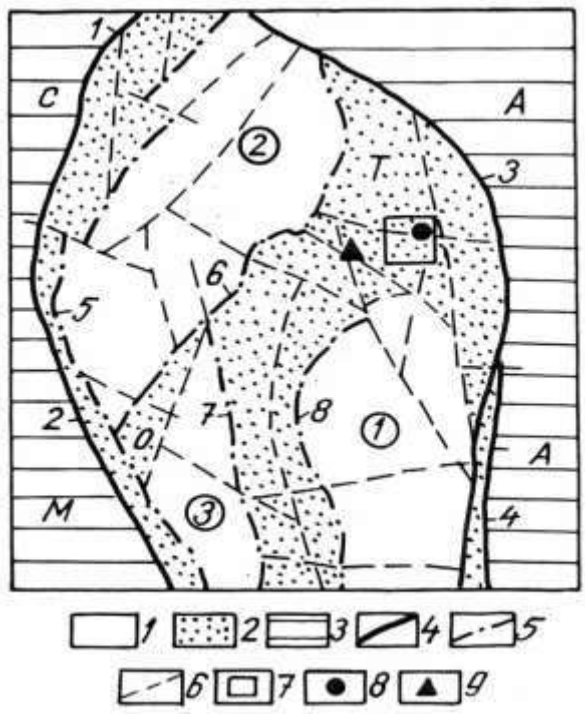
Геологическое строение, гидрогеологическая, инженерно-геологическая и геоэкологическая характеристика Верхне-Сысертской площади

1.1. Геологическое строение Верхне-Сысертской площади

А. А. Богомол, О. В. Грязнов, С. Г. Дубейковский, А. В. Алексеев

Геология – в широком смысле слова –
Промышленная первооснова.
Руда, металл, нефть, уголь, газ, вода –
В них человечество нуждается всегда.
В них тяжкий труд полевиков
Отныне, присно и во век веков.
И. Оськин, выпускник СГИ 1952 г.

В геологическом отношении площадь Верхне-Сысертского полигона размещается в пределах одного из крупнейших структурных элементов Восточно-Уральского поднятия – *Сысертско-Ильменогорского мегантиклинория*. Это сложно построенная структура, состоящая из отдельных антиклинориев – *гранито-гнейсовых куполов*, при формировании которых возникли разделяющие межкупольные синклинорные зоны. Ядро структуры сложено метаморфическими гнейсово-мигматитовыми породами докембрия, а крылья (сланцевое обрамление) – метаморфическими и в разной степени метаморфизованными породами палеозоя.



База геофизической практики находится в межкупольной Ташкульской синклинорной зоне, располагающейся между двумя крупными гранито-гнейсовыми куполами – Шумихинским и Осиновским (рис. 1.1).

Рис. 1.1. Схема тектонического районирования северной части Сысертского антиклинория (по Г. А. Кейльману, А. А. Машарову и В. Ф. Копаневу с упрощением)

1 – гнейсовые купола (1 – Шумихинский, 2 – Осиновский, 3 – Иткульский); 2 – межкупольные синклинорные зоны (Т – Ташкульская, О – Орловская); 3 – сопряженные синклинорные структуры Урала II-III порядка (С – Свердловский, М – Магнитогорский, А – Арамильский синклинории); 4-6 – разломы: 4 – региональные I порядка (1 – Мраморский, 2 – Миасско-Полевской, 3 – Черкаскульско-Сысертский, 4 – Кашинско-Кыштымскии), 5 – II порядка (5 – Иткульско-Чусовской, 6 – Орловский, 7 – Иткульский, 8 – Вишневогорско-Черновской), 6 – III-IV порядка; 7 – Верхне-Сысертская площадь; К – Верхне-Сысертское месторождение золота; 9 – Карасьевское рудопроявление

Породы представлены в основном метаморфическими сланцами саитовской свиты, в приосевой части структуры обнажаются кварциты и углистые сланцы игишской свиты среднего рифея. Существенное значение для геологии района и размещения полезных ископаемых имеют небольшие интрузивные тела основного, ультраосновного и кислого состава, прорывающие метаморфические толщи (рис. 1.2).

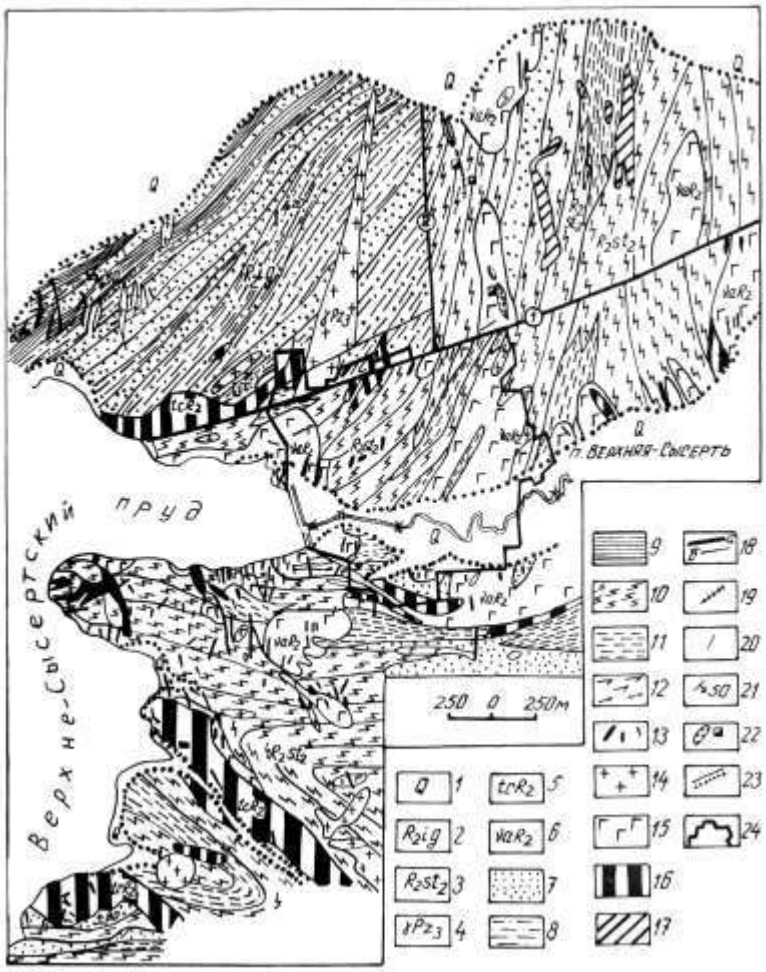


Рис. 1.2. Схематическая геологическая карта Верхне-Сысертской площади. По материалам А. А. Богомола с дополнениями О. Н. Грязнова

1 – аллювиальные, пролювиальные отложения; 2 – игишская свита – кварциты, слюдистые кварциты, графито-кварцитовые сланцы, графитовые кварциты, кварц-гранат-биотитовые сланцы; 3 – саитовская свита, верхняя подсвита – плагиосланцы, биотитовые и гранат-биотитовые сланцы, кварциты, графитовые кварциты; 4 – граниты мусковит-биотитовые, гранит-аплиты, пегматиты; 5 – апогипербазитовые породы – тальк-карбонатные, тальк-актинолитовые и др., 6 – габбро-амфиболиты, апогаббровые амфиболиты; 7-9 – породы игишской свиты: 7 – кварциты, слюдистые кварциты, 8 – графитовые кварциты, 9 – графито-кварцевые сланцы; 10-12 – породы саитовской свиты: 10 – биотит-плагиоклазовые, кварц-биотит-плагиоклазовые сланцы, 11 – биотитовые и гранат-биотитовые сланцы, 12 – плагиоклаз-амфиболовые сланцы; 13 – пегматиты, аплиты; 14 – граниты двуслюдяные; 15 – габбро-амфиболиты, апогаббровые амфиболиты; 16 – апогипербазитовые породы (тальк-карбонатные, тальк-актинолитовые); 17 – скрытые тела апогипербазитовых пород по данным магниторазведки; 18 – разломы (а) главные (1 – Верхне-Сысертский, 2 – Меридиональный) и (б) второстепенные; 19 – золоторудные кварцевые жилы Верхне-Сысертского месторождения; 20 – безрудные кварцевые жилы; 21 – элементы залегания пород; 22 – карьеры, шахты и глубокие шурфы Верхне-Сысертского месторождения золота; 23 – геологические границы (точками показаны границы распространения чехла четвертичных отложений); 24 – контур поселка Верхняя Сысерть

1.1.1. Стратиграфия

Стратиграфическая колонка территории приведена на рис. 1.3.

Шумихинская свита слагает ядра антиклинальных структур и представлена преимущественно биотитовыми, гранат-биотитовыми, мусковит-биотитовыми плагиогнейсами и гранитогнейсами. Мощность свиты более 3000 м.

Черновская свита слагает крылья главных антиклинальных структур и залегает на гнейсах шумихинской свиты с региональным несогласием. В составе свиты преобладают метаморфические амфиболиты, образовавшиеся по вулканогенным породам основного состава. Подчиненное значение имеют биотитовые, гранат-биотитовые, мусковит-кианитовые гнейсы с прослоями слюдистых и графитовых кварцитов. Мощность порядка 2500 м.

Саитовская свита разделяется на две подсвиты – нижнюю и верхнюю.

Нижняя подсвита сложена преимущественно мелкозернистыми амфиболитами, образовавшимися по вулканогенным породам основного состава, и биотитовыми плагиосланцами (часто с гранатом и амфиболом).

Верхняя подсвита слагает большую часть площади Верхне-Сысертского полигона, протягиваясь полосой вдоль южной окраины пос. Верхняя Сысерть и в восточной его половине. Породы этой подсвиты представлены преобладающими плагиосланцами, в меньшем количестве существенно биотитовыми, гранат-биотитовыми сланцами, редкими прослоями и пачками кварцитов, в том числе графитовых.

Плагиосланцы – серые, зеленовато-серые полосчатые или в разной степени сланцеватые (до токосланцеватых) породы биотит-плагиоклазового, кварц-биотит-плагиоклазового состава, нередко с примесью граната. Кварцсодержащие плагиосланцы по количественному соотношению плагиоклаза, кварца и биотита иногда близки к плагиогнейсам. Существенно биотитовые, гранат-биотитовые сланцы в сравнении с плагиосланцами содержат больше биотита и граната, меньше плагиоклаза; они имеют более темную окраску и более резко выраженную сланцеватость. По количественному соотношению минералов эти сланцы имеют кварц-плагиоклаз-биотитовый, плагиоклаз-кварц-биотитовый, гранат-кварц-плагиоклаз-биотитовый состав. Нередко среди них встречаются прослои, линзы и пачки гранат-биотитовых сланцев и почти мономинеральных биотитовых сланцев. Значительно реже встречаются сланцы более сложного минерального состава: амфибол-плагиоклаз-кварц-биотитовые, мусковит-кварц-плагиоклаз-эпидот-биотитовые, гранат-мусковит-кварц-биотитовые, гранат-актинолит-кварц-биотитовые и др.

Группа	Система	Отдел	Ярус	Серия	Свита	Индекс	Разрез	Мощ-ность,	Характеристика пород
ПАЛКОЗОЙСКАЯ	Девонская	Верх.				D_3		700	Порфириты базальтового состава, порфиритоиды и зелен нцы
		Средний			Кундра-винс	D_2		1000	Известняки мраморизованные Конгломераты, песчаники, алевролиты биотитизированны риболизи-рованные с прослоями углисто-кремнистых сланцев истых мраморов
		Ниж.							Осадочно-вулканогенные и вулкано-генные породы основн реднего состава Туфы и туффиты порфиритов андезитового состава Альбитофиры и их туфы
	Силурийская	Верх.				$S\text{-}D_1$		1000-1500	
		Нижний	Ландоверский		Андреевская	S_1ln		400-70	Сланцы углисто-кремнистые и кремнистые
								800-900	Сланцы хлорит-актинолитовые и талько-хлоритов мнистые и глинистые Сланцы эпидот-альбит-актинолитовые, порфиритоиды, слоями углисто-кремнистых сланцев и известняков
	Ордовикская	Верхний			Сысертская	O_3		600	Сланцы серицит-кварцевые с прослоями углистых кварцит дот-актинолитовых сланцев и мраморов
								700	Сланцы слюдисто-кварцевые с гранатом, кианитом вролитом с прослоями хлорит-кварцевых и амфиболовых сланцев Амфиболовые сланцы
ПРОТЕРОЗОЙСКАЯ	Рифей	Средний			Игиш	R_2		500	Микрокварциты графитовые
					Саитовс-ка			1000	Микрогнейсы биотитовые и амфиболовые, микроамфиболит слоями графитовых микро-кварцитов
					Черновская			2000	Амфиболиты, гнейсы амфиболовые и биотит-амфиболовы слоями биотитовых гнейсов и кварцитов Гнейсы эпидот-биотитовые Кварциты графитовые
					Шумихинская	PR_3		3000	Гнейсы двуслюдяные с прослоями кварцитов Гнейсы биотитовые и гранат-биотитовые, участками лиманитом

Рис. 1.3. Стратиграфическая колонка территории Сысертско-Ильменогорского мегантиклинория

Кварциты, слюдистые кварциты, реже графитовые кварциты и графито-кварцевые сланцы слагают редкие маломощные прослои и несколько пачек мощностью до нескольких десятков метров. Макроскопически это тонкосланцеватые или массивные породы желто-белого цвета, местами с буроватым оттенком.

Суммарная мощность свиты порядка 1000 м.

Игишская свита обнажается в северо-западной части полигона. Сложена переслаивающимися графитовыми кварцитами, графито-кварцевыми сланцами, кварцитами, слюдистыми кварцитами с некоторым преобладанием графитсодержащих пород, в небольшом количестве мелкозернистыми кварц-гранат-биотитовыми сланцами. По направлениям сланцеватости развиваются многочисленные дайки пегматитов. Мощность около 450 м.

Тенякская свита сложена преимущественно вулканогенными породами основного состава, преобразованными в мелкозернистые амфиболиты и сланцы биотит-карбонат-эпидот-альбит-хлоритовые и эпидот-биотит-кварц-альбит-хлоритовые с прослоями хлорит-слюдит-серицит-кварцевых сланцев, кварцитов, кремнистых туфов.

Андреевская свита сложена сланцами серицит-хлоритового, хлорит-альбит-серицит-кварцевого, биотит-хлорит-эпидот-кварц-альбитового состава с редкими прослоями мелкозернистых амфиболитов и кварцитов.

Среднедевонская (эйфельская) толща сложена преобладающими сланцами слюдисто-кварцевого, слюдисто-альбит-кварцевого состава, в меньшем количестве мраморами, мелкозернистыми амфиболитами, прослоями графитовых кварцитов.

Мезо-кайнозой. Представлен в основном глинистыми, дресвяными и щебнистыми корами выветривания подстилающих коренных пород. Мощность площадных кор – от первых метров до 20-30 м (линейно-трещинных – до 100-250 м), при широком площадном распространении.

Песчано-глинистые отложения *мела, палеогена и неогена* имеют весьма ограниченное распространение, слагая небольшие отдельные по площади участки.

1.1.2. Тектоника

Сложная тектоническая структура мегантиклинория формировалась в течение сотен миллионов лет и характеризуется рядом своеобразных особенностей, обусловленных тесной взаимосвязью тектонических и метаморфических процессов. Ведущая роль принадлежит диапироидному перемещению пластических масс, прогретых до температуры, достаточной для развития реоморфизма и анатексиса с последующим образованием крупной антиклинорной структуры "гнейсового диапироида".

Гнейсово-мигматитовое ядро мегантиклинория состоит из ряда крупных брахиформных антиклинальных структур – куполов, сложенных преимущественно гнейсами шумихинской свиты. Форма куполов в плане эллипсовидная и изометричная, протяженность до 30 км при ширине до 15 км. Между соседними куполами развиты синклиналеобразные структуры, сложенные преимущественно породами саитовской и игишской свит с изменчивым простиранием и падением, подчиненным конфигурации куполов. Мелкая разнонаправленная складчатость, осложняющая слоистые толщи, также тесно связана с конфигурацией куполов и по мере удаления от него приобретает субмеридиональное направление, обычное для Урала.

Разрывные нарушения разделяются на две основные группы (Кейльман, 1974). К первой относятся нарушения, связанные с формированием гнейсового ядра и его обрамления. Из них наиболее отчетливо проявляются разломы, окаймляющие гнейсовое ядро и отделяющие его от сланцевого обрамления. Вдоль них происходит усиление метаморфических процессов и внедрение интрузивных тел реоморфических (вторичных) гранитоидов и крупных даек гранитов. Ко второй группе относятся более поздние разновозрастные разломы разных направлений, не имеющие прямой связи с формированием гнейсово-мигматитового комплекса. Они расчленяют гнейсовое ядро и его сланцевое обрамление на отдельные блоки, а также развиваются вдоль контактов ядра со сланцевым обрамлением.

База практики приурочена к Ташкуль-Верхнесысертской синклинальной зоне, имеющей в плане сложную форму. Собственно синклинальный характер залегания устанавливается лишь в северной, широтно ориентированной части структуры, в остальных же падение практически повсеместно восточное. В северо-западной части площади располагается фрагмент крыла складки, сложенного породами игишской свиты. Оно имеет северо-восточное простирание с падением на юго-восток под углами от 20 до 77°, в среднем 50-55°, и осложнено более мелкими складками с углами падения крыльев 50-80°. Сланцы саитовской свиты смяты в синклинальную складку субширотного простирания с осложняющей более мелкой складчатостью на крыльях от 45 до 80° (рис. 1.4).

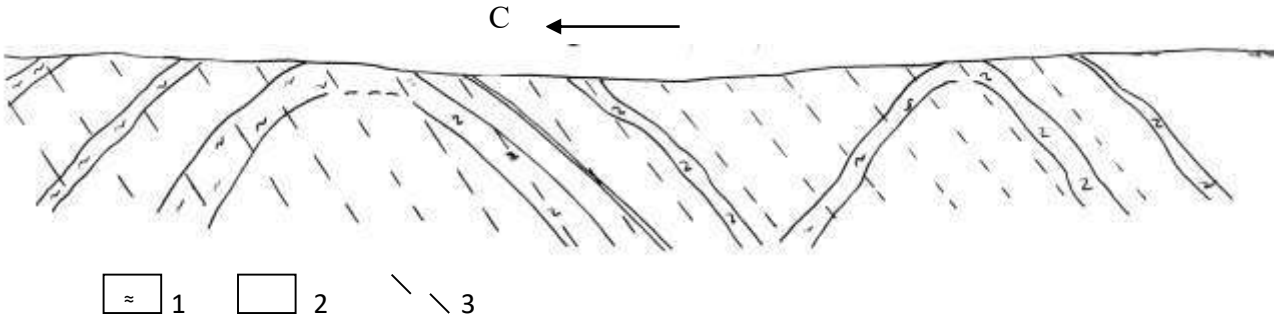


Рис. 1.4. Складчатость в породах Игишской свиты (по А. В. Алексееву и И. В. Сапожниковой):

1 – кварцитовые сланцы, кварциты; 2 – углистые сланцы; 3 – рассланцевание

В породах обеих метаморфических толщ участка широко развиты разрывные нарушения разных систем и порядков. Наиболее значительными являются Верх-Сысертский и Меридиональный разломы.

Верх-Сысертский разлом проходит по северной окраине пос. Верхняя Сысерть. Он имеет простирание в среднем 75° и субвертикальное падение, отчетливо картируется в западной половине участка по тектоническому контакту вдоль него пород саитовской и игишской свит, залеганию в зоне разлома линейного тела гипербазитов длиной более 1,7 км и срезанию с юга дайкообразного тела гранитоидов. В северном боку разлома породы игишской свиты в полосе шириной более 100 м интенсивно рассланцованы и превращены в кварц-гранат-биотитовые сланцы, а мелкие дайки гиперазитов – в тальковые, вермикулитовые и тальк-вермикулитовые сланцы (рис. 1.5). Буровыми скважинами установлены многочисленные дайки гранитов, аплитов, пегматитов их метаморфические разности, а также интенсивные вторичные преобразования в амфиболитах и сланцах.

Восточное продолжение разлома не прослежено, видимо, он проходит через участок Верх-Сысертского месторождения золота, ограничивая его Западную и Восточную рудные зоны, соответственно, с юга и севера. Относительно поднятым является южное крыло разлома с амплитудами смещения в сотни метров.

Меридиональный разлом определяет тектонический контакт пород игишской свиты со сланцами саитовской свиты. Он совершенно не обнажен и строение его неясно. Видимо, с юга он ограничен сочленением с Верх-Сысертским разломом, т. к. южнее не обнаруживался. Относительно поднятым является восточное крыло разлома с амплитудой смещения в сотни метров.

а

б

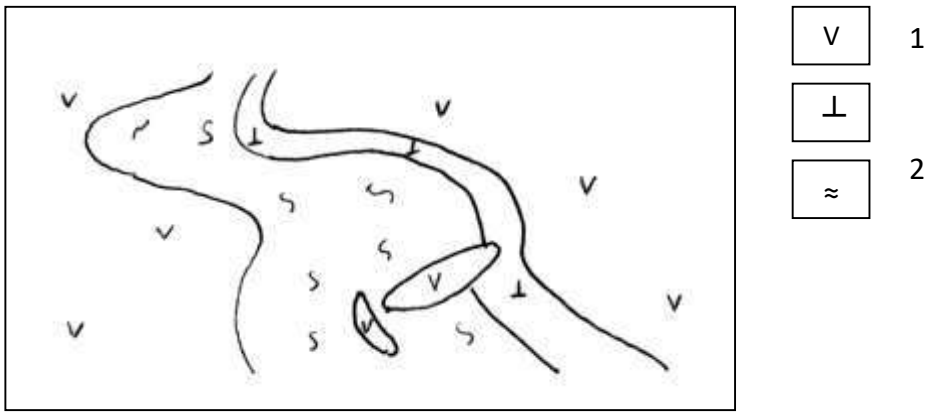


Рис. 1.5. Интенсивно дислоцированное и метаморфизованное тело ультраосновных пород в зоне Верх-Сысертского разлома (по А. В. Алексееву):

а – фотография; б – зарисовка: 1 – сланцы саитовской свиты, 2 – тальк-карбонатные породы, 3 – вермикулитовые сланцы

Разрывные нарушения меньших порядков широко распространены на площади участка, о чем, в частности, свидетельствуют многочисленные разноориентированные дайки и дайкообразные тела гранитов, аплитов, пегматитов, имеющих меридиональное, северо-западное, северо-восточное, реже – субширотное простирание с углами падения от 30 до 90°. Многочисленные тектонические трещины разных направлений наблюдаются в ряде обнажений и выражены зонами тонкого рассланцевания мощностью до 6-7, иногда до 12 м с тальковыми, вермикулитовыми, хлоритовыми сланцами или перетертыми породами и милонитами.

1.1.3. Интрузивные породы

На Верхне-Сысертской площади широко развиты многочисленные мелкие интрузивные тела и дайки ультраосновного, основного и кислого состава, представленные метаморфизованными гипербазитами, габброидами и пегматитами. Как правило, интрузивные породы, особенно кислого состава, менее подвержены выветриванию и поэтому фиксируются в рельефе положительными структурами, форма которых напрямую зависит от формы интрузии.

Гипербазиты. Слагают три линзообразных тела длиной до 1,5-1,7 км при мощности 200-300 м и около 20 мелких линзо- и дайковидных тел длиной 60-560 м при мощности 10-80 м. Залегают в породах обеих толщ, фиксируя центральную часть межкупольной синклинальной зоны. В результате метаморфизма полностью изменены и представлены апогипербазитовыми карбонат-тальковыми, тальковыми, актинолит-тальковыми, хлорит-тальковыми, хлоритовыми, актинолит-тальк-хлоритовыми, карбонат-хлоритовые, иногда карбонатными, гранат-актинолит-хлоритовыми и антофиллит-карбонат-тальковыми породами. В приконтактовой части и по разрывным нарушениям нередко развиваются тальковые и хлоритовые сланцы.

Габброиды. Эти породы слагают многочисленные изометричные и линзообразные тела среди кристаллических сланцев саитовской свиты. В породах игишской свиты встречена лишь одна линза вблизи Верх-Сысертского разлома мощностью 40 м. Тела габброидов изменяются по длине от десятков метров до 1,5 км. В результате метаморфизма они превращены в полосчатые, сланцевато-полосчатые габбро-амфиболиты и амфиболиты, в эндоконтактах нередко рассланцованы и превращены в кварц-плагиоклаз-амфиболовые сланцы. Габбро-амфиболиты содержат 45-65 % роговой обманки, 15-40 % – плагиоклаза, часто также 10-25 % кварца, реже – 1-15 % биотита. В амфиболитах больше роговой обманки (до 90 %), меньше плагиоклаза и кварца, иногда встречается гранат (до 10-20 %).

Граниты и пегматиты. Слагают многочисленные дайки, дайко- и линзообразные тела, реже мелкие штоки в породах саитовской и игишской свит. Это наиболее поздние интрузивные породы, секущие все интрузивные и метаморфические образования.

По составу граниты мусковит-биотитовые с мелкозернистой и среднезернистой структурой, массивной или слабо выраженной гнейсовидной текстурой. Они слагают одно линейно вытянутое в ССВ направлении дайкообразное тело длиной око 1,8 км при мощности до 240 м. По нему развита маломощная (до 5-10 м) кора выветривания каолинитового состава. К группе гранитных относятся также дайки мусковитизированных гранит-аплитов и аплитов.

Пегматиты – наиболее поздние по возрасту породы, они залечивают многочисленные разломы в породах и при выветривании оказываются наиболее прочными, поэтому хорошо выделяются в рельефе. Слагают большую часть даек, дайкообразных и линзовидных тел кислого состава. Длина их колеблется от 10-20 до 250-450 м при мощности от 0,5 до 50-60 м, простирание практически всегда субмеридиональное. Отдельные тела пегматитов имеют форму мелких штокообразных тел. Пегматиты крупнокристаллические, имеют простой минеральный состав (полевой шпат, кварц, мусковит) и образуются путем метасоматического замещения гранитов, гранит-аплитов с наблюдаемыми иногда постепенными переходами в эти породы.

1.1.4. Метаморфические процессы

Одной из особенностей гнейсово-мигматитовых комплексов Урала, и, в частности, Сысертско-Ильменогорского, является большая продолжительность их тектоно-метаморфического развития (Кейльман, 1961; Овчинников, 1963, 1969; Краснобаев, 1969). В результате неоднократного повторения метаморфических преобразований пород и их значительной интенсивности (вплоть до частичного плавления) можно сказать, что первичных минеральных ассоциаций на территории мегантиклинория не сохранилось, все современные породы являются метаморфическими.

В протерозое и рифее, до процессов метаморфизма и складчатости формировались мощные вулканогенно-осадочные и осадочные толщи Шумихинской, Черновской, Саитовской и Игишской свит, послуживших основой для последующего построения гнейсово-мигматитового комплекса. Первичная слоистость, сильно затушеванная метаморфизмом, отчетливо наблюдается в породах сланцевого обрамления, несколько хуже – в отложениях межкупольных зон, и практически полностью стерта в породах гранито-гнейсовых куполов.

Формирование собственно гнейсово-мигматитового комплекса связано с метаморфизмом высоких ступеней, отразившимся в той или иной степени на всех породах Сысертско-Ильменогорского мегантиклинория. Но если для Восточно-Уральского поднятия характерен зеленосланцевый региональный тип метаморфизма, то в пределах магантиклинория происходило постепенное повышение уровня метаморфизма от зеленых сланцев через кристаллические сланцы до амфиболитов и гнейсов. Причем такие процессы шли с разрывом во времени и неодинаково проявлялись в разных частях структуры.

Метаморфизм ранних этапов затронул только гнейсовое ядро и отсутствует в сланцевом обрамлении. В пределах всей территории процесс метаморфизма был достаточно выдержан и протекал первоначально в условиях субгранулитовой фации, а на последних стадиях – амфиболитовой. Этот процесс затронул осадочные и, частично, ультраосновные и основные породы, вовлеченные в процесс диапиризма, приводя к формированию в них более высокотемпературных минеральных ассоциаций. Сопровождался метаморфизм интенсивной гранитизацией – раскислением состава пород с формированием типичных минералов: кварца, плагиоклаза, биотита, граната.

На поздних этапах метаморфизм носил регрессивный характер, причем с явной зональностью относительно уже сформированных гранито-гнейсовых куполов. Последние являлись центрами интенсивной гранитизации и мигматизации, развивавшейся по породам самого разнообразного состава, что предопределяет неоднородный облик новообразованных гранитоидов и плагиогранитов. Массивы реоморфических гранитоидов, сформированные в течение обоих этапов, слагают около 25 % территории мегантиклинория, приурочиваясь к сводовым частям куполов в гнейсовом ядре или к линейным зонам разломов, отделяющих гнейсовое ядро от сланцевого обрамления.

В периферических частях куполов и межкупольных синклинальных зонах на высокотемпературные ассоциации минералов амфиболитовой фации накладываются более низкотемпературные ассоциации эпидот-амфиболитовой фации. В гнейсах это выражается в увеличении количества кварца, раскисляется плагиоклаз, появляется мусковит (по биотиту или роговой обманке) и эпидот.

В наиболее удаленных от центров гранитизации участках на ассоциации амфиболитовой фации накладывается зеленосланцевая фация. Здесь по биотиту и гранату развивается хлорит, роговая обманка замещается актинолитом и хлоритом, по среднему плагиоклазу развивается альбит, появляется рутил. При этом очень часто наблюдается явление сохранения реликтов первичных минеральных ассоциаций.

В формировании интрузивных комплексов наблюдается достаточно строгая смена их во времени. Ультраосновные интрузии делятся на две группы – допозднескладчатые (протерозойские), наиболее древние и интенсивно метаморфизованные, в частности Иткульский и Сысертский массивы, и послескладчатые (раннепалеозойские), метаморфизованные в значительно меньшей мере. Силурийские (реже раннедевонские) габброидные тела занимают промежуточное положение, что хорошо видно из их геологического положения – они приурочены к зонам разломов, как и ультрабазиты, секут последние, но сами секутся более поздними телами кислого состава. Граниты и плагиограниты по большей части имеют метаморфическое и анатектическое происхождение, т. е. являются продуктами замещения других пород в условиях высоких фаций метаморфизма или высокотемпературными выплавками. Занимают достаточно широкий возрастной диапазон формирования – от раннего девона до конца палеозоя. Наиболее поздними породами являются широко распространенные пегматиты.

1.1.5. Полезные ископаемые

Верхне-Сысертская площадь и прилегающая территория характеризуются широким разнообразием рудных и нерудных полезных ископаемых. Промышленное освоение района началось в XVIII веке с разработки мелких гипергенных месторождений бурых железняков. В дальнейшем с различной продолжительностью здесь эксплуатировались: Глубочинское месторождение железа, Благовещенское (Верх-Сысертское) – рудного золота, Черновское – благородного талька, месторождения хромистого железняка, граната, гранулированного кварца, россыпного золота. В настоящее время разрабатываются: Сысертское месторождение антофиллит-асбеста, одноименное месторождение каолина, мелкие разработки торфа, выявлено Карасьевогорское рудопроявление медно-никелевых сульфидных руд с золотом и серебром. По условиям образования месторождения и рудопроявления района можно подразделить на эндогенные магматогенные (хромиты, рудное золото, медно-никелевые руды), метаморфигенные (антофиллит-асбест, тальк, гранат, гранулированный кварц) и экзогенные (бурые железняки, россыпное золото, каолин, торф, строительные материалы). В прикладном отношении они принадлежат к рудным и нерудным полезным ископаемым.

Железные руды. Месторождения бурых железняков известны в районе с 1680 г. Разработка их началась с 1732 г. в связи с пуском Сысертского, а позднее Верх-Сысертского железоделательных заводов и осуществлялась до начала 1930-х гг. За этот период отработано около 40 месторождений, большинство которых располагается около г. Сысерть. Бурые железняки инфильтрационного генезиса приурочены к карстовым полостям над слоями и линзами мраморов в эйфельской толще, реже в андреевской свите и связаны с гипергенными процессами коре выветривания. Обычно согласные залежи бурых железняков приурочены к контактам мраморов и сланцев и погружаются до глубины 6080 м. Форма залежей пластообразная, длина по простиранию – до 300-500 м, мощность – от долей метра до 10 м. Содержание железа – до 50-58 %, практически все месторождения содержали примесь золота (до 72 г/т).

Хромит. В Сысертском районе известно несколько десятков мелких месторождений и рудопроявлений хромита, залегающих в интрузивных телах ультрабазитов. Большинство их отрабатывалось кустарным способом до начала или середины 1930-х гг. Наибольшее количество месторождений и рудопроявлений (около 30) располагается на площади 6 кв. км в Иткульском ультраосновном массиве. Рудные тела – мелкие линзы длиной 10-20 м, мощностью до 1,5 м, руды вкрапленные, реже массивные. Примером могут служить линзы разбудинированного массивного и нодулярного хромита в апосерпентинитовых метасоматитах в скальных обнажениях восточного берега оз. Иткуль (рис. 1.6).

В группе Сысертских ультрабазитовых массивов известно 16 месторождений и рудопроявлений хромита с линзо- и штокообразными телами преимущественно вкрапленных руд длиной по простиранию до 30-45 м, по падению до 75 м при мощности 5-10 м.

Медь, никель, кобальт. В XVIII-XIX вв. в Сысертском районе на трех рудниках велась добыча окисленных медных руд. На участке одного из них Иткульской ГСП в результате детальных поисковых работ в 1988-1989 гг. выявлено Карасьевогорское рудопроявление сульфидных руд меди, никеля, кобальта с примесью золота и серебра. Оно располагается в 7 км к юго-западу от пос. В. Сысерть.

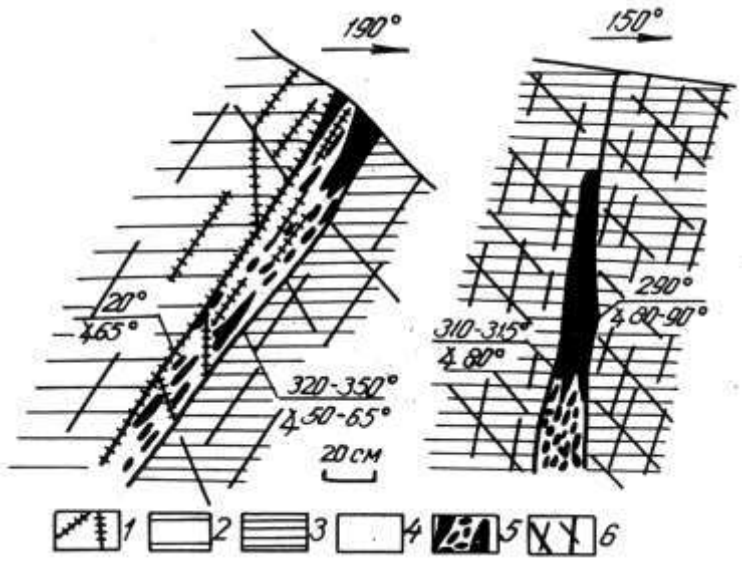


Рис. 1.6. Жилы разбудинированного массивного и нодулярного хромита в апосерпентинитовых актинолит-хлорит-тальковых и тальк-карбонатных породах. Зарисовки обнажений на восточном берегу оз. Иткуль (по О. Н. Грязнову):

1 – тальковые и тальк-карбонатные прожилки; 2 – тальк-карбонатные породы; 3 – актинолит-хлорит-тальк-карбонатные горные породы; 4 – зоны рассланцевания, оталькования, карбонатизации; 5 – будины и гнезда массивного и нодулярного хромита; 6 – тектонические трещины

Рудопроявление располагается в северной части Ташкульской синклинорной зоны и залегает в небольшом линейном теле апогипербазитовых тальк-карбонат-антофиллитовых пород длиной более 1 км среди сланцев саитовской свиты и гранитов. Двумя скважинами пересечены две сближенные жилообразные рудные залежи. Первая, подсеченная на глубине 110,5-111,7 м, сложена окисленной рудой (бурый железняк с реликтами сульфидов) с содержанием меди 0,26-3,93 %, золота – от 0,1 до 18,5 г/т, серебра – до 12,5 г/т. Вторая (136,9-151,3 м) в верхней части сложена зоной вторичного сульфидного обогащения (халькозиновая сыпучка) и на 50-60 % сложена рудными минералами: халькозином, реликтами халькопирита, пирита, виоларита, гидроокислами железа, присутствуют мелкие зерна свободного золота. Содержания меди – 6,86-31 %, никеля – 0,08-0,50 %, золота – 8-36 г/т, серебра – 17,4-74,7 г/т. Нижняя часть рудного интервала сложена вкрапленными и массивными первичными сульфидными рудами, в состав которых входят халькопирит, пирротин, пирит, пентландит, золото. В сплошных рудах содержание меди 9,28-16,55 %, никеля – 0,39-0,71 %, кобальта – 0,19-0,29 %, золота – 1,6-4,1 г/т, серебра – 24,3-33,0 г/т, во вкрапленных – несколько ниже.

По минеральному и химическому составу руд и геологическому положению Карасьевогорское рудопроявление относится к сульфидной медно-никелевой рудной формации и похоже на известные южноуральские месторождения вкрапленных сульфидных руд в гипербазитах Ивановское и Ишкининское. Отличия только в отсутствии платины и повышенных содержаниях золота и серебра.

Хотя на соседних профилях оруденение не установлено и рудопроявление промышленного значения не имеет, перспективы района на сульфидные медно-никелевые месторождения достаточно высоки, особенно учитывая протяженный пояс мелких ультраосновных интрузий.

Тантал и ниобий. В районе г. Сысерть и пос. Верхняя Сысерть известны мелкие проявления колумбит-пирохлоровой минерализации в маломощных дайках гранитов и пегматитов с низкими содержаниями тантала и ниобия.

В самих гранитах содержание пятиокиси тантала 0,002-0,004 %, ниобия – 0,009-0,021 % связаны с акцессорной вкрапленностью колумбита, пирохлора, монацита, ортита и практического значения не имеют, но в корах выветривания по гранитам содержания этих металлов несколько повышаются и местами могут достигать промышленных концентраций.

Золото. В Сысертском районе были выявлены и разрабатывались небольшие россыпные и коренные месторождения золота (рис. 1.7).

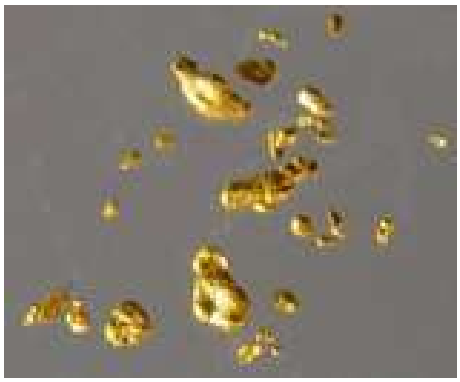


Рис. 1.7. Рудное золото Благовещенского (Верх-Сысертского) месторождения

Открытие и начало разработки россыпных месторождений относится к 1823-1824 гг. Основные россыпи располагались в долине р. Сысерти и по ее притокам – Глубокой, Каменке, Дальней, Черной и др. Несмотря на сравнительно невысокое содержание (до 1,5-3,0 г/т), из 28 россыпей было добыто более 2000 кг золота.

Первое коренное месторождение золота выявлено в 1890 г. Всего в районе в настоящее время известно одно месторождение и 28 рудопроявлений. С 1892 г. разрабатывалось, в основном, Верх-Сысертское (Благовещенское) месторождение. Почти все рудопроявления золота связаны с кварцевыми жилами, минерализованными сульфидами железа, меди и цинка, арсенопиритом, магнетитом и располагаются преимущественно в сланцевом обрамлении, значительно реже – в краевых частях гнейсовых куполов.

Верх-Сысертское (Благовещенское) месторождение открыто в 1890 г. и отрабатывалось с 1892 по 1908 гг. Добыча руды сначала велась открытыми разрезами до глубины 10-15 м, а затем шахтами глубиной 20-60 м. В 1933 г. на месторождении начались восстановительные работы и с 1934 г. до 1956 г. продолжалась его разработка.

Месторождение приурочено к сланцам саитовской свиты и прорывающим их интрузивным телам габбро; редкими являются здесь очень мелкие тела гипербазитов и дайки гранитов. На месторождении установлены две рудные зоны – Западная и Восточная, из которых первая расположена севернее Верх-Сысертского разлома, а вторая к югу от него с расстоянием между ними по линии разлома около 1 км. По данным разведочных и эксплуатационных работ (В. П. Трифонов, 1948), рудные жилы залегают среди кристаллических сланцев, амфиболитов и габбро-амфиболитов с прослоями хлоритовых, тальк-хлоритовых и хлорит-карбонатных сланцев. Сланцы смяты в запрокинутые на запад изоклинальные складки и падают на восток под углами 46-70°. Встречаются редкие дайки гранитов.

Западная рудоносная зона прослежена по простиранию на 1,2 км и уходит на севере под наносы. Золотоносные кварцевые жилы приурочены к секущим взбросо-сдвиговым трещинам ССЗ (340-345°) простирания и падают на ВСВ под углами от 35-60° до 80-85°. Длина жил – от 100 до 600 м, мощность – 0,3-6,3 м. Вмещающие породы в зальбандах жил окварцованы. Кварцевые жилы содержат примесь карбоната (3-14 %) и слабо минерализованы пиритом, халькопиритом, пирротином, шеелитом, сфалеритом, галенитом. Содержания золота чаще от 2,5 до 8 г/т. На глубину жилы Западной зоны прослежены до 72 м горными выработками и до 130 м буровыми скважинами.

В Восточной рудоносной зоне рудные жилы имеют длину 50-240 м при мощности от долей метра до 2-3 м, в раздувах – до 4-5 м. Они залегают согласно с вмещающими породами и падают на восток по азимуту 90-100° под углами 50-70°. Вмещающие породы в лежачем боку жил окварцованы, а в висячем боку серицитизированы. В метасоматических оторочках содержится вкрапленность сульфидов и на расстоянии до 0,5-0,6 м от контактов жил наблюдается промышленное содержание золота. Минеральный состав жил в Восточной зоне более сложный. Кроме кварца и карбоната содержатся пирит (7-50 %), арсенопирит (до 25 %, обычно 2-3 %), халькопирит (2-10 %), сфалерит (5-25 %), а также марказит, пирротин, галенит, магнетит. Содержание золота несколько ниже, чем в Западной зоне. Видимого золота почти не наблюдается, оно связано с сульфидами. Жилы Восточной зоны прослежены до глубины 40 м горными выработками и до 75 м – буровыми скважинами.

Повышенные содержания золота в жилах Западной зоны чаще наблюдаются в раздувах, а в Восточной зоне – в местах наибольшей концентрации сульфидов, особенно арсенопирита. Зона окисления развита до глубины 10-30 м, в отдельных случаях до 50 м от поверхности, зона вторичного обогащения почти не выражена. Резкого изменения содержания золота с глубиной не отмечается, но количество сульфидов в Восточной зоне увеличивается на глубину. А.А. Машаров и В.Ф. Копанев считают, что резкое различие в минеральном составе жил Западной н Восточной зон обусловлено разной глубиной их эрозионного среза (Восточная зона представлена корневыми частями жил), что, по-видимому, нужно связывать с расположением этих рудных зон по разные стороны Верхне-Сысертского разлома.

Торф. В районе имеются многочисленные месторождения торфа преимущественно низинного типа с мощностью залежей до 11 м. Большая часть месторождений не эксплуатируется.

Антофиллит-асбест. В районе открыто и разведано значительное число месторождений этого уникального сырья (Сысертское, Мочаловское, Терсутское, Калмацкое, Черновское, Каменушинское и др.). Эксплуатация их началась в 1947 г. и продолжается в настоящее время. Все месторождения связаны с глубоко

метаморфизованными среднерифейскими гипербазитами и располагаются в северной части Ташкульской синклинорной зоны. Наиболее интенсивное асбестообразование проявилось в зонах значительной тектонической проработки пород, сопровождавшейся будинированием крупных тел и гранитизацией межбудинных пространств. Асбестоносные тела имеют линзо- и штокообразную форму длиной от нескольких метров до 100 м и мощностью не более нескольких метров, максимальные содержания асбестового волокна – до 25-30 %.

Обобщенная метаморфогенно-метасоматическая зональность в ходе развития антофиллитовых метасоматитов и образование аньтофиллит-асбеста на Сысертском месторождении имеет вид: оливин-энстатитовые породы – серпентиниты – тальк-карбонатные породы – тальк-карбонат-антофиллитовые породы – антофиллит-асбест-хлорит-тальковые и актинолит-тальковые породы – хлорит-вермикулитовые породы. В конкретном выражении в отдельных телах гипербазитов все зоны образуются редко. Развитие зональности на контакте одного из тел метагипербазитов Мочаловского месторождения иллюстрируется рис. 1.8.

Тальк. В Сысертско-Ильменогорском мегантиклинории известно около 80 месторождений и проявлений тальковых и тальк-карбонатных пород. Все они приурочены к метаморфизованным гипербазитам. Залежи тальковых и карбонат-тальковых пород имеют длину до 600 м при мощности до нескольких десятков метров. Наиболее крупными являются месторождения Сысертское (тальк) и Шабровское (карбонат-тальковые породы). В 6 км к северу от базы практики располагается отработанное Черновское месторождение талька (Тальков Камень).

Оталькование развивается в краевых частях гипербазитовых тел или внутри них по зонам рассланцевания, трещиноватости, дробления. Серпентиниты имеют постепенные переходы к тальковым и тальк-карбонатным породам. В последних наблюдаются реликты антигорита. Биметасоматическая зональность, развивающаяся на контакте серпентинитов и алюмосиликатных пород в северной части Иткульского массива гипербазитов, имеет вид (рис. 1.9): серпентиниты – оталькованные серпентиниты – тальк-карбонатные породы (рис. 1.10) – талькиты – актинолитовые породы – хлоритовые породы – биотитизированные алюмосиликатные породы – алюмосиликатные вмещающие породы. Мощности зон непостоянны и варьируются в широких пределах. Не всегда формируется полная зональность, некоторые зоны могут отсутствовать, чаще всего это касается актинолитовой зоны. Иногда вместо нее появляется тальк-хлоритовая зона, а в алюмосиликатных породах развиваются порфиробласты силикатов.

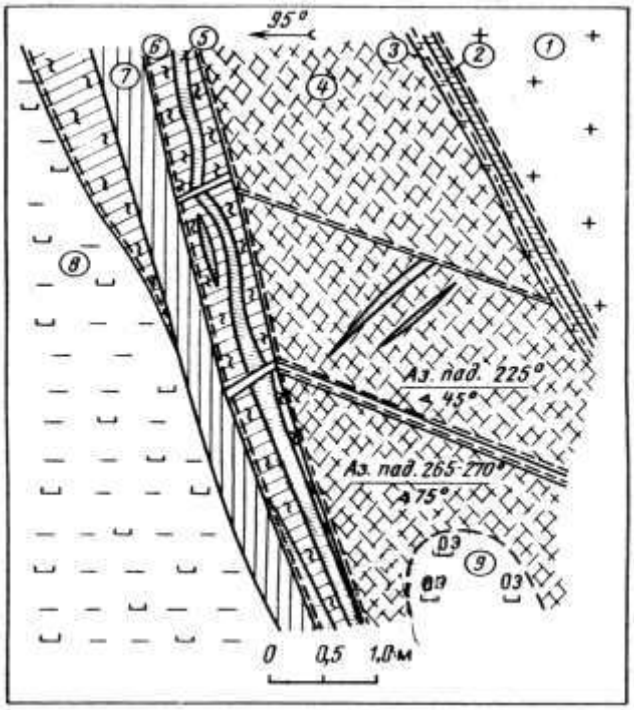


Рис. 1.8. Развитие биметасо-матической зональности на контакте плагиогранитов и серпенти-низированных оливин-энстатитовых пород. Мочаловское месторождение антофиллит-асбеста (южная стенка) (по О. Н. Грязнову):

Цифры в кружках: 1 – плагиограниты биотитовые; 2 – биотит-флогопитовые метасоматиты; 3 – хлоритовые метасоматиты милонитизированные; 4 – антофиллит-карбонатные метасоматиты; 5 – антофиллит-асбест (поперечно-волокнистый); 6 – хлорит-тальковые метасоматиты, интенсивно дислоцированные; 7 – серпентиниты карбонатизированные; 8 – серпентиниты апогарцбургитовые; 9 – гарцбургит

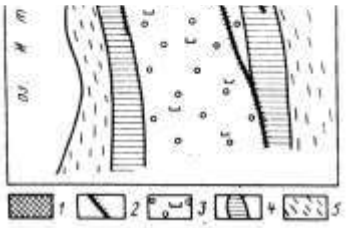


Рис. 1.9. Схематическая карта метаморфогенно-метасоматической зональности в северной части Иткульского массива гипербазитов (по О. Н. Грязнову):

1 – ореол тальк-карбонатных метасоматитов; 2 – локальные зоны развития тальк-карбонатных метасоматитов; 3 – серпентиниты; 4 – апогипербазитовые актинолитовые, плагиоклаз-актинолитовые метасоматиты; 5 – биотитовые гнейсы и кристаллические сланцы

Рис. 1.10. Тальк-карбонатная порода с прожилком благородного талька. Карьер "Тальков Камень"

Кварц. Гранулированный кварц является новым видом сырья для получения технического стекла. Жилы гранулированного кварца связаны с зонами наиболее высокотемпературного метаморфизма и залегают в породах гнейсового ядра. В южной части Сысертско-Ильменогорского мегантиклинория эксплуатируется Кыштымское месторождение такого кварца. На Верхне-Сысертской площади встречаются отдельные жилы гранулированого кварца.

Гранат. Гранатизация метаморфических пород широко проявлена в породах ядра и сланцевого обрамления. Наиболее обогащены гранатом хлоритовые и амфибол-хлоритовые сланцы по периферии гнейсовых куполов. В Сысертском районе известны два месторождения граната (Глубочинское и Южно-Копанское) в зоне сланцевого обрамления Шумихинского купола. Глубочинское месторождение расположено в 5 км к ЮВ от пос. Верхняя Сысерть. Кристаллы граната имеют размеры 2-5 см, реже до 12 см, содержание их в породе до 40 %. Линзы обогащенных гранатом пород имеют длину 15-40 м при мощности 3-12 м. На Южно-Копанском месторождении тело гранатсодержащих пород имеет протяженность 440 м, мощность 4-22 м, содержание граната от 7 до 25 % (в среднем 12-15 %), размеры кристаллов от 1-2 до 8-10 см; запасы граната более 5 000 тонн (рис. 1.11).

Рис. 1.11. Зеленый сланец с кристаллами граната. Шурф "Гранатовая горка".

К месторождениям граната относятся также пляжные гранатовые пески по берегам оз. Иткуль.

Каолин. В районе разрабатывалось несколько мелких месторождений каолина в коре выветривания. Наиболее крупное из них – Сысертское, имеет длину залежи около 300 м, ширину 100-200 м и среднюю мощность 6,6 м.

Строительные материалы. В качестве различных строительных материалов в районе используется мрамор, бутовый камень (граниты, амфиболиты, гнейсы и др.), кирпичные глины, песок, дресва, щебень и др.

Глава 2

Петрофизика

2.1. Петрографическое описание пород участка Верх-Сысертский

Асп. А.В. Алексеев, доц. И.И. Бреднев, доц. С.А. Игумнов

Когда возьмешь с любовью
камень в руки,
Петру святому поклонись
смиренно
И ты вкусить сумеешь
непременно
Плоды петрофизической науки

А свойств набор, измерив
аккуратно.
Поймешь пород и руд
происхожденье
И станет даже глупому
понятно
Какое, как и где искать
месторожденье

В. Сапожников,
выпускник СГИ 1959 г.

Для корректного изучения физических свойств образцов пород и руд необходимо предварительно установить их петрографический и минеральный состав, структурные и текстурные свойства, степень преобразований и вероятный генезис. В разделе приведены такие данные по основным разновидностям пород Верх-Сысертского полигона практики. Описания сопровождаются изображениями образцов (полированные поверхности) и шлифов (правая часть – николи параллельны, левая – николи скрещены, увеличение 64^{x}) исследованных пород.

состава часто встречаются в виде пачек и прослоев в породах саитовской свиты, наиболее характерные обнажения в районе золоторудного месторождения Верх-Сысертского.

Минеральный состав: плагиоклаз (соссюрит) – 70 %, биотит – 20 %, гранат – 9 %, сульфиды – 1 %. Структура порфиробластовая, текстура сланцеватая.

Макроскопическое описание: зеленовато-серая порода с хаотично рассеянным гранатом в виде крупных идиоморфных зерен (додекаэдров) светло-коричневого цвета (до 0,4 см). Биотит в виде слабо ориентированных линзовидных и порфировидных скоплений. Сульфиды рассеяны по породе, тяготеют к мелким трещинам, представлены в основном пиритом.

Микроскопическое описание: основную массу породы слагает практически нацело соссюритизированный плагиоклаз (А) со следами давления в виде слабо проявленной ориентировки. На его фоне отчетливо выделяются крупные чешуйки вторичного биотита (В), нередко с волнистым угасанием. Гранат образует крупные идиоморфные кристаллы размером от 2 до 5 мм. Рудный минерал (С) вторичный, что хорошо видно по его ассоциации с биотитом и одинаковой с ним ориентировке.

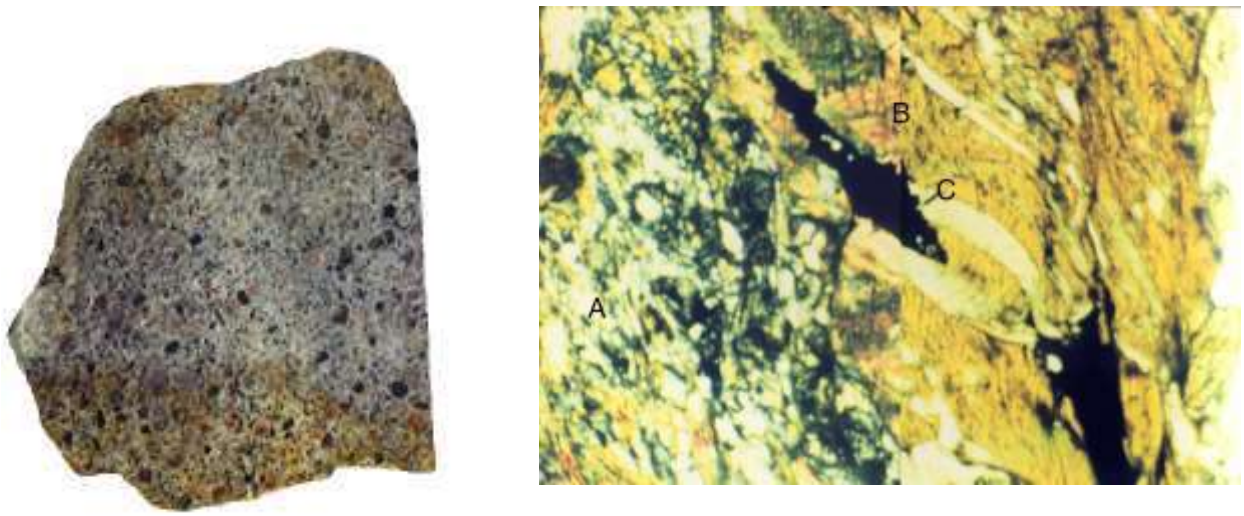


Рис. 2.1. Биотитовый плагиосланец

Саитовская свита. Биотитовый плагиосланец (рис. 2.1). Породы такого

Генезис: первичная вулканогенно-осадочная порода габбрового состава претерпела несколько стадий метаморфизма. На первой стадии, более высокотемпературной, сформировались амфиболиты: произошло раскисление плагиоклаза до альбита, сформировался гранат и амфибол (роговая обманка). На следующей, низкотемпературной стадии, плагиоклаз превратился в соссюрит, а роговая обманка, и, частично, гранат, заместились биотитом. Последнее хорошо видно по форме новообразований биотита.

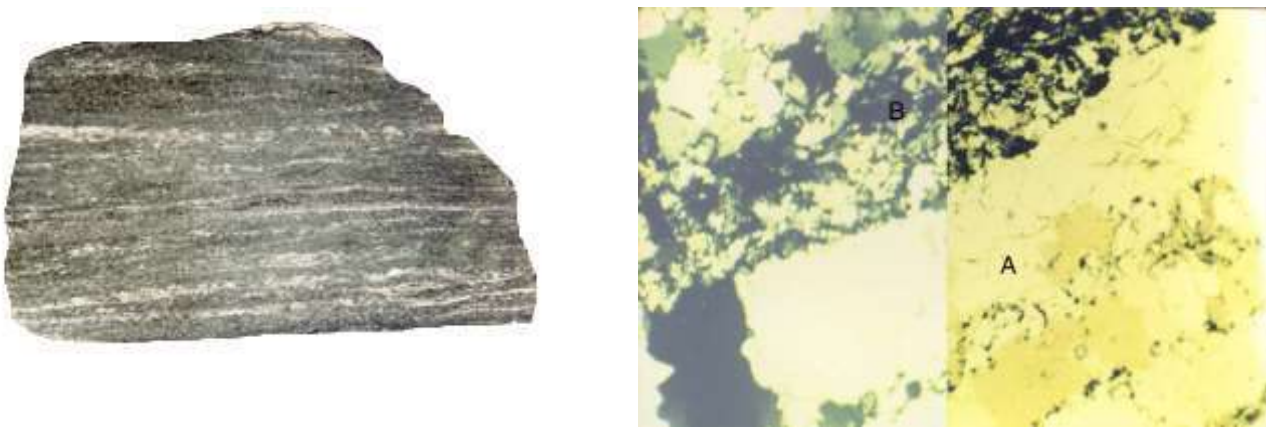


Рис. 2.2. Графитовый кварцит

Игишская свита. Графитовый кварцит (рис. 2.2). Переслаивающиеся толщи графитовых кварцитов и кварцитов слагают в пределах полигона все отложения игишской свиты.

Минеральный состав: кварц – 70-75 %, графитовое вещество – 25-30 % сульфиды – единичные зерна. Структура гранобластовая, текстура сланцеватая.

Макроскопическое описание: темно-серая порода с отчетливой сланцеватостью, выраженной в чередовании кварцевых и графито-кварцевых слойков. Наблюдается заметное увеличение размеров зерен кварца в собственно кварцевых слойках. Отмечаются единичные ксеноморфные зерна пирита. На породы наложено более позднее рассланцевание.

Микроскопическое описание: характерны очень четкие границы между отдельными слойками, очевидно, наследующие первичную осадочную слоистость. Кварц варьируется по размеру от мелкозернистого (<0,5 мм) в графито-кварцевых прослойках до среднезернистого (0,5 - 3,0 мм) в кварцевых. Для него характерна ксеноморфная форма, извилистые границы и следы слабого проникновения друг в друга, в то же время следов неоднородности самих кристаллов нет. Графитовое вещество образует отдельные прослои средне- и крупнозернистых агрегатов, но в основном равномерно рассеяно по графито-кварцевым слойкам в виде изометричных непрозрачных стяжений.

Генезис: первично осадочная неясного состава в процессе метаморфизма на уровне амфиболитовой, а возможно и гранулитовой фаций, превратились в породы бимерального состава с новообразованным или перекристаллизованным кварцем и значительным количеством углистого (графитового) вещества. Источник последнего, учитывая возможный рифейский возраст пород, проблематичен. Сульфидная примесь наложенная, связана с небольшими интрузиями основного состава, внедряющимися по разломам

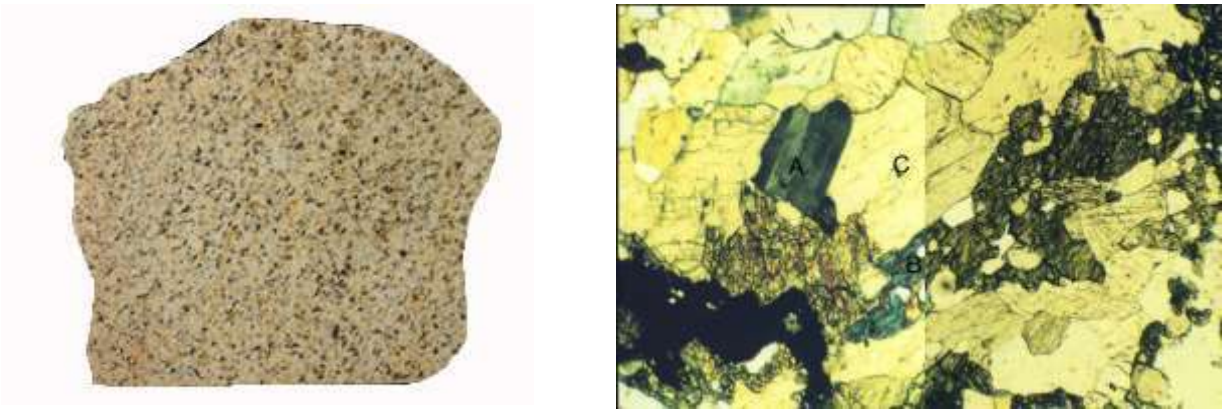


Рис. 2.3. Гранит

Саитовская свита. Гранит (рис. 2.3). Граниты встречены в виде крупного штокообразного тела севернее пос. В. Сысерть.

Минеральный состав: полевой шпат – 25-30 %, кварц – 25-30 %, калиевый полевой шпат – 25-30 %, биотит и амфибол – до 15 %. Структура мелко-среднезернистая, текстура массивная.

Макроскопическое описание: порода с равномерным распределением основных петрогенных минералов, очень слабо проявлена рассланцеванность. Причем если в расположении светлых минералов можно усмотреть определенную упорядоченность, то темноцветная рассеяны достаточно хаотично и разноориентированы. Кварц, калиевый полевой шпат и плагиоклаз образуют ксеноморфные изометричные зерна размером до 0,5 см, биотит и амфибол – игольчатые и призматические зерна до 0,7 мм по удлинению.

Микроскопическое описание: кварц представлен небольшими изометричными зернами от 0,1 до 0,5 мм (С) с четкими границами и без включений посторонних минералов. Калиевый полевой шпат представлен в основном микроклином с характерной микроклиновой решеткой. Плагиоклаз (А) в виде призматических кристаллов, как правило с четкими двойниками, в основном альбит. Биотит образует ксеноморфные призматические кристаллы с включениями плагиоклаза и кварца, наблюдается также амфибол (В - роговая обманка) с отчетливым плеохроизмом от светло- до темно-зеленого цветов.

Генезис: этот гранитный шток является результатом частичного плавления пород на уровне гранулитовой фации метаморфизма. О прохождении именно плавления, а не метасоматического замещения говорит чистота зерен кварца и плагиоклаза от включений и их четкие границы. Темноцветные минералы более тугоплавки и поэтому наследовались из первичного субстрата. Таковым служили породы саитовской или черновской свиты, выплавленная масса внедрилась по ослабленным зонам (субмеридиональным разломам) с образованием типичных для таких пород форм – штоко- и жилообразных.

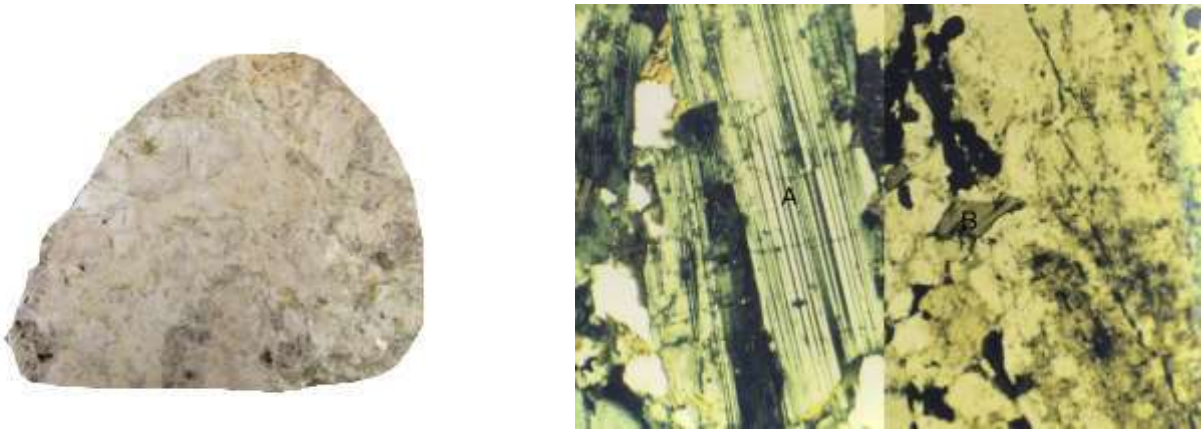


Рис. 2.4. Пегматит

Саитовская и игишская свиты. Пегматит (рис. 2.4). Пегматиты распространены в виде небольших жилообразных тел по всей территории полигона.

Минеральный состав: кварц – 35-40 %, калиевый полевой шпат – 15-25 %, полевой шпат – 45-50 %, мусковит и биотит – до 10 %, иногда акцессорная примесь граната. Структура гигантозернистая, текстура массивная.

Макроскопическое описание: светлые крупно- и гигантозернистые породы с размером отдельных зерен до 10-15 см. Кристаллы плагиоклаза и калиевого полевого имеют идиоморфные очертания, их двойники различимы невооруженным глазом. Слюды обычно образуют пачки листоватых агрегатов, преобладает мусковит. Он же встречается в виде отдельных чешуек, рассеянных по породе. Кварц выделяется в виде неправильных чистых агрегатов, нередко кварцевые прожилки секут другие минералы. Межзерновое пространство заполнено более мелкозернистой смесью кварца и плагиоклаза. Пегматиты среди пород игишской свиты обладают меньшей зернистостью, в них практически отсутствуют темноцветные минералы, отмечается акцессорная примесь граната (вероятно гроссуляра). Примеси рудных компонентов не обнаружено.

Микроскопическое описание: как правило пегматиты не нуждаются в описании под микроскопом, их гигантозернистая структура позволяет диагностировать минералы визуально. Также визуально или под небольшим увеличение наблюдается неоднородность всех крупных кристаллов – зоны роста, включения других минералов, двойники кристаллов. Более мелкозернистая структура пегматитов игишской свиты позволяет рассмотреть сдвойникованные призматические зерна плагиоклаза (A), отдельный листоватые чешуйки биотита (B). Нередко наблюдается неоднородность кристаллов- волнистое погасание, зональность. Кварц, как наиболее поздний минерал, заполняет все пустоты, образовавшиеся после кристаллизации других компонентов.

Генезис: наиболее поздние по возрасту породы, являются результатом возгонки остаточных гидротерм, несущих низкотемпературные компоненты, в основном кремнезем. Поскольку они достаточно тесно связаны с составом материнских пород, то, соответственно, их состав значительно варьируется в зависимости от источника гидротерм. Пегматиты залечивают многочисленные разломы и наследуют их ориентировку.

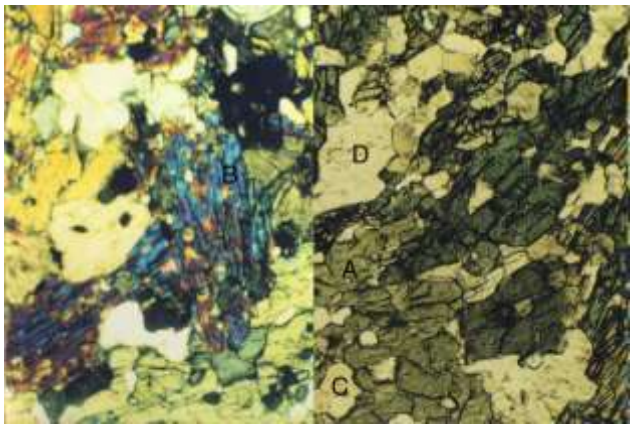


Рис. 2.5. Апогаббровый амфиболит

Саитовская свита. Апогаббровый амфиболит (рис. 2.5). Встречаются южнее плотины Верхне-Сысертского водохранилища в виде двух тел апогаббровых интузивных пород.

Минеральный состав: амфибол (роговая обманка) – 55-60 %, плагиоклаз – 40-45 %, кварц – 5-7 %, пироксен – до 5 %, карбонат – до 5 %, в отдельных пачках отмечается повышенное количество граната (до 10-15 %). Структура гранолепидобластовая, текстура сланцеватая.

Макроскопическое описание: темно-серая скрытокристаллическая порода с прекрасно проявленной тонкой сланцеватостью. Количество темноцветных и светлых минералов изменяется от практически мономинеральных плагиоклазовых слойков до смешанных плагиоклаз-амфиболовых с резким преобладанием последнего. Визуально минералы практически не диагностируются из-за мелкого размера и частого образования псевдоморфоз. Для таких пород характерно большое количество птигматитовых прожилков кварцевого и плагиоклаз-кварцевого состава. Сульфидная примесь отмечается очень редко и обычно в виде единичных зерен пирита, реже халькопирита.

Микроскопическое описание: амфибол (роговая обманка) выделяется в виде вытянутых неправильных кристаллов (А), с многочисленными включениями плагиоклаза и, отчасти, кварца, иногда образует псевдоморфозы по пироксену. Иногда можно наблюдать зональное строение амфибола. Пироксен (В) сохраняется в виде реликтов, хорошо отличимых по более высокой интерференционной окраске, представлен в основном клинопироксеном. Плагиоклаз (С) характеризуется изометричными ксеноморфными очертаниями, часто соссюритизирован, очень редки двойники. По последним устанавливается его номер – обычно олигоклаз, реже альбит. Примесь кварца и карбоната (С) наиболее поздняя и обычно не превышает 5-10 %.

Генезис: габброидные интрузивные тела первоначального плагиоклаз пироксенового состава метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации и превращены в апогаббровые амфиболиты. Существенное однонаправленное давление обусловило отчетливое рассланцевание пород. По пироксену развилась роговая обманка, плагиоклаз раскислился и частично был соссюритизирован. Карбонат и кварц вторичные, поэтому чаще всего образуют наложенные прожилки

Рис. 2.6. Плагиоклаз-амфиболовый сланец

Саитовская свита. Плагиоклаз-амфиболовый сланец (рис. 2.6). Наиболее широко распространены в районе Верхне-Сысертского месторождения золота в виде мощных прослоев и пачек.

Минеральный состав: амфибол (роговая обманка) – 55-60 %, плагиоклаз – 35-40 %, кварц и карбонат – 5 %, сульфиды – 3-4 %. Структура среднезернистая, текстура гранолепидобластовая.

Макроскопическое описание: темно-серая пятнистая порода с отчетливо видной зернистостью минералов. Пятнистость обусловлена скоплениями игольчатого амфибола (роговой обманки) или изометричного плагиоклаза (олигоклаз). Роговая обманка средне- и крупнозернистая, хаотично ориентированная, плагиоклаз мелкозернистые. Сульфиды рассеяны по породе с образованием небольших облачных скоплений. Порода пересечена кварц-карбонатным прожилком без сульфидной примеси.

Микроскопическое описание: плагиоклаз (А) распространен в виде небольших изометричных зерен, часто сдвойникованных, иногда со слабыми следами соссюритизации. Представлен по большей части олигоклазом и альбитом. Отчетливо видны две генерации плагиоклаза, из которых первая, ранняя, образует включения во второй, поздней. Амфибол (роговая обманка) также выделяется в двух генерациях: первичная, замещающая пироксен, характеризуется ксеноморфными изометричными или неправильной формы зернами и вторичная (В), образующая идиоморфные игольчатые кристаллы, сформировавшиеся по пироксену, с многочисленными включениями плагиоклаза. Кварц и карбонат (С) редки, сульфиды занимают межзерновое пространство, представлены в основном пиритом и халькопиритом.

Генезис: метаморфическая порода по первичным вулканогенно-осадочным отложениям, сформировавшаяся в условиях амфиболитовой фации метаморфизма. Близость по составу интрузивных габброидов и вулканогенных образований обусловили сходный процесс метаморфизма и близкий минеральный состав итоговых метаморфических пород. В процессе метаморфизма основной плагиоклаз (андезин) раскислился до олигоклаза, а пироксен заместился роговой обманкой. От первичного состава остались только единичные реликты. Сульфидизация является наложенной, несущей золотое оруденение, ее источником послужили гранитоидные массивы севернее верх-сысертского участка. Низкотемпературные стадии метаморфизма не проявлены, поэтому минералы остались относительно свежими.

Рис. 2.7. Тальк-карбонатные породы по ультрабазитам

Саитовская свита. Тальк-карбонатные породы по ультрабазитам (рис. 2.7). Слагают небольшое интрузивное тело южнее плотины Верхне-Сысертского пруда.

Минеральный состав: тальк – 60 %, карбонат – 15-20 %, антигорит – до 10 %, хлорит – до 10 %, магнетит – до 5 %. Структура гранонематобластовая, текстура массивная.

Макроскопическое описание: светло-зеленая порода, представляющая собой спутанно-волокнистую массу талька, игольчатые кристаллы которого ориентированы хаотично, нередко в виде лучистых агрегатов. Слабое ожелезнение придает отдельным участкам породы буроватый цвет, темно-зеленые участки сложены антигоритом. Карбонат часто присутствует в виде отдельных идиоморфных крупных (до 5 мм) кристаллов, на поверхности быстро выветривается.

Микроскопическое описание: практически вся порода сложена сноповидными агрегатами талька (A), сформировавшегося по оливину или ранним серпентинам. Хлорит (B) образует облачные скрытокристаллические скопления. Антигорит слагает отдельные участки в виде игольчатых светло-серых агрегатов, по отдельным зонам также проявлен лизардит. Железистый карбонат (C - брейнерит) концентрируется в интерстициях тальковых полос или образует собственные идиоморфные кристаллы. Отдельные зерна магнетита (D) являются псевдоморфозами по хромиту, на что указывает их унаследованная форма.

Генезис: первичные оливин-пироксеновые гипербазиты с небольшим количеством хромшпинели в условиях амфиболитовой фации превратились в серпентиниты, проходя последовательно стадии от лизардита (наиболее низкотемпературного, через хризотил и антигорит до талька (наиболее высокотемпературного минерала). В результате тальк слагает большую часть пород, подчинены ему реликтовые антигорит и лизардит. Магнетит частично выделился при серпентинизации, частично образовался за счет хромшпинели с наследованием ее форм. Именно благодаря новообразованиям магнетита метаморфизованные ультрабазиты имеют более высокие магнитные свойства, нежели первичные.

Следует строго различать апогипербазитовые метаморфические породы южнее плотины (описанные тальк-карбонатные породы) и сформировавшиеся по небольшим интрузивным телам в зоне разломов севернее плотины. В последнем случае процесс метаморфизма прошел дальше, породы представлены сложным агрегатом вермикулита, талька, карбоната, иногда даже мусковита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. М.: Мир, 1965. В 5-ти т.

2. Вильямс Х., Тернер Ф., Гилберт Ч. Петрография. М.: Мир, 1985. В 2-х т.

3. Музафаров В.Г. Минералогия и петрография. М.: Просвещение. 1964.

2.2 *Петрофизика.*

Учебно-методическая практика в УГГГА является важным этапом подготовки специалистов-геофизиков. Учебная петрофизическая практика проводится на полигоне Верхняя Сысерть или в Екатеринбурге (в зависимости от финансовых возможностей академии).

Цель практики: закрепление теоретического курса, получение практических навыков в измерении физических свойств образцов горных пород и руд, обработке результатов измерений. Главное внимание при организации практики уделяется изучению свойств пород Верх-Сысертского полигона, на котором в дальнейшем проводится учебно-методическая практика по основным геофизическим методам и знакомству с физическими свойствами типичных горных пород и руд.

2.2.1. *Задачи и методы петрофизических исследований*.

Данные. петрофизических исследований имеют определяющее значение при обосновании комплекса геофизических методов и технологии изучения недр, а также методики интерпретации измеренных физических полей.

Среди задач, решаемых на основании петрофизических исследований, можно выделить следующие:

1.-Измерение физических свойств геологических тел (стуктурно-литологические комплексы, пласты, отдельные интрузии, эффузивы, метаморфические образования, рудные тела, залежи углеводородов и т.д.) и зон развития геологических процессов (зоны локального метасоматоза, околорудные зоны, зоны трещиноватости и выветривания и т.д.) с целью определения их физических признаков.

2. Петрофизическая классификация горных пород и полезных ископаемых по одному или нескольким физическим параметрам, позволяющая выделить определенные классы геологических объектов или объединить их в единые структурно-вещественные комплексы (детализация или упрощение геологической классификации экспрессными геофизическими методами.

3. Оценка возраста и условий формирования горных пород. реконструкция истории развития отдельных участков земной коры.

4. Расшифровка геологической природы аномалий физических полей на основе выявления факторов, изменяющих физические параметры горных пород.

5. Подготовка исходного материала для изучения связей между физическими свойствами и другими (геологическими, технологическими, инженерными) признаками горных пород и полезных ископаемых для решения прикладных задач в разведочной и инженерной геологии, горного дела, экологии и т.д.

6. Установление корреляционных связей между различными физическими свойствами с целью уменьшения неоднозначности при комплексной интерпретации нескольких геофизических методов (например, сейсмического и гравитационного), определения одних физических параметров по другим (например, пористости и нефтенасыщенности по данным электрического каротажа).

Основой петрофизических являются лабораторные измерения образцов горных пород и полезных ископаемых. Полученные данные могут быть дополнены измерениями физических параметров в пределах геологических объектов в естественных условиях (на обнажениях, шурфах, горных выработках, скважинах), а также результатами интерпретации геофизических полей при дистанционных (аэро и наземных) исследованиях.

К главнейшим физическим свойствам, определяющим возможность применения различных геофизических методов и чаще всего определяемым в лабораторных условиях, относятся коллекторские, плотностные, магнитные, упругие, электрические свойства.

2.2.2. *Схема изучения физических свойств*.

Изучение физических свойств на образцах обычно включает в себя следующие этапы:

1. Отбор образцов с составлением коллекций (выборок), которые могут быть сформированы по разным признакам в зависимости от задач петрофизических исследований. Например, образцы горных пород предположительно однородного литологического состава или стратиграфической принадлежности, образцы пород единого структурного комплекса, образцы с определенной площади, трассы, скважины, и т.д.

2. Маркирование образцов, составление краткой геологической характеристики.

3. Составление каталога образцов с привязкой, геологической характеристикой, выделением набора признаков (литологические, стратиграфические, фациальные и т.д)., привязка по местности, глубина, условия отбора и т.д.).

4. Размещение в компьютерную базу данных,

5. Механическая подготовка образцов (по размерам, форме и т.д.).

6. Специальная подготовка образцов для измерений некоторых физических свойств (например, сушка для определения пористости или насыщение жидкостью для определения электрических свойств).

7. Проведение основных измерений.

8. Организация контроля точности на основе повторных измерений (внутренний и внешний контроль.)

9. Обработка данных измерений физических свойств и размещение в базу данных;

б. Оценка статистической однородности выборок; определение обобщенных характеристик физических свойств выборок; петрофизическая классификация горных пород и полезных ископаемых; установление корреляционных связей между физическими свойствами.

10. Анализ и обобщение результатов петрофизических исследований.

2.2.3. Особенности измерений и обработки результатов при исследовании неоднородных объектов

Очевидно, что исходным материалом для любых петрофизических построений являются результаты измерений физических свойств горных пород и полезных ископаемых. Под физическими свойствами мы понимаем некоторые количественные характеристики (параметры), которые определяют характер взаимодействия физических полей со средами (физические тела, минералы, горные породы и т.д.) либо определяют способность сред создавать те или иные физические поля. Например, скорость продольных волн, магнитная восприимчивость, удельное сопротивление, соответственно, определяют характер распространения упругих колебаний, способность намагничиваться, характер поля электрического тока в средах. А намагниченность, диффузионно-адсорбционная активность определяют, соответственно, характер магнитного поля и естественного электрического поля, создаваемого самими средами.

Горные породы, как основной объект изучения в петрофизике, неоднородны. Дело в том, что формирование горных пород (и, соответственно, их физических свойств) происходит под воздействием большого числа факторов, как внутренних, так и внешних. Например, при образовании массивов магматических пород их состав и структура определяются следующими основными факторами:

a) Глубиной кристаллизации расплава.
b) Распределением давления и температуры в пределах магматического тела.
c) Фракционной и гравитационной дифференциацией.
d) Перемешиванием расплава.
e) Взаимодействием магмы с вмещающими породами различного состава.

Каждый из перечисленных факторов, в свою очередь, является сложной функцией координат и времени. Результатом будет неоднородность состава, размера зерен, структуры и текстуры в пределах массива и, как следствие, неоднородность физических свойств.

Многообразие действующих факторов, их неопределенность во времени и пространстве позволяют рассматривать их как случайные события, а физические свойства как случайные величины, к которым может быть применен аппарат математической статистики.

При образовании осадочных (например, обломочных) пород главными факторами являются:

a) Вещественный состав пород источника сноса, характер и степень их выветривания.
b) Удаленность бассейна осадконакопления, глубина его, гидродинамические характеристики.
c) Химический состав и степень минерализации вод, окислительно-восстановительный потенциал, Ph и т.д.

В процессе формирования породы эти факторы изменяются в связи с изменениями источников сноса, глубин, гидродинамических и гидрохимических условий, что приводит к изменениям состава обломков, размеров и степени отсортированности зерен, количества и типа цемента и т.д. Возникает первичная неоднородность физических свойств.

На первичную неоднородность может накладываться вторичная, связанная с процессами преобразования: выветриванием, трещиноватостью, метаморфизмом, приносом и выносом вещества и т.д. Масштабы (размеры) неоднородностей могут быть самыми различными. Это могут быть отдельные кристаллы (зерна), прослойки, включения в пределах образца, неоднородности части изучаемого массива (пласта). В связи с этим, возникает необходимость учета неоднородностей и при измерении свойств отдельных образцов и при изучении геологических объектов (массивов, пластов и др.).

2.2.4. Измерение физических свойств отдельных образцов.

При измерении некоторых физических свойств (плотности методом гидростатического взвешивания, скорости упругих волн) сама методика измерений обеспечивает усреднение по всему объему образца в результате полного охвата образца измерительной установкой. В этом случае различия при многократных измерениях одних и тех же образцов связаны лишь с погрешностью измерений.

В других случаях (измерения магнитной восприимчивости каппаметрами, удельного сопротивления 4^x-электродной установкой) исследуется только часть образца. Для характеристики образца в целом проводят несколько (3-6) измерений в разных участках образца и вычисляют среднеарифметическое значение. В этой ситуации различия при многократных измерениях связаны частично с ошибками измерений, частично с разным характером усреднения при различных циклах измерений. Как правило, разделить эти расхождения не представляется возможным.

2.2.5 Измерение выборки образцов по геологическому объекту.

Для изучения геологического объекта (массив, пласт и т.д.) используют результаты измерений серии образцов (выборки), отобранных по этому объекту.

Предположим, что мы имеем **N** измерений некоторого физического параметра ***X***, среди которых присутствуют максимальное X_{max} и минимальное X_{min} значения. Разобьем весь диапазон измеренных значений на **m** интервалов с шириной каждого ΔX:

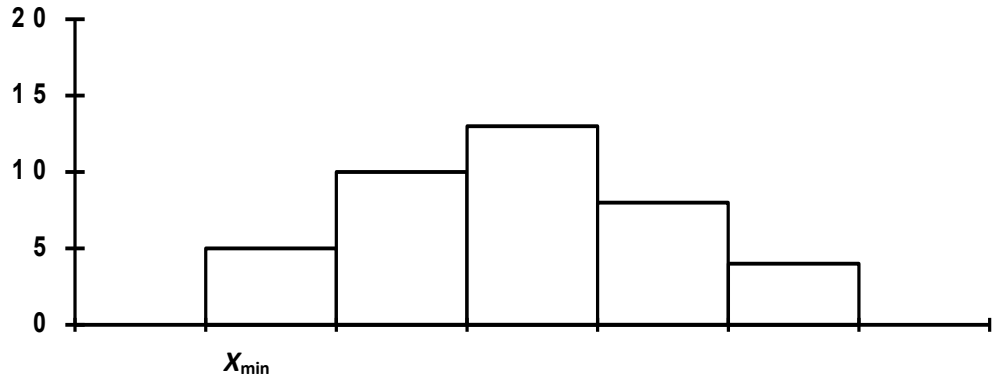
$$\Delta X = (X_{max} - X_{min})/m \qquad (2.1)$$

Количество интервалов **m** связано с объемом выборки **N** и обычно определяется формулой Старджеса:

$$m=3{,}3\log N+1 \qquad (2.2),$$

-где **m** округляется до целого числа.

Далее подсчитывают n_i - число значений параметра ***X***, попадающих в **i**-й интервал (**i**=1,2...**m**), и строят график зависимости n_i или (n_i/**N**) *100**%** от ***X.*** В каждом интервале найденное значение изображается в виде отрезка горизонтальной линии. Диаграмма такого вида носит название ***гистограммы.*** На рисунке (5.1) приведен пример гистограммы для **N**=40, **m**=5.



7.Гистограмма распределения параметра X

Часто для характеристики распределения какого-либо свойства нет необходимости строить вариационную кривую - достаточно указать значения основных параметров распределения. К таким параметрам относятся:

a) Модальное значение (мода) $\boldsymbol{X_{мод}}$ - значение, встречающееся наиболее часто.

b) Среднее значение, которое рассчитывается по формуле:

$$\overline{X} = \frac{\sum_i X_i \cdot n_i}{N},$$

где X_i - середина интервала,

n_i - число образцов в i-ом интервале,

N - общее количество образцов;

c) Выборочная дисперсия D характеризует степень разброса значений измеряемой величины и определяется по формуле:

$$D = \frac{\sum_i \left(X_i - \overline{X}\right)^2 \cdot n_i \cdot}{N}$$

Вместо дисперсии для характеристики степени разброса часто используют выборочный стандарт распределения $S = \sqrt{D}$, размерность которого совпадает с размерностью измеряемой величины. При нормальном распределении ширина вариационной кривой на высоте 0,6 от максимального значения приблизительно равна $2S$.

Гистограмма содержит в себе все статистические характеристики объекта исследования. В частности, величина $(\mathbf{n_i}/\mathbf{N})*100\mathbf{\%}$ представляет вероятность (в %) для данного объекта существования значений параметра $\boldsymbol{X}$ в пределах **i**-го интервала. При построении реальных гистограмм не следует абсолютизировать полученный результат. Дело в том, что мы всегда имеем дело с ограниченными выборками и каждое значение

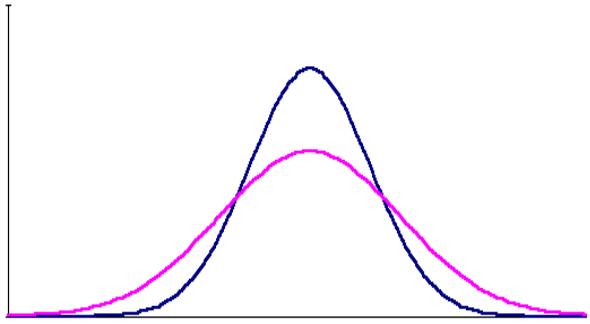
$\mathbf{n_i}$ получено с погрешностью, вероятное значение которой приближенно оценивается как $\sqrt{\mathbf{n_i}}$. При неограниченном возрастании объема выборки ***N***, число интервалов **m** также стремится к бесконечности, а ширина интервала ΔX к нулю, и мы получаем непрерывную кривую распределения, которую часто называют вариационной кривой. Приближенно вариационную кривую можно получить путем визуального сглаживания гистограммы таким образом, чтобы площади между осью абсцисс и гистограммой и осью абсцисс и вариационной кривой были равны.

Опыт изучения физических свойств показывает, что обычно распределение их подчиняется нормальному или логнормальному закону. При нормальном законе распределение описывается выражением:

$$\mathbf{F}(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{(X - m_x)^2}{2\sigma^2}\right) \qquad (2.3),$$

где $\mathbf{m_x}$- математическое ожидание (среднее значение) параметра, **σ -** стандарт распределения. Величина $\mathbf{D=\sigma^2}$, представляющая собой математическое ожидание величины $(X\text{-}\mathbf{m}_x)^2$, носит название ***дисперсии***.

Нормальному закону подчиняется обычно распределение плотности, пористости, скорости продольных волн. На рис.5.2 приведен пример нормального распределения с двумя различными значениями стандарта.



8. Кривые нормального распределения.

Кривая характеризуется симметрией относительно моды и полностью определяется двумя величинами - $\mathbf{m_x}$ и $\mathbf{D=\sigma^2}$.

Логнормальный закон соответствует случаю, когда нормальному закону подчиняется логарифм параметра ($\log X$). Этому закону обычно подчиняется распределение магнитной восприимчивости, удельного электрического сопротивления, нефтенасыщенности. Для практического построения гистограмм или вариационных кривых в предположении существования логнормального закона, по измеренным значениям X_k вычисляются значения $\log X_k = Y_k$ которые обрабатываются способом, описанным выше.

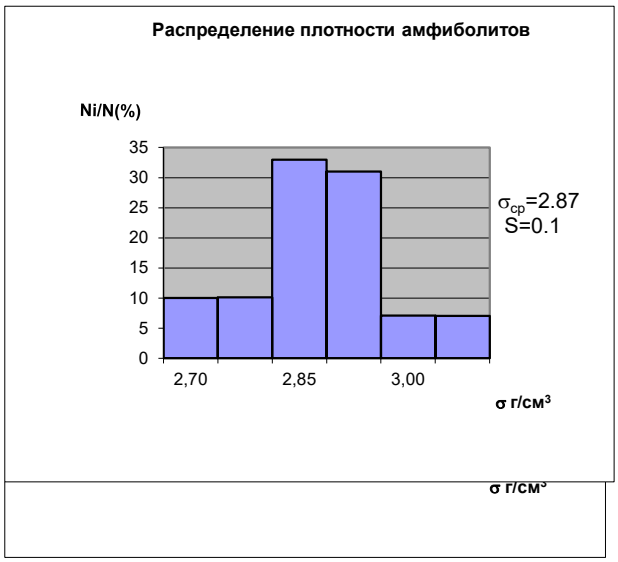
Реальные кривые распределения часто отличаются от теоретических. Они могут быть асимметричными и даже иметь два и более максимумов.

В первом случае появляются новые характеристики распределения (одна или более), например параметр асимметрии. В любом случае выборки считаются статистически одинаковыми если все (!!!) статистические параметры их одинаковы.

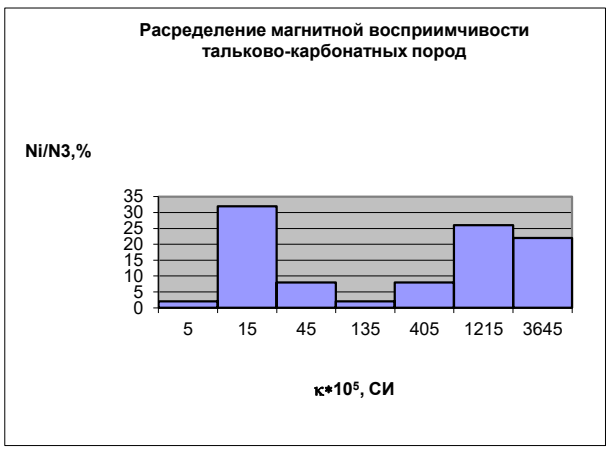
Асимметрия обычно связана со вторичными процессами изменения физических свойств в результате выветривания, регионального или локального метаморфизма и т.д.

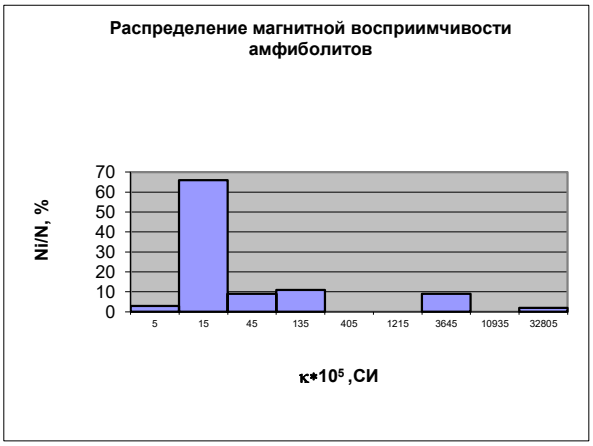
Второй случай свидетельствует о неоднородности выборки: в одну группу объединены различные по каким-либо характеристикам породы (возраст, условия образования, минеральный состав, структура, степень изменения и т.д.). Необходимы дополнительные исследования для разделения выборки. Примеры гистограмм пород района приведены на рис.9. Обратите внимание на пологий левый край гистограмм распределения плотности. Вероятнее всего часть выборки представлена выветрелыми образцами.

9.Гистограммы распределения плотности и магнитной восприимчивости пород В-Сысертьского района.



На гистограммах магнитной восприимчивости (амфиболиты, тальково-карбонатные породы) наблюдаются по два максимума в распределении, что обусловлено включением выборку различных по магнитным характеристикам пород. В этом случае необходимо разделить выборку по граничным значениям параметра и попытаться установить различия по литолого-петрографическим либо пространственно-структурным признакам. Для гранитов и углисто кремнистых сланцев гистограммы не приведены, так как это практически не магнитные породы (k=(1-20)*10^{-5} ед. СИ).





2.2.5, Обработка результатов измерений

Оценка погрешности измерений

Любые измерения неизбежно сопровождаются погрешностями (ошибками).

* По способу выражения погрешности принято делить на **абсолютные** и **относительные**. Абсолютные имеют размерность измеряемой величины, относительные являются безразмерными.

* По типу связи между погрешностью и измеряемой величиной различают **постоянные**, значение которых не зависит от самой измеряемой величины, и **пропорциональные** погрешности, значение которых пропорционально измеряемой величине. Пропорциональные погрешности становятся постоянными, если оценивать их в относительной шкале. Как правило, измерениям физических свойств, значения которых могут изменяться в широких пределах, присуще наличие пропорциональных погрешностей, тогда как при малом диапазоне значений погрешности можно считать постоянными.

* В зависимости от характера причин их возникновения, погрешности разделяют на три группы: **систематические, случайные и грубые** (промахи).

Грубые ошибки возникают из-за невнимательности оператора, сбоев аппаратуры и др. подобных причин. Обычно результат измерений при этом сильно отличается от истинной величины и легко обнаруживается при внимательном просмотре.

Систематические погрешности являются следствием несовершенства метода измерений, неточной градуировки или настройки измерительной аппаратуры. Они остаются постоянными при выполнении серии измерений (в абсолютной или относительной шкале). В зависимости от знака погрешности результаты измерения могут систематически завышаться либо занижаться. Систематические погрешности исключают путем введения поправок, найденных экспериментально. Значения поправок можно определить путем проведения измерений на стандартных образцах либо сопоставлением с результатами контрольных измерений тех же образцов, выполненных более точными приборами с использованием более совершенных методов измерения.

Случайные погрешности обусловлены влиянием на результат измерения значительного количества неконтролируемых факторов: вибрации, неровностей поверхности образца, трения в опорах измерительных приборов, наличия потоков воздуха и др. причин. При этом равновероятны как положительные, так и отрицательные отклонения от истинного значения. В качестве меры случайной погрешности принято использовать абсолютную либо относительную (в случае пропорциональной ошибки) среднюю квадратическую погрешность.

Средняя квадратическая погрешность может быть найдена путем проведения многократных измерений на одном и том же образце. По полученным **n** значениям измеряемой величины $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{n-1}, x_n$ вычисляют среднее арифметическое, используемое в качестве приближения к истинному значению:

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad (2.4)$$

Среднюю квадратическую погрешность единичного измерения находят по формуле

$$\Delta x_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n-1}} \qquad (2.5)$$

Случайная погрешность среднего арифметического из **n** измерений меньше погрешности единичного измерения:

$$\Delta \bar{x}_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{n(n-1)}} \qquad (2.6)$$

Вместо проведения многократных измерений на одном образце для определения случайной погрешности обычно проводят двойные (контрольные) измерения на ряде образцов. Контроль, выполняемый по той же методике, на том же приборе, называют **внутренним**. Если контрольные измерения выполняются в другой лаборатории, по другой методике или на другом приборе, такой контроль называют **внешним**. Как правило, для внешнего контроля используются более совершенные методики и приборы.

Объем контрольных измерений зависит от общего количества образцов и составляет 5÷10%, а в особо ответственных случаях используют 100% контроль. При двойных измерениях вычисление абсолютной средней квадратической погрешности единичного измерения производится по формуле:

$$\Delta x_{сл} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{1i} - x_{2i}\right)^2}{2n}} \qquad (2.7),$$

где **n** - число контрольных измерений,

x_{1i} - результат основного измерения **i**-го образца,

x_{2i} - результат контрольного измерения **i**-го образца.

Если случайная погрешность вычисляется по данным внешнего контроля, в результаты измерений сначала должна быть введена поправка за имеющееся систематическое расхождение.

Как уже отмечалось, если ошибка пропорциональна значению измеряемой величины, относительная погрешность постоянна, поэтому в качестве меры случайной ошибки используют **относительную среднюю квадратическую погрешность**:

$$\delta x_{сл}\% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_{1i} - x_{2i}}{\bar{x}_i}\right)^2}{2n}} \times 100\% \qquad (2.8),$$

где **n** - число контрольных измерений,

x_{1i} - результат основного измерения **i**-го образца,

x_{2i} - результат контрольного измерения **i**-го образца,

$\bar{x}_i = \frac{x_{1i} + x_{2i}}{2}$ - среднее по результатам основного и контрольного измерений **i**-го образца.

Систематическая погрешность может быть обнаружена ***только при внешнем контроле***, так как при повторных измерениях тем же прибором и по той же методике ошибка будет повторяться, и расхождения могут быть только случайного характера. Контрольные измерения единичных образцов, как правило, не позволяют выявить систематическое расхождение, так как оказывается невозможно разделить случайную и систематическую составляющую погрешности. Однако, при наличии ряда контрольных измерений такая возможность появляется. При суммировании расхождений между основными и контрольными анализами (с учетом знака) случайные погрешности разных знаков взаимно компенсируются, тогда как систематическая погрешность, знак которой постоянен, накапливается и может быть вычислена по формуле:

$$\Delta x_{\text{сист}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_{1i} - x_{2i})}{n} \qquad (2.9)$$

Так как случайные ошибки разного знака в этой формуле именно в силу своего случайного характера компенсируются неполностью, результат может получиться ненулевым даже при полном отсутствии систематической погрешности. Поэтому считается, что систематическая погрешность отсутствует, если значение, найденное по формуле (6.6), не превышает величины $\frac{5\Delta x_{\text{сл}}}{\sqrt{n}}$.

При пропорциональном характере ошибок результаты измерения могут регулярно завышаться (или занижаться) в $k = 1 + \frac{\delta_{\text{сист}}\%}{100}$ раз. В этом случае систематическую погрешность можно найти, просуммировав относительные расхождения основных и контрольных измерений:

$$\delta_{\text{сист}}\% = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{x_{1i} - x_{2i}}{\bar{x}_i}}{n} \times 100\% \qquad (2.10)$$

Вычисление погрешностей производят, сводя в таблицу результаты основных и контрольных измерений. Ниже приведена форма таблицы для вычисления абсолютных погрешностей.

Наличие в результатах хотя бы одного промаха может существенно исказить оценку погрешности, поэтому попавшие в таблицу значения с грубыми ошибками просто вычеркиваются. Согласно теории, вероятность появления случайной ошибки с величиной, превышающей среднее квадратическое значение погрешности в три раза и более, составляет 0,3%, поэтому все значения, где расхождение результатов анализа превышает указанную величину, следует считать промахами и не учитывать при расчете случайной и систематической погрешности.

Форма таблицы для расчета относительных погрешностей отличается только содержанием колонок 5 **и 6**, в которых вычисляется, соответственно, относительное

расхождение и его квадрат. Относительное расхождение в этой таблице выражено в процентах.

2.2.6 Задание.

1. По указанию преподавателя провести отбор образцов горных пород.
2. Провести определение типов горных пород, составить каталог.
3. Выполнить измерение физических свойств с организацией контроля и оценкой погрешностей измерений.
4. Занести данные измерений в каталог.
5. Провести статистическую обработку физических параметров основных типов. горных пород района с расчетом статистических параметров, разделением сложных выборок.
6. Данные измерений вынести на петрофизические карты.

Литература.

1.Определение петрофизических характеристик по образцам. Москва. Недра.1977.

2. Г.С.Вахромеев, Л.Я.Ерофеев и др. Петрофизика. Изд. Томского Унив. 1997.

Глава 3.

Изучать старуху-природу

Мы наукой на век заряжены,

За Россию – в огонь и в воду,

За карьерой – в любые скважины.

Сконечный Ю., выпускник СГИ 1962.

Скважинная геофизика и каротаж. И.Г.Сковородников.

.1. Введение. Наиболее распространенным, важным и достоверным методом геологической разведки является поисково-разведочное бурение. В результате колонкового бурения геологи получают в свое распоряжение керн - тонкий столбик горной породы, извлеченный из скважины. Изучая керн, геологи определяют последовательность залегания пластов, их мощность, литологию, т.е. минералогический и вещественный составы, содержание полезных ископаемых, условия залегания и т.п. Однако, при бурении с извлечением керна никогда не удается добиться полного, стопроцентного выхода керна из-за того, что одна часть пород разрушается при бурении, другая теряется при подъеме керна с забоя скважины на поверхность. Это приводит к неточностям и ошибкам в построении геологического разреза скважины по данным документации керна: пропуску отдельных пластов, искажению их мощности, неточному определению положения контактов пород.

В исправлении этих ошибок и неточностей огромную роль играет раздел ГИС, называемый каротажем.

Каротаж — это совокупность геофизических методов изучения геологического строения разрезов (стенок) буровых скважин. Измерения в каротаже производятся непрерывно при перемещении измерительного устройства (скважинного снаряда) по стволу скважины, поэтому отличительной особенностью каротажа является очень высокая детальность и точность исследовании. С помощью методов каротажа определяют последовательность залегания горных пород в разрезах скважин, их мощность, физические свойства, содержание в них полезных ископаемых. Методы каротажа подразделяются по природе изучаемых в них физических полей на электрические, радиоактивные и прочие. Каротаж — это наиболее развитый и дифференцированный раздел ГИС.

Другой важный раздел ГИС - это так называемые "операции в скважинах", имеющие целью изучение технического состояния резервуара скважин и выполнение в скважинах различных операций, направленных как на уточнение их геологического строения, так и на извлечение из скважин полезных ископаемых. Примером методов этого раздела могут служить кавернометрия (определение среднего диаметра) и инклинометрия (определение углов искривления) скважин, отбор проб пластовых флюидов и отбор грунтов из стенок скважин, дефектометрия обсадных колонн (ОК) и

др. методы. Сюда же относятся и прострелочные работы в скважинах: перфорация ОК, отбор проб грунтов стреляющими грунтоносами, торпедирование. Операции в скважинах, выполняемые геофизической службой, имеют важное значение, поскольку в конечном итоге позволяют предотвратить аварии при бурении и тем самым избежать больших дополнительных затрат.

Третьим разделом ГИС является скважинная геофизика - геофизические методы изучения геологического строения межскважинного и призабойного пространства. Таким образом, скважинная геофизика, в отличие от каротажа, изучает очень большие объемы пород. В настоящее время этот раздел ГИС находит применение, главным образом, на рудных месторождениях, характеризующихся большой изменчивостью геологического строения как по простиранию, так и по падению пород.

Понятно, что за время учебно-методической практики невозможно изучить все методы ГИС, поэтому учебно-методическая практика по ГИС имеет целью ознакомить студентов с наиболее распространенными методами этой отрасли разведочной геофизики, привить им навыки работы с современной каротажной аппаратурой, дать возможность освоить методику проведения работ непосредственно на скважинах, обучить наиболее простым приемам оперативной интерпретации и геологическому истолкованию полученных результатов.

Программа практики по ГИС составлена с учетом специализации студенческих групп, а также технического состояния учебных скважин и имеющегося аппаратурного обеспечения. Основное внимание в программе уделено методам каротажа, из операции в скважинах и скважинной геофизики в программу включены только отдельные методы.

В настоящем руководстве будут описаны только общие характеристики применяемых методов. Описание аппаратуры и конкретных схем приведено в отдельных методических разработках [4,11,14,15].

Для проведения учебно-методической практики по ГИС на территории базы практик УГГГА в пос. В.Сысерть пробурены три учебных скважины глубиной от 140 до 180 м.

Характерной особенностью скважины № 1 является наличие в ней сульфидной минерализации; скважине № 2- присутствие в ее разрезе мощной дайки гранитов, обладающих повышенным содержанием радиоктивных элементов и, как следствие, аномальной высокой радиоактивностью; особенность скважины № 3 –чередование в ее разрезе пачек графито-кварцевых сланцев и амфибол-биотитовых гнейсов. Точное местоположение и мощность различных литологических разностей в разрезе исследуемых скважин и предстоит определить в результате проводимой учебно-методической практики. Практика по ГИС организуется таким образом, чтобы каждая бригада студентов провела весь комплекс исследований на одной из этих скважин и в конце практики могла выполнить сводную интерпретацию полученных материалов, решить поставленные геологические и технические задачи, и сравнить полученные

результаты с геологическим разрезом скважины, составленным по данным описания кернового материала.

3.2. КАРОТАЖНАЯ АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ

Аппаратура для проведения каротажа подразделяется на основную и специальную.

Основная используется для выполнения многих методов ГИС. Это так называемые "каротажные станции и лаборатории.

Специальная используется для выполнения отдельных методов, к ней относятся скважинные снаряды.

Электрическая и механическая связь между каротажной станцией и скважинным снарядом осуществляется через каротажный кабель (одно-, трех- или семижильный).

Каротажные станции размещаются, как правило, на автомашинах повышенной проходимости и включают в себя измерительную аппаратуру и спуско-подъемное оборудование.

Обобщенная функциональная схема измерильной аппаратуры каротажной станции представлена на рис.3. I.

1.Силовой блок предназначен для питания всех остальных узлов и блоков лаборатории необходимыми переменными и постоянными напряжениями. Блок содержит мощный трансформатор, первичная обмотка которого подключается к внешней электрической сети или собственному генератору (бензоэлектрическому агрегату) каротажной станции. Вторичных обмоток у трансформатора несколько, от них питаются устройства стабилизации, контроля и регулирования напряжения или тока, размещенные в остальных блоках станции. Конструкция силовых блоков каротажных станций унифицирована.

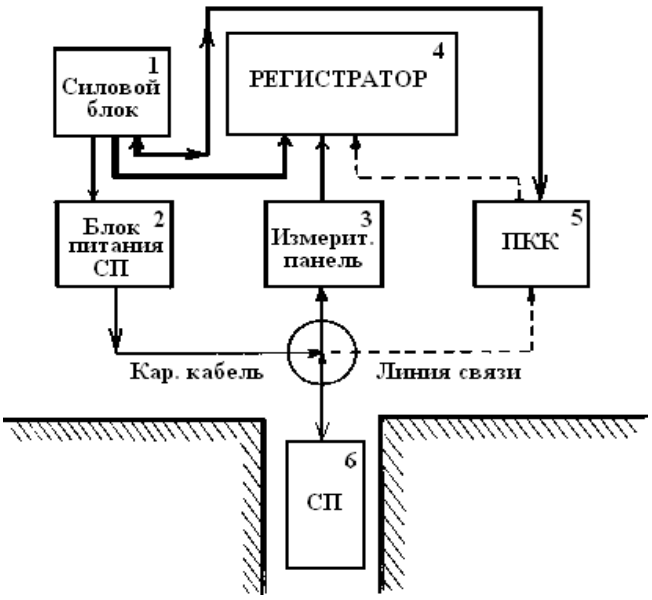
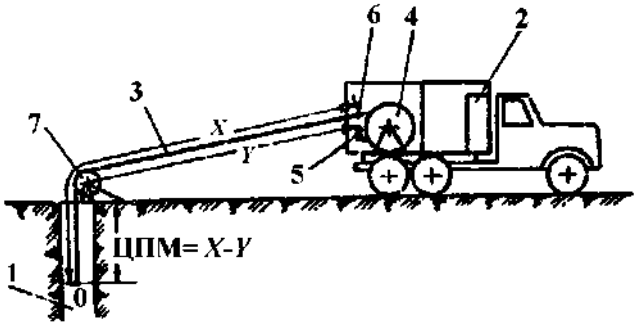


Рис.3.1.Обобщенная функциональная схема измерительной аппаратуры каротажной станции.

Рис.3.2. Определение ’’цены первой метки’’ на кабеле.

1-скважина; 2-каротажная станция; 3-каротажый кабель; 4-лебедка; 5-кабелеукладчик; 6-первая мотка на кабеле; 7-блок-баланс.



2.Блок питания скважин снарядов содержит приборы контроля и регулирования тока, необходимого для питания скважинного снаряда. Этот блок в станции может быть сменным, т.к. /для питания одних скважинных приборов (СП) нужен постоянный ток, для других - низкочастотный (5 25 Гц) переменный, для третьих - переменный ток средней частоты (300-2400 Гц).

3.Измерительная панель отфильтровывает полезный сигнал, пришедший из скважинного прибора, от помех, усиливает его и преобразует в постоянный ток. Измерительные панели могут быть свои (сменные) для каждого скважинного прибора.

4.Регистратор — это основная часть каротажной станции. Регистратор обеспечивает запись измеряемого параметра в функции глубины скважины в аналоговой или цифровой форме. В качестве аналоговых регистраторов используются каротажные светолучевые осциллографы (Н-015, Н-028, Н-065) или автоматические каротажные потенциометры (например, ПАСК-8). В качестве цифровых - накопители на магнитной ленте с аналого-цифровыми преобразователями, например, Н-078.

Регистраторы включают в себя различные дополнительные устройства для повышения точности измерений: отметчики меток глубин и марок времени, приспособления для разграфки ленты вертикальными и горизонтальными линиями, компенсаторы поляризации, переключатели масштабов глубин.

5.Панель контроля каротажа (ПККК) служит для обеспечения самого процесса каротажа. Она содержит счетчик глубин, приборы для измерения скорости подъема и силы натяжения кабеля, приспособления для "отбивки11 меток глубин.

6.Скважинные приборы очень разнообразны. Они содержат, как правило, первичные преобразователи измеряемых величин в электрический сигнал и некоторые вспомогательные блоки.

Спускоподъемное оборудование включает в себя лебедку с каротажным кабелем, собственный генератор переменного тока с бензиновым двигателем, комплект соединительных проводов. Лебедка с кабелем имеет привод от двигателя автомашины.

Синхронное перемещение диаграммной ленты и скважинного прибора достигается с помощью электрической автосинной (или сельсинной) передачи.

Более подробно устройство конкретных каротажных станций и скважинных приборов описано в специальной литературе [5,7,9] и в соответствующих инструкциях, которые выдаются студентам по мере необходимости.

Рис. 3.3. Общий вид компьютерризированной каротажной станции "Мега".

На рис.3.3. представлен общий вид компьютезированной каротажной станции "Мега", безвозмездно переданной кафедре геофизики Западно-Сибирской корпорацией «Тюмень- промгеофизика». 3.3. Правила техники безопасности при проведении каротажа. При проведении ГИС необходимо помнить, что источниками опасности являются: движущийся кабель и работающая лебедка, источники тока и электрооборудование.

При работе на скважине необходимо соблюдать следующие правила:

Каротажную станцию на буровой устанавливают так, чтобы была обеспечена хорошая видимость устья скважины. Каротажную станцию после установки необходимо надежно застопорить, подложив под колеса тормозные упоры.

Всякие работы на каротажной станции, связанные с ее подключением к сети, начинать с заземления станции. В качестве заземления используют металлический штырь, который забивают во влажную почву не менее чем на 0,5 м.

Перед спуском снаряда в скважину на кабеле необходимо установить контрольную метку ("ведьму") для того, чтобы предотвратить затаскивание скважинных снарядов на блок-баланс при их подъеме из скважины.

При спуске и подъеме снаряда категорически запрещается находиться в лебедочном отделении станции или просовывать руки через перегородку из аппаратурного отдаления в лебедочное.

Запрещается укладывать кабель руками или помогать кабелю спускаться в скважину, вращая лебедку руками.

Перед началом подъема кабеля необходимо отсоединить ходовую часть автомобиля от мотора.

Запрещается затаскивание скважинных снарядов на блок-баланс или кабелеукладчик лебедки.

При сильном натяжении кабаля, освобождающегося от "прихвата" в скважине, запрещается находиться между устьем скважины и лебедкой.

Во время грозы необходимо отсоединить станцию от внешней сети, а провод "бесконечность" от станции.

Студенты допускаются к прохождению практики по ГИС, только после ознакомления с настоящими правилами.

В отсутствии преподавателя ответственность за нарушение правил техники безопасности при работе на скважине возлагается на бригадира.

3.4. МЕТОДЫ КАРОТАЖА

В зависимости от специализации учебных групп в программу практики по ГИС включено разное количество методов каротажа. По каждому из методов студенты должны четко представлять себе физическую сущность метода, его принципиальную схему, знать основные расчетные формулы, методику измерений и основные правила интерпретации. Кроме того, студент должен уметь объяснить результаты, полученные по каждому из методов.

Все эти вопросы, в порядке их перечисления, должны быть отражены в отчете студента, который составляется в день прохождения метода и на следующее утро представляется для проверки преподавателем. Отчеты должны быть индивидуальные, комплект графических приложений (каротажные диаграммы, инклинограмма, результаты поверок и т.п.) - общий для всей бригады.

3.4.1. Подготовительные операции. Развертывание и настройка станции, определение цены первой метки (ЦПМ)

При выполнении работ по геофизическим исследованиям скважин каротажную станцию устанавливают в 10-20 м от скважины таким образом, чтобы ось вращения лебедки с кабелем была перпендикулярна линии, соединяющей середину лебедки с устьем скважины. Между лебедкой и устьем не должно быть посторонних предметов.

"Развертывание" станции начинают с установки заземления. Затем сматывают с катушки в лебедочном отделении сетевой кабель, дотягивая его контактную вилку до ближайшей розетки внешней сети. Одновременно сматывают соединительный кабель с другой катушки, предназначенной для подключения сельсина-датчика, и доставляют концевой штепсельный разъем (ШР) на нем к устью скважины. На устье скважины устанавливают и закрепляют блок-баланс таким образом, чтобы он был направлен на середину барабана лебедки, а каротажный кабель с него проходил через центр сечения скважины (рис 3.3.).

На блок-баланс надевают сельсин-датчик так, чтобы шестеренка на оси последнего вошла в зацепление с соответствующей шестеренкой на оси блок-баланса. Подключают ШР соединительного кабеля к гнезду на торце сельсина-датчика.

Соединяют штепсельные разъемы на щечках катушек с сетевым и сельсильным кабелем с соответствующими отрезками кабелей, идущих к аппаратурному стенду станции.

Включают в сетевую розетку штепсельную вилку сетевого кабеля.

Включают питание станции и производят ее настройку согласно соответствующей инструкции. С помощью тестера определяют назначение штырьков коллекторного кабеля.

В отстойник с буровым раствором (или яму с водой) опускают поверхностный электрод-"рыбу".

Измеряют расстояние X от точки записи до первой метки на кабеле, для чего растягивают каротажный кабель со скважинным снарядом по прямой линии на поверхности земли.

Опускают снаряд в скважину и, затормозив лебедку, измеряют расстояние У от поверхности земли, через блок-баланс до кабелеукладчика каротажной станции. Вычисляют "цену первой метки" (ЦПМ = X - У или, если X < У , ЦПМ = (X + 20) - У), как это показано на рис.3.2.

При том же положении скважинного снаряда, опущенного в скважину, но расположенного у поверхности земли, напротив порога лебедочного отделения станции на кабеле привязывают так называемую "контрольную метку" или "ведьму". Для контрольной метки используют либо полоску цветной ткани, либо проводок в яркой изоляции, либо какой-нибудь другой подручный материал. Контрольную метку устанавливают заново перед каждым каротажем, старые контрольные метки при этом снимают. Нужна контрольная метка для того, чтобы предотвратить аварии, связанные с затаскиванием скважинного снаряда на блок-баланс. При подъеме кабеля лебедчик должен внимательно следить за контрольной меткой и не допускать ее перемещения дальше порога лебедочного отделения станции (не пускать "ведьму" в станцию).

После установки контрольной метки, показания счетчика глубин сбрасывают на "нуль11, включают питание датчика глубин (сельсин-датчик), и снаряд опускают в скважину. Скорость спуска не должна превышать 2,5-3 тыс. м/ч.

При подъеме снаряда лебедчик "отбивает" метки на диаграмме, нажимая кнопку "Метка" на панели лебедчика в момент прохождения кабельной метки через кабелеукладчик.

3.4.2 Электрический каротаж

Метод кажущихся сопротивлений - КС

Метод КС - один из основных методов каротажа. Назначение метода – расчленение геологического разреза скважин по электрическое сопротивлению и определение величины этого сопротивления.

В методе КС измеряется именно кажущееся, а не удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород, т.к. его величина зависит не только от УЭС, но и еще от ряда факторов: длины зонда, мощности пласта и диаметра скважины,

сопротивления жидкости, заполняющей скважину, сопротивления вмещающих пород и пр.

При благоприятных условиях по величине КС может быть определено УЭС пород [3,13].

Измерение КС производится, как правило, с помощью двух питающих электродов AB, через которые пропускают ток I и двух приемных электродов MN, между которыми измеряют разность потенциалов ΔU.

Один из упомянутых электродов (B или N) заземляют на поверхности вблизи устья скважины. Обычно его помещают в отстойник с буровым раствором или яму с водой. Три других электрода перемещают по стволу скважины, сохраняя неизменным расстояние между ними. Эти три электрода образуют зонд КС кажущееся сопротивление.

В зависимости от назначения электродов и расстояния между ними, различают градиент- и потенциал-зонды (см.рис.3.3) за точку записи (точку 0) градиент-зонда принимают середину расстояния между сближенными парными электродами (AB или MN) за точку записи потенциал-зонда - середину расстояния между непарными электродами A и M. Длину зонда обозначают буквой L Для градиент-зонда его длиной является расстояние от точки записи до удаленного электрода, т.е. AO или MO, для потенциал-зонда L = AM.

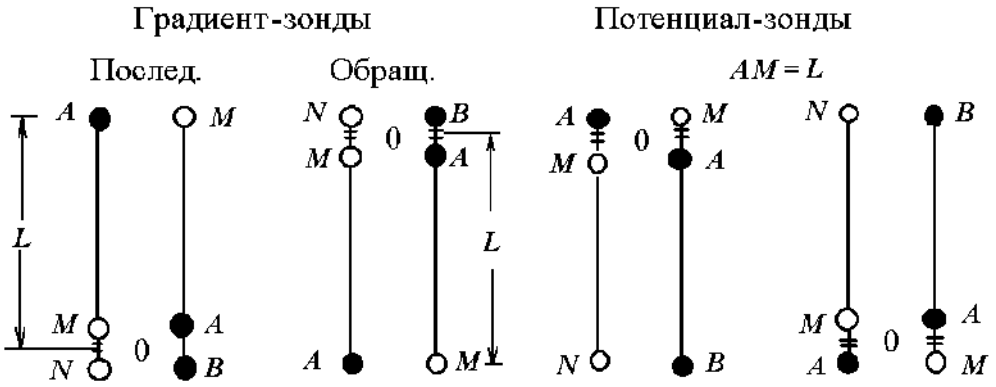


Рис.3.3. Типы зондов КС.

Зонды КС для трехжильного кабеля, - отечественной промышленностью не выпускаются и их приходится изготавливать работникам геофизической службы самостоятельно. Для изготовления зонда используют каротажный кабель (лучше всего шланговый), сырую резину, тонкую резиновую ленту (ленту пара), изоленту, шпагат. Электроды зонда навивают из полосок листового свинца. Выше и ниже электродов располагают "буфера" из неэлектропроводного материала - сырой резины или резиновой изоляции кабеля. Буфера служат для уменьшения влияния скважины на результаты измерения КС. Внешний вид зонда КС представлен на рис.3.4., а его изготовление подробно описано в [4].

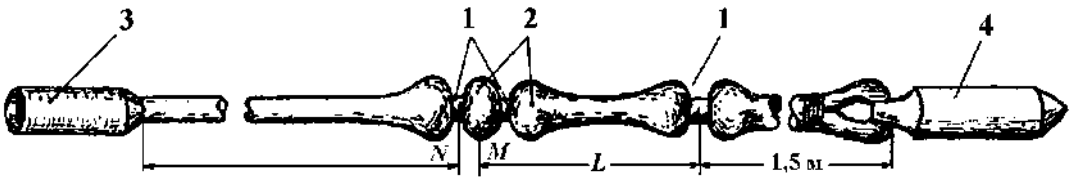


Рис.3.4. Общий вид зонда КС. 1-электроды; 2-буфера; 3-соединительная полумуфта;4-груз.

Обобщенная: схема для записи диаграмм КС представлена на рис.3.5. Схема содержит токовую и измерительную цепь.

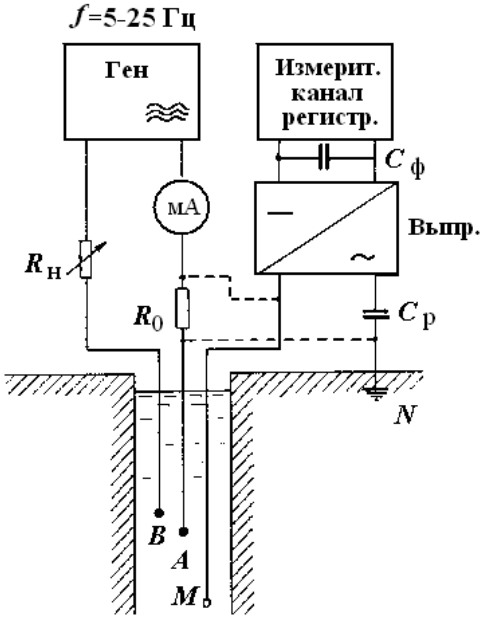


Рис3.5. Принципиальная схема метода КС.

Токовая цепь включает источник переменного тока низкой (от 5 до 25)частоты - Ген, миллиамперметр мА, переменное нагрузочное сопротивление RH контрольный шунт R0 и питающие электроды А и В.

Приемная цепь содержит измерительные электроды MN, разделительный конденсатор Ср , выпрямитель и регистрирующий прибор.

Питание токовых электродов АВ осуществляется переменным током низкой частоты с тем, чтобы избавиться от мешающего действия естественных потенциалов Л $\Delta U_{кс}$ на результаты измерения КС. В качестве источника питания используют специальные электронные генераторы (например, в станциях СК-1), электромашинные усилители (АКС/Л-64) или выпрямитель с электромеханическим пульсатором (станции АЭКС). Нагрузочное сопротивление $R_{н}$ служит для регулировки питающего тока, а миллиампермвтр мА для его визуального контроля. Контрольный шунт R0 предназначен для измерения силы тока в цепи АВ тем же регистрирующим прибором, которым измеряется КС.

При пропускании переменного тока в цепи АВ между электродами М и N возникает разность потенциалов ΔU ХС, имеющая частоту питающего тока. Эта разность потенциалов выпрямляется выпрямителем Выпр и поступает на регистрирующий

прибор Рег. Конденсатор СФ служит для сглаживания пульсаций после выпрямления сигнала, конденсатор СР не пропускает на вход канала КС постоянную разность потенциалов пс.

Запись диаграмм осуществляют в следующем порядке.

После установки каротажной станции на скважине, подключения ее к сети и настройки, включают счетчик глубин и опускают зонд за забой. Собирают схему КС и на вход измерительного канала КС подают разность потенциалов с контрольного шунта. Добиваются расчетного значения отклонения l0. Фиксируют это отклонение на диаграммной ленте, также как и нулевой уровень (положение блика до включения тока в цепи АВ). Затем отключают измерительный канал КС от контрольного шунта и подключают его к приемным электродам MN. При этом блик гальванометра должен отклонится вправо от нуля. Если блик отклоняется влево, нужно сменить полярность измеряемого напряжения, снимаемого с электродов MN. Включают нужный масштаб глубин и начинают подъем зонда, фиксируя на диаграммной ленте все изменения измеряемой величины? КС. Метки глубин "отбивают" без остановки подъема снаряда. После окончания каротажа на диаграмме повторно записывают нулевой уровень и величину отклонения l0.

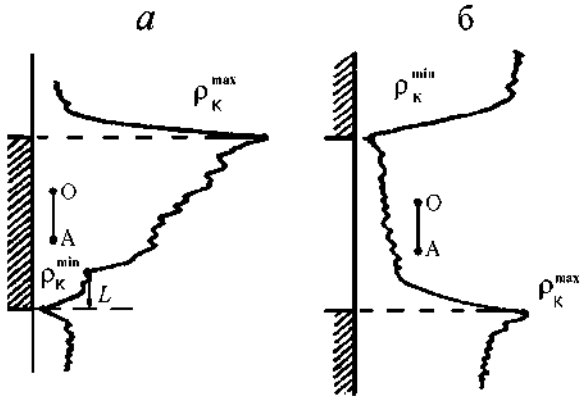


Рис.3.6. Диаграммы КС над мощным пластом высокого (а) и низкого (б) сопротивлений.

Показателем правильности записанной диаграммы КС может служить зона нулевых значений КС в верхней части кривой, соответствующей части скважины, обсаженной металлическими трубами. От уровня кривой КС над обсадными трубами разбивают масштаб диаграммы через каждые 2 см (большую клетку).

После обработки диаграммы приступают к ее интерпретации. На диаграмме определяют положение нижнего конца ("башмака") обсадной трубы, выделяют зоны

низкого и высокого сопротивления, увязывают их с геологическим строением разреза и изменениями диаметра скважины [1,3,6].

Как показывает теория метода КС [1,3,6], градиент-зонды выделяют асимметричными кривыми пласты высокого и низкого сопротивления.

Обращенный градиент-зонд "отбивает" кровлю мощного пласта высокого сопротивления максимумом, а подошву - минимумом КС. Для пластов низкого сопротивления соотношение обратное (см. рис.3.7.). Тонкие пласты создают более сложные аномалии КС. Правила интерпретации кривых КС над пластами различной мощности и разного сопротивления описаны в учебниках и методических разработках

Метод потенциалов самопроизвольной поляризации - ПС

Метод ПС заключается в измерении потенциалов естественного электрического поля по стволу скважины. Причиной возникновения полей ПС, как известно [1,3,6] служат диффузионно-адсорбционные, фильтрационные или окислительно-восстановительные процессы.

В учебных скважинах В.Сысертской базы преобладают поля последнего типа, связанные с окислением сульфидных минералов и графита, входящего в состав графито-кварцевых сланцев.

Окислительно-восстановительные поля ПС могут достигать нескольких сотен мВ.

Схема для записи диаграмм ПС предельно проста. Она включает регистрирующий прибор, подключенный к поверхностному электроду N и электроду М, перемещаемому по скважине (см.рис.3.7.). В качестве электрода М можно использовать любой из трех электродов зонда КС, В разрыв провода, идущего от одного из электродов, включают градуированный компенсатор поляризации ГКП, который используют для определения масштаба кривой ПС.

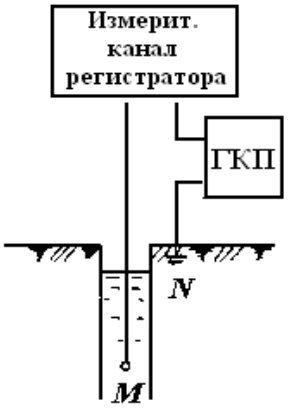


Рис.3.7. Принципиальная схема метода ПС

С этой целью перед началом каротажа (зонд на забое скважины), с ГКП подают в цепь ПС известную разность потенциалов ?ГКП и замечают вызываемое ею отклонение блика гальванометра –l0. Введение ГКП в измерительный канал обеспечивается схемой каротажной станции. Положение блика до и после подачи сигнала с ГКП фиксируют на диаграмме.

Рассчитывают масштаб записи ПС:

[мВ/см], (3.6.), который численно равен постоянной измерительного канала по напряжению.

Перед началом записи диаграммы блик гальванометра (или перо потенциометра) устанавливают в средней части дорожки для записи с помощью ГКП или электрического корректора нуля фоторегистратора. Начинают подъем зонда.

В случае "зашкала" кривой в ту или иную сторону, подъем зонда прекращают и блик гальванометра снова возвращают на середину дорожки с помощью ГКП или корректора нуля регистратора.

При обработке диаграммы ПС масштаб ее указывают в виде стрелки длиной 2 см, над которой подписывают количество милливольт, соответствующее этому отрезку.

При интерпретации диаграмм ПС выделяют аномалии, проявляющиеся как локальные отклонения кривой от среднего уровня. Эти аномалии возникают над зонами сульфидной вкрапленности и над толщами графито-кварцевых сланцев.

Теория показывает [1,3,6], что пласты, обладающие повышенной окислительно-восстановительной способностью, при идентичности этого параметра у подстилающих и перекрывающих пород выделяются простыми симметричными аномалиями ЛС. Границы интервалов, создающих аномалии ПС, определяют по правилу полумаксиума аномалии, как это показано на рис.3.8.

Очень интенсивные аномалии ПС наблюдаются над металлическими обсадными трубами.

.

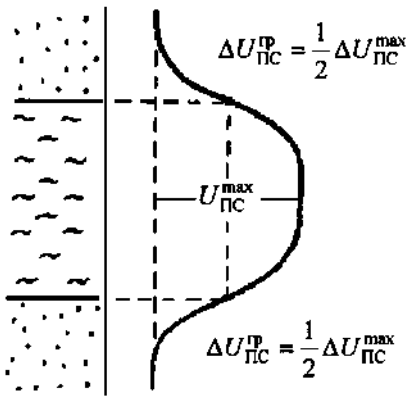


Рис.3.8 Определение контактов пород по диаграмме ПС.

Метод скользящих контактов- МСК

Этот метод применяется в качестве детализационного на месторождениях различных руд и ископаемых углей.

МСК представляет собой разновидность токового каротажа, использующую щеточный зонд, электроды которого скользят по стенке скважины.

В токовом каротаже (рис.3.9) измеряют ток в цепи источника Е, включенного между электродом А, перемещаемым по скважине, и электродом В, заземленным на поверхности. Поскольку сопротивление электрода А зависит от сопротивления горных пород, через которые он проходит, то изменения силы тока в цепи АВ дают возможность дифференцировать разрез скважины по сопротивлению. Однако, поскольку регистратор каротажной станции является не амперметром, а потенциометром или гальванометром, то для измерения силы тока в цепи АВ в нее включают контрольный шунт R0 выводы от которого подсоединяют ко входу регистрирующего прибора (рис.3.9.).

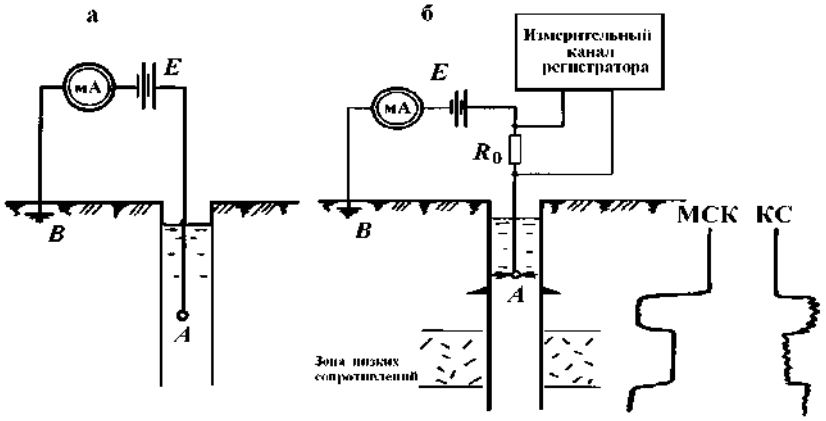


Рис.3.9. Схема метода МСК. а- принципиальная схема метода; б- схема реализации метода с помощью каротажной станции. '

Масштаб кривой МСК вычисляют как отношение:

[м/см], (3.7.)

где m-постоянная измерительного канала по напряжению.

Для получения диаграмм МСК, записанных с достаточно большими отклонениями кривой, но без "зашкалов", при спуске зонда его останавливают ниже уровня бурового раствора в скважине, но выше "башмака" обсадной трубы. В этих условиях сопротивление щеточного электрода А будет минимальным, а ток в цепи АВ– максимальным. Подбирают такое напряжение источника тока Е, величину шунта R0 или постоянную измерительного канала по напряжению так, чтобы блик гальванометра (перо регистратора) отклонился до правого края дорожки для записи (диаграммной ленты). Затем опускают зонд на забой и при его подъеме ведут регистрацию кривой МСК.

Границы интервалов, обладающих повышенной электропроводностью, определяют по точкам резкого возрастания кривой МСК, как это показано на рис.3.11.

Преимуществом МСК перед КС является то, что в зонах низкого сопротивления, где уровень кривой КС близок к нулю, диаграмма МСК дает максимальные отклонения, на фоне которых хорошо фиксируются все непроводящие включения и пропластки.

Метод электродных потенциалов - МЭП

Этот метод также как и МСК относится к числу детализационных при каротаже рудных скважин. Его назначение - разделение аномальных зон низкого сопротивления по природе проводимости на зоны с электронной (рудные) и ионной (нерудные) проводимостью.

Для выполнения: МЭП использует тот же щеточный зонд, что и для МСК, но его предварительно снабжают еще одним электродом - N, называемым электродом сравнения, выполненным из то же металла, что и щеточный электрод (из цинка или железа) и состоящим из двух частей, расположенных выше и ниже щеточного электрода (см. рис.11.)

Оба электрода подключают ко входу регистрирующего прибора.

Когда электроды M и N находятся в буровом растворе, их электродные потенциалы одинаковы, а регистрирующий прибор дает нулевые показания.

Когда, при перемещении зонда M возникает разность потенциалов. щеточный электрод касается рудных вкраплений, он приобретает потенциал, равный электродному потенциалу этих материалов и между электродами M и N возникает разность потенциалов.

Как известно [1,3,6], электродные потенциалы всех сульфидных минералов положительны, ЭП металла, из которого изготовлены электроды - отрицателен, поэтому зоны сульфидной вкрапленности (рудные) отмечаются резкими положительными аномалиями на диаграммах МЭП, а нерудные зоны (зоны трацинова-тих, обводненных пород) не отмечаются вовсе.

Масштаб диаграмм МЭП определяется постоянной измерительного канала по напряжению n =m. Поскольку аномалии МЭП достигают большой величины, устанавливают m = 25-50 мВ/см.

Перед началом записи зонд опускают на забой и блик гальванометра располагают у левого края дорожки для записи с помощью ГКП или электрического корректора нуля.

Границы рудных зон на диаграммах МЭП определяют по точкам резкого возрастания кривых (рис.3.10).

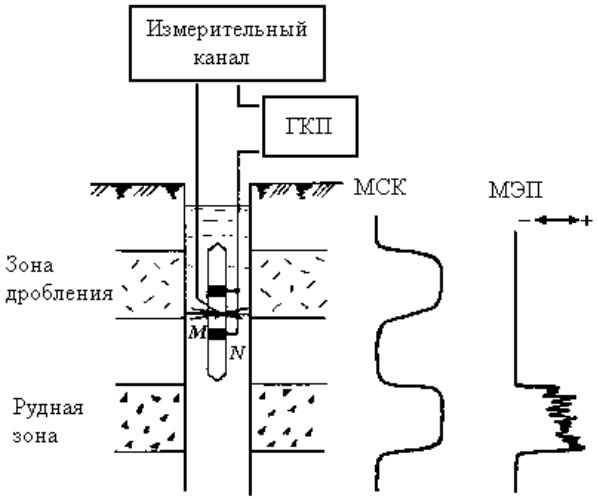


Рис.3.10. Схема метода МЭП и сопоставление результатов МЭП и МСК над рудной (1) и нерудной (2) зонами.

3.4.3 Радиоактивный каротаж

Метод гамма-каротажа – ГК

Гамма-каротаж заключается в измерении естественной радиоактивности гарных пород, слагающих стенки скважины. Как известно [1,3,6], естественная радиоактивность пород зависит от содержания в них радиоактивных элементов U,Th,K.

Среди изверженных пород наибольшей активностью отличаются кислые породы (граниты, гранодиориты), в состав которых входит калиевый полевой шпат, содержащий естественный радиоактивный изотоп калия – 40K.Среди осадочных пород наиболее активны глины, которые благодаря своей высокой сорбирующей способности содержат повышенное количестве радия, или тория.

Аппаратура для ГК - каротажные радиометры состоят из скважинного снаряда и наземной измерительной панели [2].

Наиболее важной частью скважинного снаряда является детектор гамма-квантов газоразрядного или сцинтилляционного типов. Кроме детектора гамма-квантов в снаряде, как правило, содержится генератор высокого напряжения для питания детектора (блокинг-генератор с выпрямителем и сглаживающим фильтром) и предварительный усилитель (рис.3.11.). Питается снаряд о поверхности постоянным током, а информация из снаряда выводится в виде импульсов той или иной полярности [2,5,7,9].

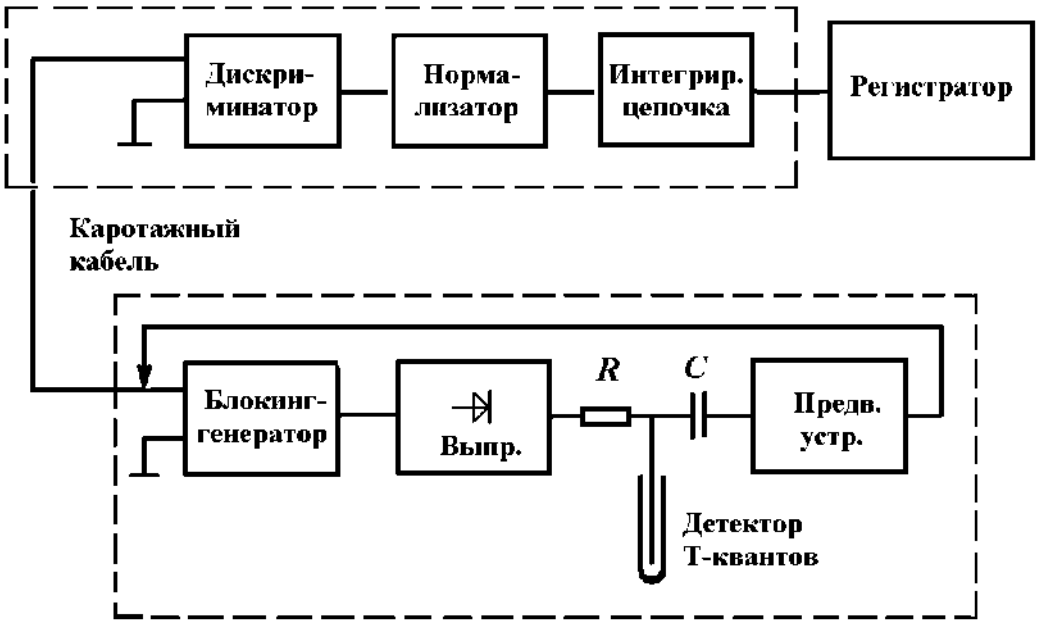


Рис.3.11. Блок схема аппаратуры ГК.

Наземная измерительная панель содержит блоки обработки сигналов информации (дискриминаторы, нормализаторы, интегрирующие ячейки).

Перед началом каротажа на диаграмме записывают нулевую линию, натуральный фон и интенсивность излучения рабочего эталона. Эти же показания фиксируют и после окончания каротажа.

Запись диаграмм ведут, как обычно, при подъеме снаряда. Скорость каротажа из-за большой постоянной времени интегрирующей ячейки должна быть низкой: 120 м/ч для газоразрядных детекторов и 240-300 м/ч для сцинтилляционных.

Диаграммы ГК хорошо дифференцируют разрез, т.к. каждая из литологических разностей характеризуется своим уровнем естественной радиоактивности (см. табл. Физических свойств пород).

Границы интервалов повышенной радиоактивности для пластов большой мощности (H > 0,6 м) определяют по правилу полу-максимума аномалии, как это показано на рис.3.12.

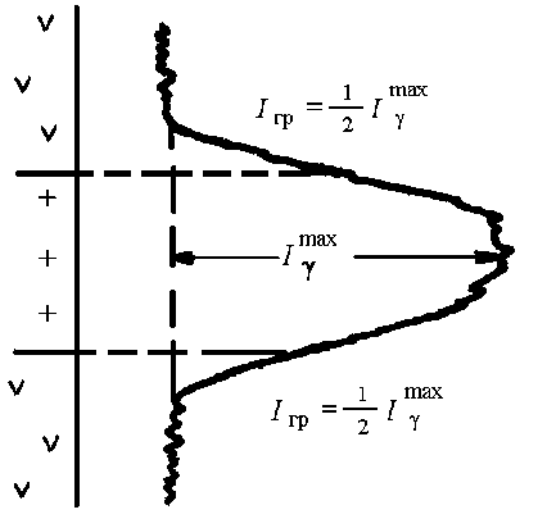


Рис.3.12. Пример интерпретации диаграммы ГК.

3.5. ОПЕРАЦИИ СКВАЖИНАХ.

3.5.1. Кавернометрия.

Кавернометрией называется операция измерения среднего диаметра буровых скважин. Знание этого параметра необходимо как для чисто технических целей (правильной установки обсадной трубы, расчета количества цемента при цементировании скважины), так и для количественной интерпретации результатов целого ряда методов каротажа.

Скважинные снаряды для выполнения этой операции называются каверномерами. Они обычно включают в себя какой-либо следящий механизм, следующий за неровностями стенок скважины и преобразователь диаметра скважины в электрический сигнал. В раде случаев каверномеры (например, КМ-1, КМ-2 и др.) содержат еще замковое устройство, с помощью которого следящий механизм приводится в рабочее положение. Замковое устройство раскрывается дистанционно с помощью электромагнита.

Упрощенная схема измерений с каверномером, оснащенным электрическим преобразователем реостатного типа, приведена на рис.3.

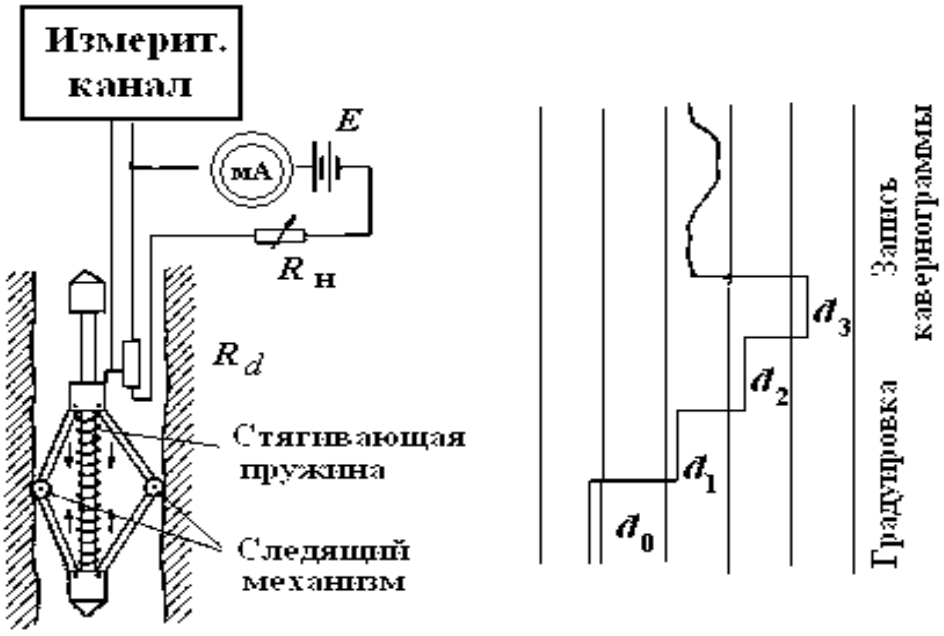


Рис.3.13. Схема (а) и результаты градуировки (б) каверномер 1 – следящий механизм, 2- реостатный преобразователь, 3 – градуировка, 4 - кавернограмма

Перед спуском каверномера в скважину производят его градуировку. Для этого на следящий механизм надевают кольца или треугольники, соответствующие определенному диаметру скважины. Сигнал, снимаемый с реостатного преобразователя при каждом из диаметров, записывают на диаграммной ленте. Для получения удобного масштаба кавернограммы градуировку начинают с кольца наибольшего диаметра и, регулируя питающий ток изменением нагрузочного сопротивления Rн или меняя чувствительность измерительного канала, добиваются, чтобы каждому I см среднего диаметра соответствовал I см или 0,5 см отклонения блика гальванометра.

После градуировки следящий механизм (рычаги) складывают и закрепляют. Каверномер опускают на забой, раскрывают замковое устройство, подавая на электромагнит в скважинном снаряде импульс постоянного тока. Запись кавернограммы ведут при подъеме снаряда. После извлечения снаряда на поверхность повторяют его градуировку.

О правильной записи свидетельствует наличие ровного участка диаграммы внутри обсадной трубы.

Рекомендуется определить внутренний диаметр обсадной трубы по кавернограмме и сравнить его с результатом непосредственного измерения с помощью линейки. Расхождение не должно превышать погрешности измерений с каверномером, т.е 0,5 см.

Сопоставление кавернограммы с кривой КС помогает объяснить природу зон низкого сопротивления, находящихся в верхней части скважины, ниже "башмака" обсадной трубы.

3.5.2 . Инклинометрия

Инклинометрией называются операции по измерению искривления скважин. Искривление скважин характеризуется зенитным углом, т.е. углом отклонения скважины от вертикали и азимутальным углом, т.е. углом между направлением магнитного меридиана и вертикальной плоскостью, проходящей через ось скважины б точке измерения.

В большинстве современных скважинных инклинометров измерение зенитного угла производят с помощью отвеса, а азимутального - с помощью магнитной стрелки, находящихся в скважинном снаряде.

Положение отвеса и магнитной стрелки относительно корпуса инклинометра преобразуются в электрический сигнал с помощью реостатных преобразователей и измеряются дистанционно.

Упрощенная схема такого инклинометра изображена на рис.3.14.

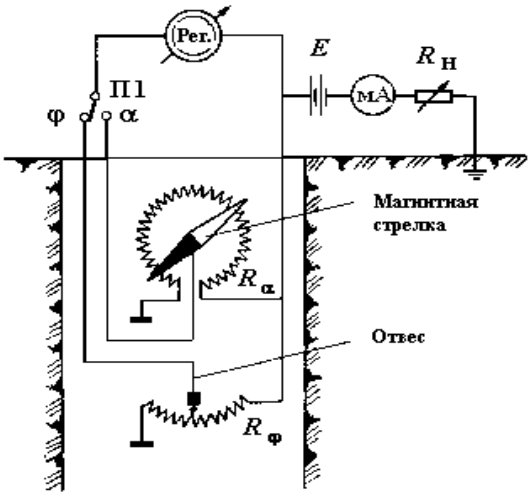


Рис. 3.14. Упрощенная электрическая схема скважинного инклинометра.1-отвес;2-магнитная стрелка.

Измерения производятся поточечно при остановках прибора в скважине. На каждой точке наблюдения поочередно измеряют зенитный и азимутальный углы.

Погрешность измерения зенитного угла около ±0,5°; азимутального - ± 5°.

Измерения азимута возможны при зенитных углах от 4° и более.

Перед началом измерений с инклинометром производят его контроль. Для этого скважинный снаряд закрепляют в предварительно отнивелированном и сориентированном установочном инклинометрическом столе, где придают инклинометру определенные зенитные и азимутальные углы. Сравнивая показания инклинометра с заданными значениями зенитного и азимутального углов, вычисляют среднюю абсолютную погрешность измерений. Если погрешность превышает допустимую, выполняют настройку прибора так, как это описано в его заводской инструкции, после чего контроль повторяют.

Перед спуском снаряда в скважину на его нижний конец навинчивают удлинитель с целью уменьшения перекоса корпуса инклинометра относительно оси скважины. Измерения проводят при спуске снаряда через 10 или 20 м, при подъеме снаряда выполняют контрольные замеры. Расхождение между основными и контрольными замерами не должно превышать погрешности измерений.

Азимутальные углы измеряют только за пределами обсадной трубы.

Обработка результатов инклинометрии_ и их изображение описаны в соответствующих учебниках [1,3] и методических разработках [4,10,14]

5.3. Расходометрия

Расходометрия – это измерения расхода (или дебита) потока жидкости или газа по стволу скважины.

Датчиком расхода в механических скважинных расходомера служит крыльчатка, соосная со скважиной и приходящая во вращение под действием потока (рис.3.15.). Число оборотов крыльчатки с помощью тахометрического преобразователя преобразуется в электрический сигнал. При обработке результатов измерений от числа оборотов переходят к объемному расходу Q флюида, пользуясь тарировочными графиками, полученными опытным путем и характеризующими зависимость $n = f(Q)$ для разных постоянных диаметров (рис.3.15б).

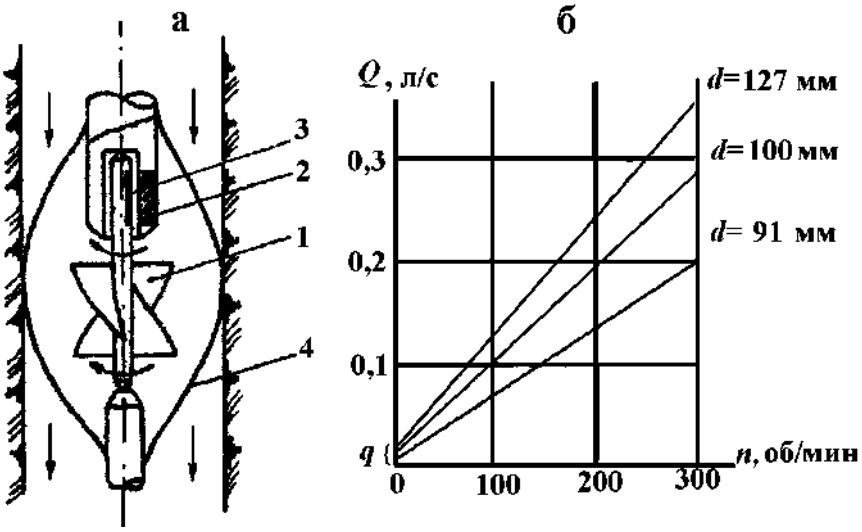


Рис.3.15. Принцип действия скважинного расходометра(а).

1-крыльчатка; 2-тахометрический преобразователь; 3-управляющий элемент преобразователя; 4-центрирующие рессоры.

Для возбуждения движения жидкости по стволу скважины производят долив или откачку из нее до наступления установившегося режима поступления жидкости в водоносные пласты (при доливе) или из пласта в скважину (при откачке).

В условиях учебных скважин базы практик удобнее проводить возбуждение доливом. Для этого с помощью шланга доливают в скважину воду из водопровода до тех пор, пока динамический уровень не стабилизируется у верхнего обреза обсадной трубы.

Наблюдения с расходомером проводят поточечно, при остановке снаряда в скважине через 10 м в обсадной трубе и через 1-2 м ниже ее "башмака".

Графики изменения расхода по стволу скважины позволяют определить местоположение и дебит (или поглощение) водоносных горизонтов, оценить их однородность, емкостные и фильтрационные свойства.

Интерпретация результатов расходометрии базируется на известном теоретическом положении утверждающем, что водоприток из однородного пласта в совершенную скважину при возбуждении его откачкой или водопоглощение в случае налива являются равномерными по всей мощности пласта. Поэтому границы водоносных или водопоглощающих пластов с различными свойствами определяются по точкам перегиба (изменения наклона отрезков) на графиках расходометрии, а коэффициент фильтрации рассчитывается, но одной из формул, учитывающих условия фильтрации жидкости из скважины в пласт (или в обратном направлении) [11].

При установившемся режиме возбуждения в пределах прямолинейной зависимости между расходом и повышением уровня можно воспользоваться формулой Дюпюи для напорных вод, (3.8)

Q - расход (или дебит) горизонта, мэ/сут;

kф- коэффициент фильтрации, м/сут;

h - мощность водоносного горизонта, м;

R - радиус влияния скважины, м;

r - радиус скважины, м;

P9 - давление у стенки скважины, м;

pk- давление у контура питания водоносной зоны, м водяного столба

Из этого уравнения, перейдя к десятичным логарифмам и заменив разницу давлений разницей статического и динамического уровней, т.е. повышением уровня при доливе (или понижением при откачке) S=Нд-Нст, можно выразить коэффициент фильтрации: (3.8.)

Все величины, входящие б формулу (3.8.), за исключением радиуса влияния, определяют по результатам измерений в скважине. Мощность пласта h- как расстояние между соседними точками оси скважины, в которых меняется наклон графика расходометрии, расход Q определяется как разница между расходом потока в стволе скважины на кровле и подошве водоносного горизонта Q=QК-QП, положение статического и динамического уровня, установившегося в результате возбуждения, определяют по измерениям со скважинным уровнемером, радиус скважины r - по данным кавернометрии.

Величина радиуса влияния R может быть определена только с помощью дополнительных измерений в наблюдательных скважинах, но поскольку в формуле (3.8.)

величина R находится под знаком логарифма, то для приближенной оценки коэффициента фильтрации можно воспользоваться значением R, найденным для сходных гидрогеологических условий, или принять какую-то условную величину радиуса влияния. Для трещинных вод В.Сысерткой базы может быть принято R = 200 м.

3.6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КАРОТАЖА

По окончании каротажа в верхней части диаграммы на уровне, соответствующем самому верхнему положению зонда в скважине, проводят лучом гальванометра или пером самописца линию начала диаграммы, после чего диаграммную ленту извлекают из приемной кассеты.

Непосредственно на скважине сразу после окончания записи в нижней части диаграммы (на "хвосте" диаграммы) записывают все сведения, которые будут необходимы при ее оформлении и обработке. Здесь указывают: дату, участок работ, номер скважины, сокращенное название метода, тип зонда или скважинного снаряда, данные о масштабе кривой, значения Х, У и ЦПМ.

На нулевой линии разбивают через 2 см масштаб диаграммы и "оцифровывают" (т.е. подписывают значения) все метки глубин, начиная с верхней. В случае использования осциллографа Н-065 или других с видимой записью диаграмм, каждую метку отмечают коротким штрихом карандаша или шариковой ручки, чтобы предотвратить утрату этих меток с течением времени.

При камеральной обработке кривые, записанные этими осциллографами, обводят шариковой ручкой или фломастером.

В верхней части - диаграммы наклеивают и заполняют ее "паспорт"" - стандартный бланк, в котором содержатся все сведения, необходимые для учета, обработки и интерпретации диаграммы (Прил.1)

Для облегчения в дальнейшем копирования и сопоставления диаграмм различных методов, на диаграммах проводят отметки глубин, кратные 10. Их проводят сплошными линиями через всю ширину ленты. Положение этих линий определяют по ближайшей к ним метке глубины с учетом масштаба глубин диаграммы.

На левую колонку диаграммной ленты выносят результаты интерпретации: условными значками показывают положение различных литологических разностей, ослабленных зон, обсадной трубы, уровня грунтовых вод и т.п.

Обработанную и проинтерпретированную диаграмму складывают "книжкой-гармошкой" с длиной стороны 25 с. Паспорт каждой диаграммы должен бить обложкой этой "книжки-гармошки".

При оформлении всего комплекса полученных результатов диаграммы всех методов копируют на сводную кальку (см.рис.3.17)

Слева направо калька содержит: узкие колонки "Глубина скважины", "Геологический разрез по керну" и "Интерпретационную колонку", и широкие колонки для диаграмм КС, ПС, ГК и т.д. На кальке проведены горизонтальные линии через каждые 10 м. При вынесении диаграмм на кальку каждый 10-ти метровый интервал диаграммы укладывают в отведенное для него место на

кальке с тем, чтобы избежать накапливания ошибок по глубине.

Диаграммы, которые были записаны с переносами, например ПС, монтируют в непрерывную прямую.

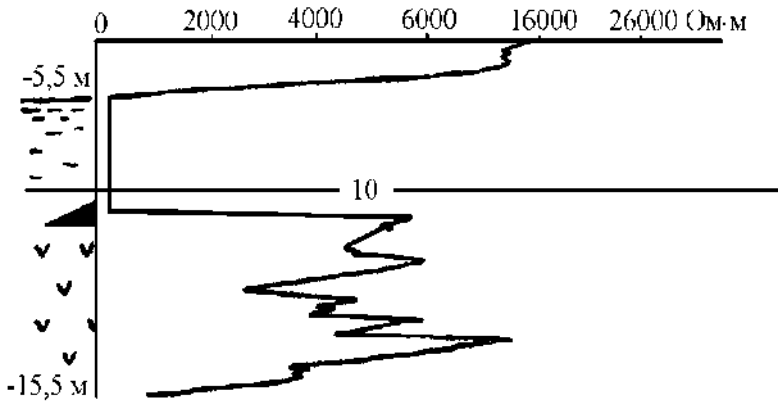


Рис 3.16 Образец каротажной диаграммы и паспорта к ней

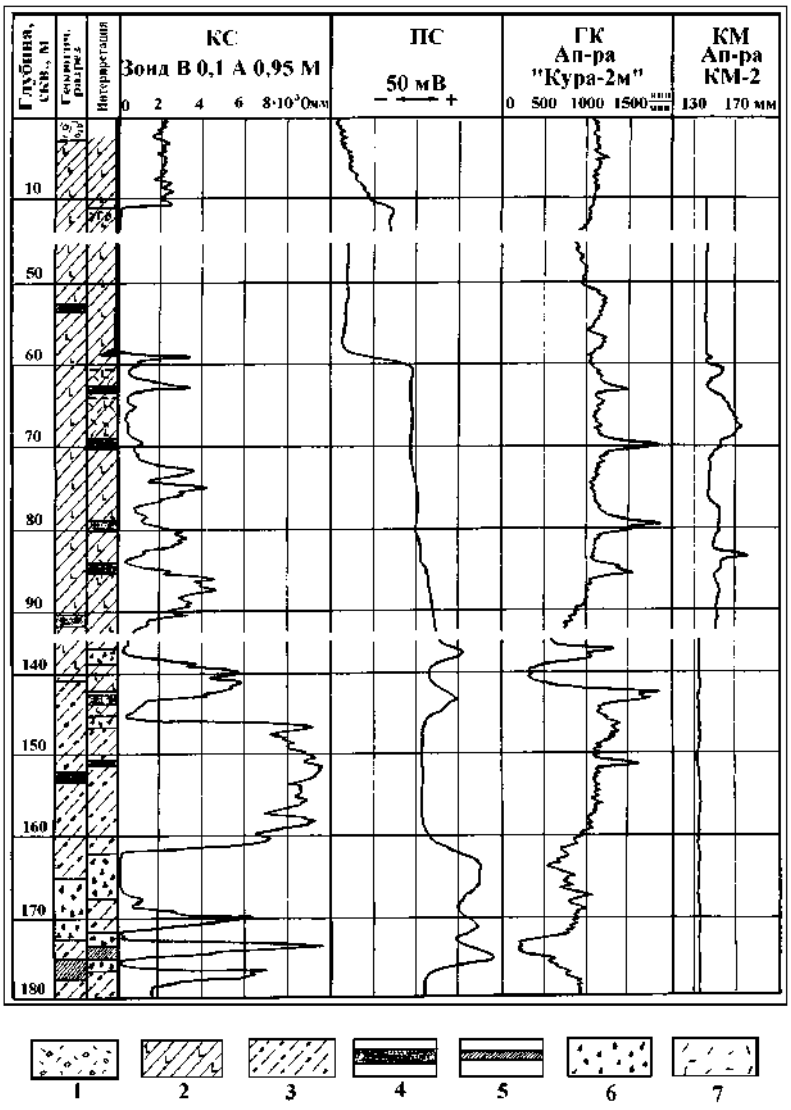


Рис 3.17 Комплекс каротажных диаграмм по учебной скважине №1 и результаты их интепритации

После построения кальки с комплексом диаграмм выполняют их сводную интерпретацию.

3.7. Сводная интерпретация комплекса каротажных диаграмм

В результате интерпретации комплекса каротажных диаграмм по каждой учебной скважине должно быть выполнено литологическое расчленение разреза скважины и охарактеризовано техническое состояние ее ствола.

Для облегчения студентам работы по выполнению этого раздела практики ниже приводится перечень вопросов, на которые должен быть дан ответ в результате сводной интерпретации.

1. Как характеризуются по данным метод ГИС различные литологические разности, встречающиеся в геологическом разрезе скважины:

а) амфибол-биотитовые гнейсы;

б) амфибол-биотитовые гнейсы с гранатами;

в) графито-кворцевые слайды;

г) граниты;

д) кварцевые жилы;

е) метаморфические талък-карбонаткые породы.

2. Как проявляется на диаграммах ГИС наличие сульфатной вкрапленности?

3.Как отличаются зоны низкого сопротивления рудной и нерудной природа?

4.По каким методом каротажа и как определяется положение границ (контактов) между различными литологическими разностями?

5.На какой глубине в скважине располагается обсадная труба, как она проявляется на диаграммах различных методов ГИС, как определяется положение се "башмака" (нижнего конца)?

6.На какой глубине располагается в скважине уровень грунтовых вод и как он проявляется на диаграммах разных методов?

7.Опишите геологический разрез исследованной скважины, построенный по данным интерпретации ГИС (тип породы, интервал, занимаемый ею в скважине, ее характеристики). Сопоставьте этот разрез с разрезом, построенном по данным документации
керна. Объясните причину расхождений.

8.Охарактеризуйте результаты кавернометрии: укажите средний диаметр скважины, диаметр обсадной трубы, диаметры каверн, интервалы наибольшей кавернозности, определите породы, к которым приурочены каверны. Как каверны влияют на результаты каротажа? Сопоставьте кавернограмму с диаграммой КС.

9.Охарактеризуйте результаты инклинометрии скважины: у кажите диапазон изменения зенитных углов скважины, средний азимут искривления, смешение проекции забоя скважины относительно ее устья в горизонтальной плоскости.

Ответы на перечисленные вопросы должны составить содержание раздела "Сводная интерпретация" в отчете о практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов Д.И., Леонтьев Е.И., Кузнецов Г.С. Общий курс геофизических исследований скважин. - М.: Недра, 1984.-432 с.

2.Заяц А.П., Нагля В.В. Радиометрическая аппаратура и оборудование. - М.: Недра. 1983. - 240 с.

3. Интенберг С.С. Интерпретация результатов геофизических исследований скважин. - М.: Недра, 1987. - 375 с.

4. Козырин А.К., Алексеева З.П., Сковородников И.Г. Инструкция для проведения учебно-методической- црактики по буровой и скважинкой геофизике. - Свердловск: изд. Свердл.горн. ин-та, 1969. - 145 с.

5. Кривко Е.Н.. Шароварин В.Д., Широков В.Н. Промыслово-геофизическая аппаратура и оборудование. - М.: Недра. 1961. -280 с.

6. Мейер В.А. Геофизические исследования скважин. - Л,: Изд. Ленингр. ун-та, 1981. - 464 с.

7. Померанц Л.И., Белокопь Д.В., Козяр В.Ф. Аппаратура и оборудование геофизических методов исследования скважин.

М.; Недра, 1985. - 271 с.

8.Скважинные геофизические информационно- измерительные системы: Учебное пособие/В.Н.Шроков, Е.М.Митюшин, В.Д.Неретин и др. - М: Недра 1996-317с.

9. Скважинная и шахтная рудная геофизика: Справочник геофизика. В 2-х кн. /Под ред. В.В.Бродового. - ГЛ.: Недра, 1988. - 320 и 440 с.

10.Сковородников И.Г., Макаров Л.В., Калашников В.Н. Применение методов скважинной расходометрии в гидрогеологических исследованиях: Методическое руководство к курсу лекций.-Свердловск: УГГГА, 1982.-40с.

11.Сковородников И.Г. Методическое руководство по учебно-методической практике по геофизическим исследованиям скважин на базе практик в пос. В. Сысерть.-Свердловск: изд. СГИ 1990.-43с.

12.Сковородников И.Г. Геологические и геометрические построения по данным каротажа: Указания к практическим занятиям по ГИС.- Екатеринбург: изд. УГГГА,1995.-24с.

13.Сковородников И.Г. Практическое руководство по обработке и интерпретации результатов геофизических исследований скважин: Учебное пособие. – Екатеринбург: изд.УГГГА,2001.-80с.

14.Шумаков М.С. Инклинометрия: Методическое руководство для студентов. – Свердловск: изд.СГИ, 1991. – 25с.

15.Шумаков М.С. Кавернометрия и профилеметрия: Методическое руководство для студентов. –Екатеринбург: изд. УГИ, 1992. –32.

ГЛАВА 4

РАДИОМЕТРИЯ И ЯДЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

доц. Ж.Н. Александрова, доц. Ю.В. Белышев

Окутан мифами, покрыт японским матом,
Он равно воспеваем и гоним,
Описанный Нильс Бором странный атом
В познанье вещества незаменим
Г.Г. Коргуль, выпускник СГИ 1975 г.

4.1. Задачи практики

Учебно-методическая практика по радиометрии и ядерной геофизике проводится с целью закрепления теоретических знаний, полученных студентами при изучении соответствующего курса, а также получения необходимых практических навыков при выполнении полевых и лабораторных исследований.

Радиометрические и ядерно-геофизические методы широко используются для получения дистанционной информации об особенностях состава и свойств природных сред, что имеет важное значение при поисках, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, в особенности месторождений радиоактивных руд и редких металлов.

Пешеходная γ-съемка является универсальным радиометрическим методом поисковых работ, которая применяется на всех стадиях геолого-геофизических и геохимических исследований. Сущность пешеходной γ-съемки состоит в планомерном измерении с помощью переносных радиометров по заданной сети мощности экспозиционной дозы γ-излучения на поверхности земли, в шпурах и открытых горных выработках. Пешеходные γ-поиски (γ-съемка) применяются для решения следующих геологических задач:

1. Поиски и разведка месторождений радиоактивных руд;

2. Поиски и разведка полезных ископаемых, находящихся в генетической или парагенетической связи с радиоактивными элементами;

3. Геологическое картирование (литологическое расчленение) горных пород, изучение тектоники и поведения радиоактивных элементов.

Существует несколько модификаций пешеходной γ-съемки:

Наземная γ-съемка. Эта съемка, выполняемая интегральными радиометрами СРП-68 или СРП-88, занимает ведущее место по значению и объему полевых работ. Процесс съемки состоит в дискретных измерениях мощности экспозиционной дозы (МЭД) γ-излучения (в пА/кг, мкР/ч) по сети наблюдений, соответствующей заданному поисковому масштабу. Гамма-спектрометрическую съемку проводят путем измерений

содержаний U, Th, K с целью изучения закономерностей распространения радионуклидов на заданной территории.

Бета- и бета-гамма-съемка. Основана на регистрации β- и γ-составляющих излучения радионуклидов. Проводится на площадях, где радиоактивное равновесие между U и Ra в породе резко смещено в сторону U (заболоченные территории). Для раздельного учета β-излучения Ra, Th и K γ-съемку выполняют в спектрометрическом варианте.

Шпуровая γ-съемка. Основана на измерении γ-излучения в шпурах глубиной до 1 м, обычно вручную проходимых в грунтах и рыхлых отложениях. Хорошие результаты шпуровая γ-съемка дает в условиях гумидного климата, когда элювиально-делювиальные отложения обеднены U на глубину до 1.5 м. Радиометрическая документация горных выработок. Является составной частью геологической документации канав, шурфов и др. выработок. Эти объекты исследуются переносным радиометром по заданной сети γ-опробования, расстояние между пунктами которой может быть от 0.2 до 1 м.

Основной вклад в естественное-поле горных пород вносят естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ) семейств U, Th и изотоп 19K40 (0.0119% в составе естественной смеси изотопов калия). Для изверженных горных пород в среднем наблюдается корреляционная связь содержания U, Th и K с кислотностью: уменьшение содержания по мере увеличения основности. Содержание ЕРЭ в осадочных породах в целом несколько ниже, чем в изверженных. Наименьшая радиоактивность отмечается для химических осадков, солей и карбонатных пород, наибольшая – для глин.

На различии содержания ЕРЭ в породах, а следовательно, интенсивности их γ-излучения и основана методика γ-съемки. При этом следует учитывать, что по интегральной интенсивности γ-излучения 1 г/т U эквивалентно 2.5 г/т Th и 0.4% K. При среднем соотношении U:Th:K в породах 1:5:104 в суммарном γ-излучении преобладает излучение Th и K. Для U часто наблюдаются отклонения от общих закономерностей в связи с его высокой химической активностью.

Величина γ-излучения горных пород выражается в единицах мощности экспозиционной дозы (МЭД) – пА/кг. До недавнего времени широко использовалась внесистемная единица МЭД – мкР/ч (1 пА/кг = 13.95 мкР/ч). Термин «мощность экспозиционной дозы» часто для краткости заменяется термином «интенсивность». Следует отметить, что такая замена допустима лишь в геофизике в связи с ее исторически сложившейся терминологией (под «интенсивностью» в физике понимается плотность потока энергии).

Представительность наземных γ-методов. При интерпретации результатов пешеходной γ-съемки необходимо учитывать сведения о расстоянии между детектором и поверхностью земли, толщине поглощающего почвенного и элювиально-делювиального слоя. Например, при высоте детектора над землей h = 1 м 80% от

излучения I∞ (2π-геометрия) создает площадка диаметром около 10 м, при h = 20 см ее диаметр составляет 2 м, а при h = 5 см – 0.5 м. Следовательно, для широких излучающих объектов измерения на некоторой высоте над поверхностью земли являются более представительными по сравнению с результатами, полученными у поверхности. В тоже время удаление от края аномальной зоны шириной 5 м на расстояние 4 м приводит к снижению интенсивности до 0.02I∞ при высоте детектора h = 50 см и до 0.04I∞ при h = 1 м. Это лишний раз подчеркивает необходимость исследования всех обнажений, попадающих в поле зрения оператора, иначе даже при съемках масштаба 1:10000 более 94% площади оказывается радиометрически не обследованной.

С другой стороны, 80% γ-излучения I∞ создает слой рыхлых отложений толщиной около 25 см при плотности 1.5 г/см3 или слой коренных пород толщиной ~15 см плотностью 2.7 г/см3. Это означает, что регистрируемая интенсивность излучения характеризует содержание радионуклидов лишь в тонком слое почвы и элювия-делювия. До 95% γ-излучения поглощает слой рыхлых отложений с массовой толщиной 80 г/см2. Это надо помнить при выполнении γ-съемки в условиях островной обнаженности пород. Иначе могут возникнуть аномалии, обусловленные не особенностями распределения ЕРЭ на исследуемой площади, а переменной мощностью чехла неактивных наносов, перекрывающих геологические объекты. Например, аномальный эффект над погребенным урановым телом, обусловленный Rn, поднимающимся к поверхности земли, даже в благоприятных условиях (мощность неактивных наносов 2 м, богатые руды в пласте бесконечного простирания) составляет только 0.1-0.2 пА/кг (1.5-3 мкР/ч).

4.2. Пешеходные гамма-поиски

4.2.1. Полевой сцинтилляционный радиометр СРП-68.

Прибор СРП-68 является радиометром интегрального типа и предназначен для измерения МЭД горных пород в условиях их естественного залегания. В блоке детектирования для наземной съемки применяется кристалл NaI(Tl) диаметром 30 и высотой 25 мм со среднем коэффициентом преобразования до 56 имп/с на 1 пА/кг (4 имп/с на 1 мкР/ч). У всех модификаций СРП-68 нижний энергетический порог регистрации можно настраивать от 5 до 100 кэВ. Диапазон измеряемой МЭД до 3 тыс. мкР/ч с поддиапазонами 30, 100, 300, 1 тыс. и 3 тыс. мкР/ч. Постоянные времени интегрирования 2.5 и 5 с. Основная погрешность прибора по МЭД ?10%. Дополнительная температурная погрешность до ?3% на каждые 10 С. Относительная среднеквадратическая погрешность измерений: где – постоянная времени; – средняя скорость счета импульсов.

4.2.2. Проверка энергетического порога регистрации СРП-68. Под энергетическим порогом регистрации интегральной радиометрической аппаратуры понимается минимальная энергия γ-квантов, регистрируемых детектором.

Энергетический порог регистрации радиометра устанавливается, как правило, уровнем амплитудной дискриминации импульсов на выходе предусилителя в блоке детектирования. Температурные и временные дрейфы коэффициента преобразования

энергии γ-кванта, а так же изменение порога дискриминации импульсов приводит к изменению энергетического порога регистрации. В полевой аппаратуре интегрального типа изменения порога регистрации могут быть весьма значительными. Так, в СРП-68 температурный дрейф порога регистрации может достигать нескольких процентов от установленного значения при изменении температуры на 1°С, а в полном рабочем температурном диапазоне (от –30 до +50° С) может изменяться в несколько раз.

Для обеспечения стабильной работы радиометра начальный порог регистрации должен устанавливаться равным 25±5 кэВ. Уменьшение порога до 15 кэВ и ниже нецелесообразно из-за возможности регистрации температурных шумов и наводок преобразователя напряжения питания ФЭУ.

При проверке и настройке порога регистрации используются источники низкоэнергетического γ-излучения, например Cd109 (22 кэВ), Am241 (60 кэВ), Tl204 (71 кэВ) или Tu170 (84 кэВ). Наиболее удобным источником является Am241.

Настройка проводится в следующем порядке. Источник подносится к блоку детектирования на такое расстояние, чтобы показания прибора были во второй половине шкалы на поддиапазоне 1000 имп/с, после чего производится первый отсчет N1. Второй отсчет N2 производится при нажатой и удерживаемой кнопке контроля на пульте радиометра (при этом происходит уменьшение напряжение питания блока детектирования и увеличение порога регистрации в два раза). Отношение N2/N1 должно быть в проделах 0.6–0.9, что соответствует энергетическому порогу регистрации 15–30 кэВ. Если отношение N2/N1 меньше 0.6 – следует увеличить коэффициент усиления ФЭУ, если больше 0.9 – уменьшить усиление. Для этого необходимо вскрыть блок детектирования и изменить напряжение питание ФЭУ.

4.2.3. Градуировка радиометра СРП-68. Радиометр градуируют 1-2 раза в месяц с целью установления зависимости между показаниями измерительного прибора СРП-68 и мощностью экспозиционной дозы. Результаты градуировки используются при обработке полевых измерений. Градуировку проводят ампульным радиевым источником (например эталоном С-41, С-42 и др.) с известным количеством Ra. Мощность экспозиционной дозы (мкР/ч) первичного γ-излучения на расстоянии R (м) от источника может быть найдена по теоретической формуле

$$\boldsymbol{I = 840\frac{Q}{R^2}} \qquad , (5.2)$$

где Q – количество Ra226 в эталонном источнике, мг.

Сущность градуировки заключается в том, что изменением расстояния R от источника до детектора в точке измерений создают набор значений МЭД и фиксируют показания измерительного прибора. Градуировку выполняют на специальном стенде, включающем площадку для крепления блока детектирования и горизонтальный шнур на 10-20 см выше поверхности площадки. Шнур размечается метками через 20 см. Радиевый эталон подвешивается таким образом, чтобы по горизонтальной линии он находился напротив детектора.

Для уменьшения вероятности регистрации, рассеянного от поверхности земли γ-излучения, высота расположения источника и детектора над землей должна быть не менее 2 м. С этой же целью блок детектирования дополнительно экранируют от земли листовым свинцом толщиной 3-5 мм.

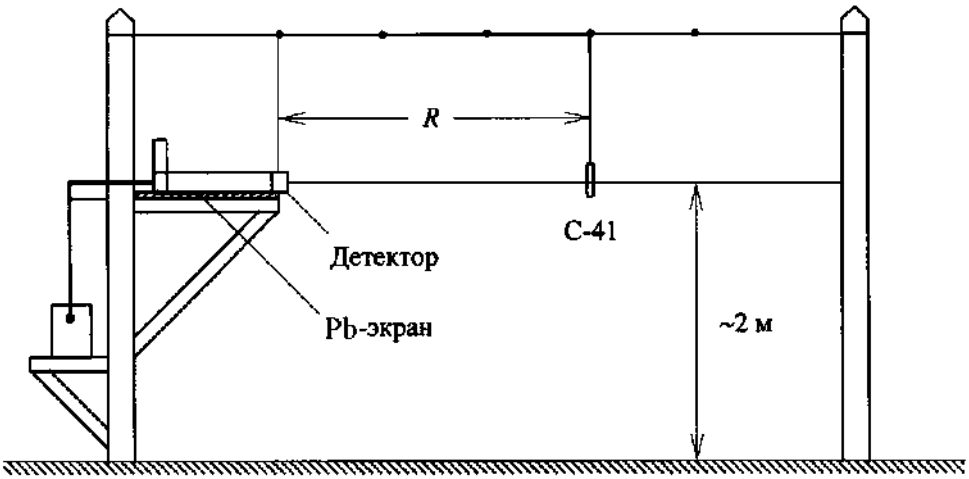


Рис. 4.1. Стенд для градуирования полевых радиометров

Соблюдается следующий порядок градуировки:

1. Радиевый источник помещают в свинцовый контейнер, поглощающий его излучение (или убирают далеко от градуировочной площадки).

2. На приборе устанавливают поддиапазон, градуировка которого осуществляется (30 или 100 мкР/ч), после чего производят измерение естественного γ-фона (до 10 отсчетов с интервалом времени около 5 с).

3. Радиевый источник подвешивают на шнур на расстояние 4-5 м от торца детектора и производят первое измерение (тоже 10 отсчетов).

4. Операции повторяют на других расстояниях, постепенно приближая источник к детектору (прямой ход). Следует избегать измерений на расстояниях $R < 20$ см, где погрешность градуировки увеличивается за счет неточности измерения расстояния. Не рекомендуется проводить градуировку на расстояниях более 4 м, при которых возрастает доля рассеянного γ-излучения.

5. После измерений на ближайшей точке повторяют измерения для обратного хода (при удалении источника). Результаты измерений записывают в табл. 4.1:

Таблица 4.1

Результаты градуирования полевого радиометра

Дата градуировки _____ СРП № _____

Эталон _____ № _____, _____ мг Ra^{226}

Место градуировки _____

Оператор _____

R, м	$I_и$, мкР/ч	Поддиапазон	Отсчеты $I_п$, мкР/ч	Средний отсчет
∞	0,0	30 мкР/ч		
.....	.....	.....	....	.....

Примечание: Iи – истинное значение МЭД, Iп – интенсивность γ-поля по шкале измерительного прибора.

С использованием данных из вышеприведенной таблицы строится градуировочный график. Первая слева точка графика соответствует измерениям γ-фона. Линия графика проводится осреднением точек прямого и обратного хода. Учет фонового излучения Iф на градуировочной площадке производится продолжением графика до пересечения с осью абсцисс и смещением нуля графика в эту точку. Полученный график со смещенной шкалой Iи = kIп применяется для перевода показаний радиометра в МЭД γ-излучения (пересчетный коэффициент определяется как k = ΔIи /ΔIп).

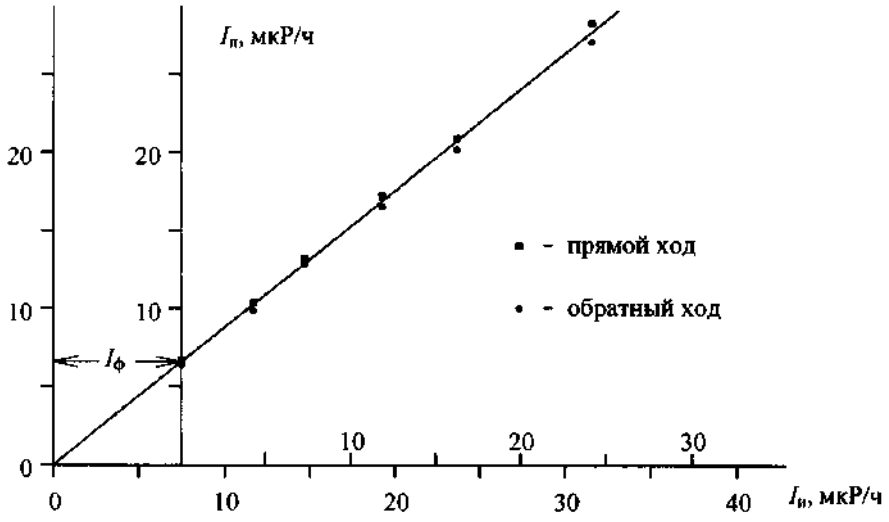


Рис. 4.2. Градуировочный график СРП-68

Как правило, градуировочные графики должны быть линейны на всех поддиапазонах, за исключением предельных значений (30 тыс. имп/с и 10 тыс. мкР/ч), на которых может наблюдаться отклонение от линейности за счет просчета части импульсов детектором при их большой скорости следования. Отклонение от линейности может наблюдаться и в том случае, если градуировка выполняется на поверхности земли.

4.2.4. Методика полевых работ. Под гамма-поисками понимают исследования гамма-активности горных пород по поисковым маршрутам в направлениях наиболее вероятного распространения ореолов и потоков рассеяния радиоактивных элементов. Пешеходные гамма-поиски наиболее эффективны в районах с хорошо расчлененным рельефом, развитой гидросетью, с небольшой мощностью элювиально-делювиальных отложений. Рудопроявления радиоактивных элементов в этих условиях образуют открытые механические и солевые ореолы и потоки рассеяния, легко доступные при пешеходных поисках. Неблагоприятными для пешеходных поисков районами являются районы с развитыми современными отложениями при резко выраженном промывном режиме.

4.2.5. Рекогносцировочные (маршрутные) γ-поиски. Маршрутные γ-поиски проводятся в слабоизученных районах с целью общей оценки γ-активности горных пород. Маршруты прокладываются вкрест простирания геологических структур и решают ограниченные задачи: оценка доступности площадей для дальнейших γ-поисков, уточнение средней γ-активности основных по распространенности горных пород.

Работа на маршруте при пешеходных γ-поисках состоит в непрерывном прослушивании в телефон частоты следования импульсов и в измерениях интенсивности излучения горных пород по измерительному прибору пульта радиометра. Скорость перемещения по маршруту 1-2 км/ч, при этом детектор радиометра располагается на высоте 10-15 см от поверхности земли. Оператором в зоне маршрута шириной до 100 м должны также обследоваться все обнажения горных пород, свалы и осыпи. Результаты

всех измерений по маршруту, а также на обнажениях пород и в других пунктах, заносятся в полевой журнал. В журнале фиксируются ориентиры по маршруту, смена пород, места отбора образцов горных пород. В процессе съемки ведется абрис маршрута.

При обнаружении по маршруту повышенной интенсивности гамма-излучения аномальная зона исследуется более детально. Из аномальной зоны отбираются образцы горных пород на лабораторное исследование.

Работоспособность прибора в процессе гамма-съемки проверяется измерениями на контрольном пункте (КП) в начале и в конце маршрута и измерениями с контрольным источником Со60 в фиксированной точке относительно детектора (на торце датчика). Измерения с изотопом Со60 проводятся через каждые 1-2 часа работы и записываются в журнал.

Первичная обработка полевых материалов заключается в переводе показаний радиометра по градуировочному графику в единицы мощности экспозиционной дозы гамма-излучения (мкР/ч), в обработке результатов измерений на КП и контрольных измерений в процессе рабочего дня. При нормальной работе прибора флюктуации не должны превышать 3 % для источника Со60. Разность показаний на КП в начале и в конце рабочего дня не должна быть больше 5 %.

4.2.6. Площадная гамма-съемка. Площадная гамма-съемка выполняется по подготовленной топографической сети на учебном полигоне.

Топографическая сеть полигона проложена широтными профилями через 250 м друг от друга. Пикеты по профилю идут через 50 м и отмечены колышками с маркировкой номеров профиля и пикета, рис. 5.3. Маркировка пикетов выполнена с запада на восток с пикета № 0 до пикета № 40 (длина профиля 2 км). Пикеты №10 всех профилей расположены на меридиональной квартальной просеке.

Площадная γ-съемка проводится по маршрутам между профилями в масштабе 1:2000. Расстояние между маршрутами 50 м, расстояние между фиксированными измерениями на маршруте 20 м, при детализации аномалий – 5 м. Маршруты прокладываются между одноименными пикетами профилей по компасу, расстояние измеряется шагами. Начинается площадная γ-съемка с пикета № 0 южного для каждой площади профиля с выходом на пикет № 0 северного профиля, затем продолжается по профилю от пикета № 0 до пикета № 1, далее от пикета № 1 северного профиля на пикет № 1 южного профиля и т.д. (рис. 4.4).

Для более точной прокладки маршрутов применяется две вешки с флажками (из бумаги яркого цвета для хорошего различения на фоне лесной растительности), которые выставляются на пикетах профилей.

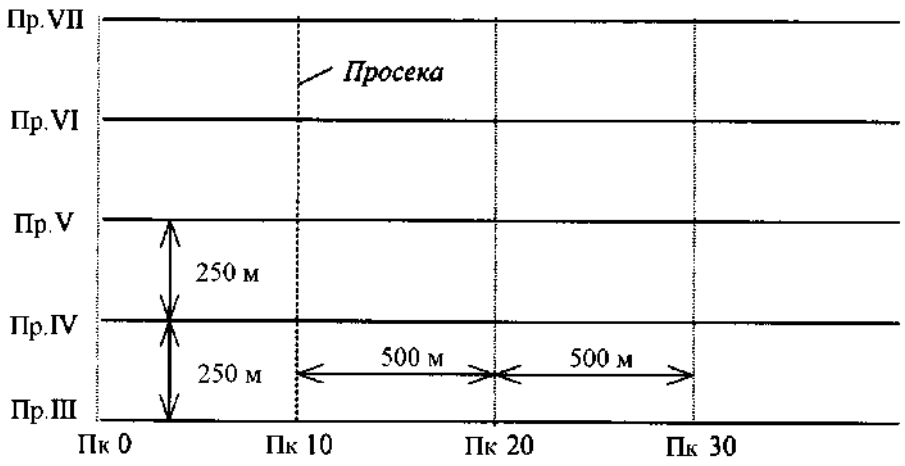


Рис. 4.3. Схема топографической сети Верхне-Сысертского геофизического полигона

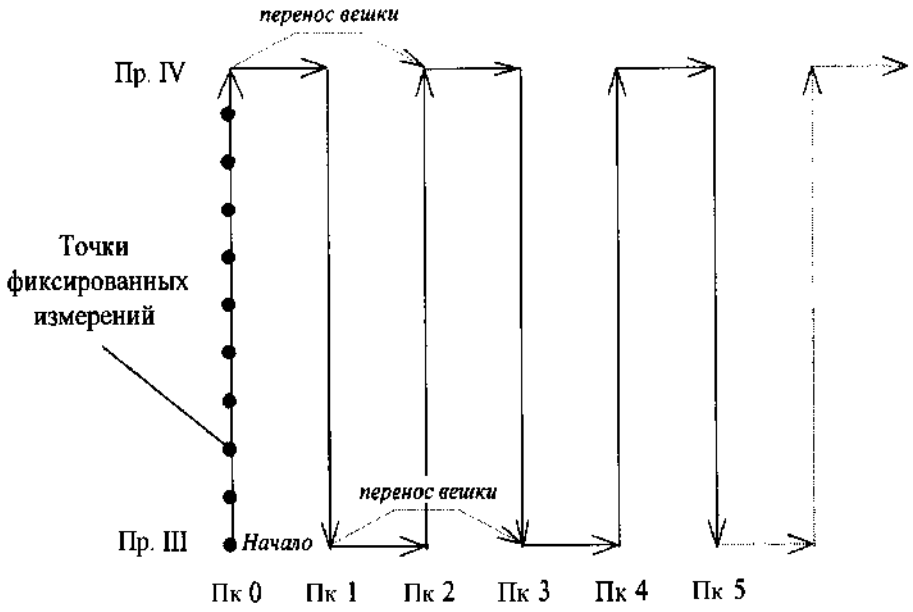


Рис. 4.4. Порядок прокладки маршрутов при площадной гамма-съемке

Методика измерений при площадной гамма-съемке такая же, как и при маршрутных поисках. После проведения площадной γ-съемки строится рабочий план изогамм (план изолиний интенсивности γ-поля в мкР/ч) и уточняются участки для постановки работ по геофизической разведке поверхности.

4.2.7. Шпуровая гамма-съемка.

Разведка поверхности на выделенных аномальных участках проводится вкрест простирания аномалий в масштабе 1:200. Измерение интенсивности γ-излучения проводятся в шпурах, проходка которых до коренных пород или крупнообломочных

фракций коры выветривания осуществляется ручными бурами. Расстояние между профилями детальной разведки должно быть 10 м, расстояние между шпурами по профилю – 5 м. По точкам детальной разведки выполняется также спектрометрическая гамма-съемка в (прибором СП-4 или РКП-301) с раздельным определением содержания урана, тория и калия для выяснения природы радиоактивности.

По результатам детальной разведки строятся рабочие планы изогамм (интенсивности естественного γ-излучения в шпурах), планы распределения U, Th и K. Все планы строятся в одном масштабе. Совместным анализом данных планов выделяется «ядро» аномалии.

4.2.8. Проверка «ядра» аномалии.

«Ядро» аномалии детализируется по аналогичной методике в масштабе 1:50 по профилям через 2 м с расположением шпуров на профиле через 1 м. По результатам дополнительной детализации строится рабочий план разведки «ядра». Анализом плана выделяется место заложения горной выработки (шурфа) для ее радиометрического опробования и взятия на лабораторный гамма-спектрометрический анализ образцов пород для уточнения радиометрической природы аномалии. Канава (вкрест простирания аномалии длиной до 3 м и шириной 0.5 м) или шурф (размером 1×1 м) проходятся до коренных пород или крупнообломочных фракций коры выветривания.

После проходки горной выработки ее дно и стенки опробуются радиометрами направленного приема или радиометром СРП-68-01 со свинцовым цилиндрическим экраном на блоке детектирования (радиометр для опробования предварительно должен быть отградуирован в комплекте с экраном). Сетка опробования 10×10 см. Одновременно с проведением опробования выполняется геологическая зарисовка стенок и дна горной выработки.

По дну горной выработки отбираются образцы горных пород весом до 1.5 кг для последующего лабораторного γ-спектрометрического анализа. Пробы пород измельчаются до крупности зерна 1-3 мм и анализируются на лабораторной γ-спектрометрической установке.

4.3. Обработка результатов гамма-поисков

4.3.1. Построение графиков маршрутной гамма-съемки.

Графики маршрутной гамма-съемки строятся в масштабе 1:5000 на миллиметровке. Линию маршрута, независимо от истинной формы рельефа, изображают в форме прямой, под которой отмечают точки изменения маршрута и указывают его новый азимут, номера обнажений горных пород и особенности рельефа (рис. 5.5).

Геологическая интерпретация результатов съемки сводится к уточнению границ между горными породами, прослеживанию тектонических нарушений, отмечающихся аномальным содержанием радиоактивных элементов.

По профилям, общим для двух бригад, на график наносятся также данные гамма-съемки соседних бригад (другим цветом) и вычисляется среднее арифметическое расхождение измерений по профилю с учетом его знака.

4.3.2. Построение плана изогамм.

План площадной γ-съемки строится в масштабе 1:2000. Построение начинается с перенесения на ватман топоосновы съемки и всех съемочных маршрутов с четким выделением мест фиксированных отсчетов. После нанесения топоосновы и привязки точек отсчетов рядом с точками подписываются значения интенсивности γ-излучения. Затем в таком же порядке на план наносятся данные маршрутной γ-съемки по периметру площади. Для совпадающих точек площадной и маршрутной γ-съемок (точки внутреннего контроля) результаты измерений при маршрутной γ-съемке наносятся на план под результатами измерений площадной γ-съемки.

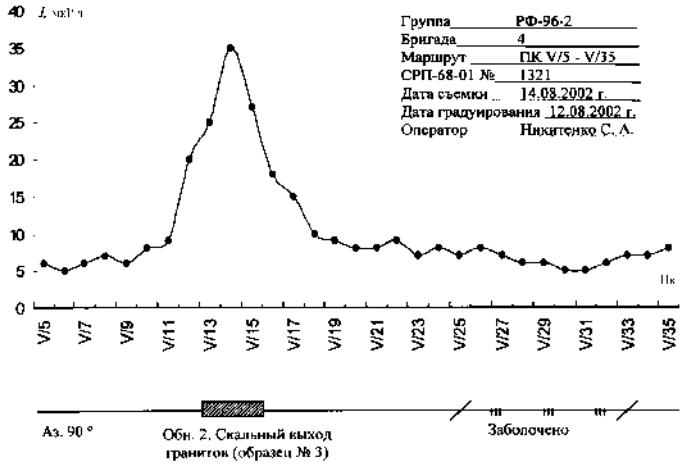


Рис.4.5. График маршрутной гамма-съемки масштаба 1:5000

Построение плана изогамм начинается с общей оценки изменения интенсивности гамма-излучения по площади работ и выбора масштаба изогамм. Для учебного полигона он обычно составляет 1-2 мкР/ч. Прослеживание изогамм следует начинать с точек максимальной интенсивности гамма-излучения.

Далее плана изогамм переносится на кальку (с маркировкой изогамм в мкР/ч) и раскрашивается. Интервалы изогамм с низкой по сравнению со средней интенсивностью закрашиваются разными оттенками синего цвета с увеличением насыщенности цвета по мере понижения интенсивности излучения. Интервалы изогамм с более высокой интенсивностью γ-излучения закрашиваются оттенками красного цвета.

После подготовки плана изогамм производится геологическая интерпретация γ-съемки и на ватмане вычерчивается геологическая карта площади поисков. При интерпретации используются материалы всех других видов геофизических работ, выполненных на данной площади, геологические данные по полигону практики, а также собственные геологические наблюдения во время проведения гамма-съемки. Калька площадной гамма-съемки склеивается с геологической картой в виде накладного

планшета. На геологической карте и плане изогамм контуром выделяются площади, по которым принято решение о закладке шурфа и проведении геофизической разведки поверхности.

Материалы площадной γ-съемки используются в дальнейшем для составления сводной геологической карты и сводной карты площадной γ-съемки всего учебного полигона.

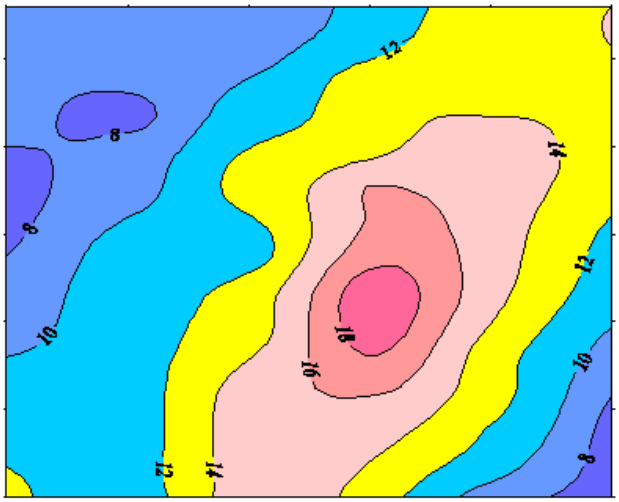


Рис. 4.6. Результаты площадной гамма-съемки (изолинии оцифрованы в мкР/ч)

4.3.3. Составление сводной карты площадной гамма-съемки.

Перед составлением сводной карты производится общая коррекция полевых материалов бригад по измерениям на границах площадей. Для этого производится вычисление среднего арифметического расхождения (с учетом знака) измерений бригад на широтных профилях, по которым соприкасаются рабочие площади. Основой для вычислений являются графики маршрутной γ-съемки, на которые дополнительно наносятся результаты измерений площадной γ-съемки по тем же профилям. Измерения маршрутной и площадной съемок по одним и тем же точкам одной бригады осредняются. Полученные таким образом значения сопоставляются со значениями по тем же точкам измерений соседней бригады и вычисляется среднеарифметическое расхождение измерений

После вычисления среднего арифметического расхождения измерений на границах всех бригад строится график увязки. При построении графика и проведении увязки уровень измерений одной из бригад условно принимается за нулевой. Так, на приведенном рисунке уровень измерений бригады № 1 принят за нулевой. По сопоставлению измерений на профиле IV уровень измерений бригады № 2 относительно бригады № 1 выше на 0.7 мкР/ч. Уровень измерений бригады № 3 относительно бригады № 2 (по сопоставлению на профиле V) ниже на 1.3 мкР/ч и, соответственно, ниже уровня измерений бригады № 1 на 0.6 мкР/ч и т.д. После построения графика за средний уровень может быть принят уровень измерений любой бригады. Измерения остальных бригад при построении сводной карты изогамм должны быть приведены к среднему уровню.

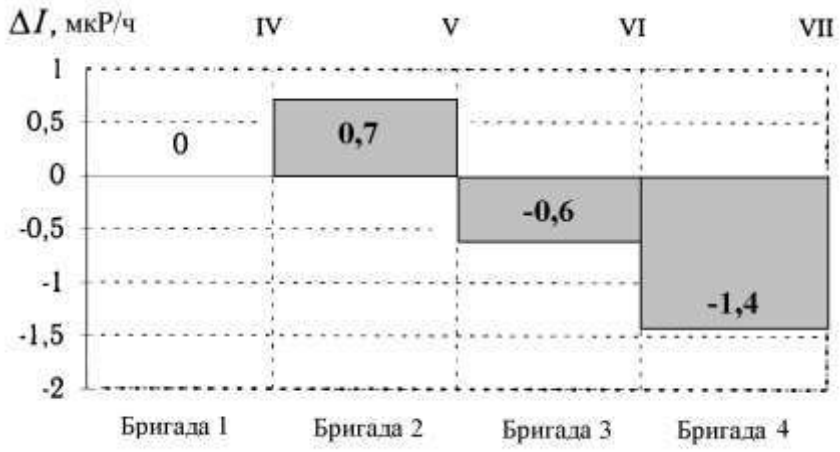


Рис. 4.7. График увязки результатов площадной гамма-съемки

При увязке площадей из вычислений следует исключать единичные экстремальные точки, отличающиеся по интенсивности излучения от соседних точек профиля в три и более раз. Приведение уровня измерений какой-либо бригады к среднему уровню всех бригад следует производить только в том случае, если этот уровень отличается от среднего значения на величину, большую половины принятого интервала изогамм. Так, при интервале изогамм 2 мкР/ч приведение следует производить, если невязка составляет более 1 мкР/ч. Для примера, приведенного на рисунке выше, приведению к нулевому (или среднему) уровню подлежат только измерения бригады № 4. После увязки измерений строится сводный план изогамм и геологическая карта всего полигона в масштабе 1:2000.

4.3.4. Обработка материалов геофизической разведки поверхности и проверки «ядра» аномалии. Обработка материалов геофизической разведки поверхности производится аналогично обработке материалов площадной гамма-съемки. Все планы разведки поверхности строятся в масштабе 1:200 на кальке. Планы детализации ядра аномалии вычерчиваются в масштабе 1:50. На планах указывается место заложения горной выработки.

При геологической интерпретации материалов разведки делается заключение о геологической природе аномалии с учетом данных всех видов разведки, горных работ и лабораторного анализа отобранных образцов горных пород.

По результатам гамма-опробования горной выработки строятся площадные развертки стенок и дна горной выработки в масштабе 1:20, а также геологическая основа развертки.

4.3.5. Оценка точности полевых наблюдений.

Точность полевых наблюдений оценивается по результатам внутреннего и внешнего контроля.

Внутренний контроль – это повторные измерения на одних и тех же точках, выполненные одной бригадой, тем же прибором, что и основные измерения. Точками внутреннего контроля являются точки, измерения на которых бригадой производились дважды: первый раз в ходе маршрутной съемки по периметру исследуемой площади и второй раз - в ходе площадной гамма-съемки.

Внешний контроль – это повторные измерения на одних и тех же точках, выполненные другим прибором. Определение погрешности полевых наблюдений по точкам внешнего контроля производится по аналогичной формуле, только под I1 и I2 следует понимать интенсивности γ-излучения на точке, измеренные первым и вторым прибором.

Фото 4.1. Студенты Беляева А.А. и Сальтьяшева А.А. (РФ-96-2) выполняют измерения интенсивности γ-поля радиометром СРП-68

4.4. Полевая гамма-спектрометрия

Важные сведения о геологическом строении и условиях образования горных пород могут быть получены в результате изучения спектрального состава естественного γ-излучения, что позволяет осуществлять раздельное определение концентраций K, U, и Th в природных средах. Методом полевой γ-спектрометрии решаются задачи выявления у U-Ra ореолов рассеяния на фоне γ-излучения K и Th, определение природы радиоактивности в коренном залегании горных пород при изучении и оценке радиометрических аномалий, геохимическое картирование различных литологических комплексов горных пород по кларковым концентрациям естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ).

4.4.1. Радиоактивные свойства горных пород.

Основными α-, β- и γ-излучателями горных пород являются изотопы K40, U238, Th232 и группа радионуклидов, являющихся продуктами их распада. Для изверженных образований известково-щелочной серии магматических пород характерно постепенное возрастание содержания U и Th в ряду ультраосновные → основные → средние → кислые породы, пропорционально росту содержания SiO2 и K.

Таблица 4.2

Содержание естественно-радиоактивных элементов в основных типах горных пород

Группа пород	Породы	K, %	U, г/т	Th, г/т	Th/U
Интрузивные Известково-Щелочной серии	Дуниты, пироксениты	0.15	0.03	0.08	2.7
	Габбро, диабазы	0.7	0.6	1.8	3.0
	Диориты, кварцевые диориты	1.8	1.8	6.0	3.3
	Гранодиориты	2.3	2.1	8.3	4.0
	Биотитовые граниты	3.4	4.0	15.0	3.7
	Кимберлиты неалмазоносные	1.06	2.6	8.8	3.4
	Кимберлиты алмазоносные	1.2	3.2	16.3	5.1
	Нефелиновые сиениты	5.0	10.3	28.3	2.8
	Трахиты	4.8	5.5	40.0	7.3
Эффузивные	Базальты, диабазы	1.0	0.7	2.3	3.2

	Андезиты, андез. порфириты	1.7	1.2	4.0	3.3
	Дациты, дацит. порфириты	2.3	2.5	10.0	4.0
	Липариты, кварц. порфиры	3.7	4.7	19.0	4.0
Гранулитовая и эклогитовая фация	Эклогиты	0.8	0.2	0.4	2.0
	Амфиболиты	0.6	0.7	1.8	2.6
	Аподиабазовые порфириты	0.8	0.9	2.7	3.0
	Гиперстеновые гнейсы	1.6	0.6	2.1	3.5
	Плагиоклазовые мигматиты	1.7	0.8	2.3	2.9
	Силлиманитовые гнейсы	2.6	1.3	4.2	3.2
Амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фации	Амфиболиты	0.8	1.0	4.0	4.0
	Мраморы, мрам. известняки	0.2	1.1	2.2	2.0
	Кварциты	0.6	0.8	3.1	3.9
	Метаморфизов. песчаники	2.5	2.7	9.2	3.4
	Полевошпатовые гнейсы	3.4	3.5	15.0	4.3

Интрузивные и эффузивные образования с повышенной характеризуются еще более высокой радиоактивностью по сравнению с аналогичными по кислотности породами известково-щелочной серии. Метаморфические породы по содержанию U и Th делятся на слаборадиоактивные и нормально- или слабо повышенной радиоактивности (гнейсы, кристаллические сланцы и др., характеризующиеся избыточным содержанием SiO_2, K_2O, CO_2 и H_2O). Процессы метаморфизма приводят к повышению содержаний U и Th. В осадочных породах наибольшей радиоактивностью обладают конгломераты и глинистые породы, повышенной – песчаники, фосфориты, калийные соли, некоторые углистые породы. Наименьшей активностью характеризуются карбонаты, сульфаты и некалийные соли.

Почвы имеют радиоактивность, зависящую от содержания ЕРЭ в почвообразующих породах. Торий остается в приповерхностном слое; уран, наоборот, может легко выносится. Содержание К в почвах составляет 1.4÷2.5 %, U – 0.1÷0.9 г/т, Th – от 3÷7 г/т.

Сходство геохимического поведения K, U и Th с поведением ряда других элементов (W, Mo, Ta, Nb и др.) может привести к образованию устойчивых ассоциаций ЕРЭ с соответствующими полезными ископаемыми и служить важным поисковым

признаком при их поисках и разведке. Значительные концентрации ЕРЭ установлены практически на всех редкометальных месторождениях.

4.4.2. Физические основы метода. Полевыми поисковыми приборами типа СРП-68 измеряется интегральная интенсивность γ-излучения пород, обусловленная присутствием в геологических средах ЕРЭ и продуктов их распада.

Принципиальная возможность раздельного количественного определения ЕРЭ создается существенным отличием энергетического состава γ-излучения К, U, Th и продуктов их распада. Предметом изучения γ-спектрометрии в общем плане являются дифференциальные энергетические спектры γ-излучения, регистрируемые конкретным прибором. На спектрах урановой модели отчетливо выделяются спектральные γ-линии энергий 1.12 и 1.76 МэВ (Bi214) и менее отчетливо, но тоже достаточно хорошо – 1.24, 1.38, 2.20, 2.44 (Bi214). В спектре ториевой модели отчетливо выделяются только две линии – 1.59 (Ac228) и 2.61 (Tl208) МэВ. В спектре калия присутствует только одна γ-линия – 1.46 МэВ (К40). Высокий квантовый выход γ-излучения с энергией 1.76 МэВ для U и 2.61 МэВ для Th, монохроматичность излучения К при значительном отличие энергий на фоне малого рассеяния квантов, создают благоприятные условия для использования указанных линий при раздельном определении К, U и Th.

4.4.3. Определение энергетического разрешения СП-4. Энергетическое разрешение спектрометра характеризует его способность разделять близко расположенные γ-линии. Энергетическое разрешение детектора определяется по γ-спектру контрольных источников, обычно Cs137 (662 кэВ), Zn65 (1.12 МэВ) или К40 (1.46 МэВ). Энергетическое разрешение R в численном виде определяется как отношение ширины (в кэВ) фотопика полного поглощения на половине высоты к энергии измеряемого моноэнергетического излучения:

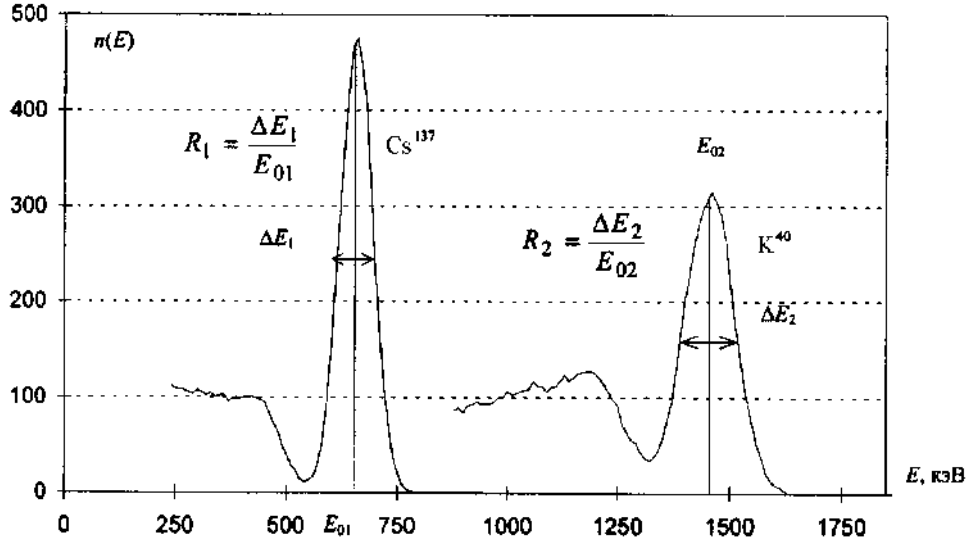


Рис. 4.8. Определение энергетического разрешения по γ-спектрам Cs137 и К40

Энергетическое разрешение является одним из основных критериев работоспособности блока детектирования. Для спектрометров СП-4 энергетическое разрешение по γ-линии 662 кэВ (Cs137) должно превышать 16% а по γ-линии изотопа1.12 МэВ (Zn65) – 13%.

4.4.4. Калибровка энергетической шкалы спектрометра. Калибровка энергетической шкалы производится для установления соответствия положения уровня дискриминатора энергии регистрируемого γ-излучения. Для спектрометрических целей необходимо, чтобы эта зависимость была линейной. Калибровка энергетической шкалы СП-4 производится перед началом полевых работ, после ремонта прибора, замены сцинтиллятора, ФЭУ.

Для калибровки используются как моноэнергетические источники γ-квантов с известной энергией так и полиэнергетические, но с хорошо разрешенными линиями (например, образцы урановых или ториевых руд).

Калибровка шкалы спектрометра СП-4 производится в следующем порядке. При нормальной настройке энергетической шкалы (50 кэВ/кан.) регистрируются γ-спектры контрольных источников: Cs137 (каналы 5-17, экспозиция 12.5), К40 (каналы 20-34, экспозиция 50 с) и Co60 (каналы 18-30, экспозиция 12.5 с; каналы 45-55, экспозиция 100 с). Хотя распад изотопа Co60 сопровождается испусканием двух квантов с энергией 1.17 и 1.33 МэВ, при их одновременном поглощении в детекторе формируется суммарный фотопик 2.50 МэВ, который хорошо выделяется в сцинтилляторах больших размеров.

По результатам всех измерений строятся γ-спектры и определяются положения максимумов фотопиков по шкале спектрометра, после чего строится калибровочный график – соответствие шкалы дискриминатора энергии γ-излучения. По калибровочному графику определяется энергетический уровень первого канала («смещение нуля») и линейность энергетической шкалы в диапазоне до 3.0 МэВ, которая должна быть не хуже 3%.

Таблица 4.3

Характеристики образцовых источников γ-излучения

Нуклид	Период полураспада	Энергия (кэВ) и квантовый выход (%) γ-линий	Нуклид	Период полураспада	Энергия (кэВ) и квантовый выход (%) γ-линий
Na22	2.60 лет	511(81), 1275(100)	Cs137	29.9 лет	662(85)
Co57	272 сут	122(85)	Hg203	46.8 сут	279(81)
Co60	5.275 лет	1173(100), 1332(100)	Tl204	4.26 лет	71(2)
Zn65	245 сут	511(3), 1114(45)	Ra226	1602 года	609(47), 1764(17)

Y88	107.4 сут	898(91), 1836(99)	Am241	433 года	59.5(36)

Фото 4.2. Студенты Артамонова О.А. и Попов А.Н. (РФ-96-2) проводят измерения спектрометром СП-4 космической составляющей гамма-фона n, имп/с

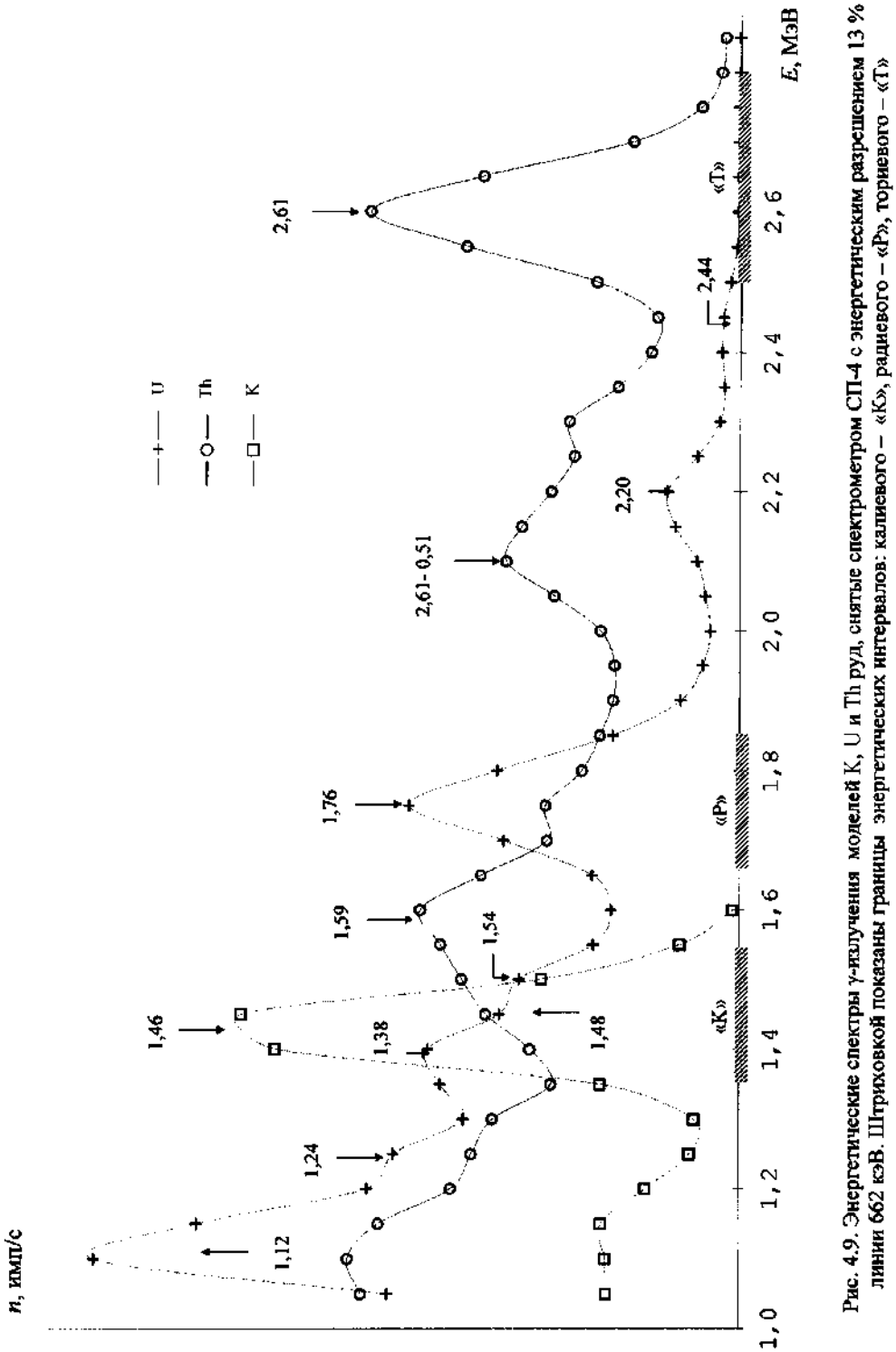


Рис. 4.9. Энергетические спектры γ-излучения моделей K, U и Th руд, снятые спектрометром СП-4 с энергетическим разрешением 13 % по линии 662 кэВ. Штриховкой показаны границы энергетических интервалов: калиевого – «K», радиевого – «P», ториевого – «T»

Рис. 4.9. Энергетические спектры γ-излучения моделей K, U и Th руд, снятые спектрометром СП-4 с энергетическим разрешением 13 % по линии 662 кэВ. Штриховкой показаны границы энергетических интервалов: калиевого – «K», радиевого – «P», ториевого – «T».

4.4.5. Градуировка спектрометра СП-4.

В задачу градуирования γ-спектрометра входит выявление функциональной связи между показаниями прибора и содержанием ЕРЭ в породе на участке измерений. В основу градуирования положены измерения частоты импульсов в рабочих интервалах СП-4 на излучающей породе (руде) с известным содержанием радионуклидов. Система уравнений, определяющих скорости счета γ-квантов в фиксированных (рабочих) энергетических интервалах «К», «Р и «Т

4.4.6. Методика полевых работ.

Как правило, γ-спектрометрическая съемка проводится на участках выявленных радиоактивных аномалий, которые обнаружились при воздушных или наземных γ-поисках. Спектрометрическая съемка выполняется либо по подготовленной топографической сети (масштабы от 1:100 до 1:10000), либо по отдельным профилям вкрест простирания аномалии. Экспозиции измерений составляет 100 с на площадях с фоновыми значениями γ-поля и 12.5 или 50 с на аномальных участках.

Выполнение пешеходных γ-спектрометрических измерений сводится к следующим этапам: 1) Калибровка энергетической шкалы и градуировка СП-4: настройка энергетической шкалы; определение разрешения детектора; градуировка прибора на рудных моделях с вычислением коэффициентов разделения калия, урана и тория; оценка остаточных эквивалентных концентраций ЕРЭ. 2) Спектрометрическая γ-съемка масштаба 1:500 на учебном полигоне методической геофизической практики проводится в крест простирания аномалий или по широтным и меридиональными профилям в случае сложной картины γ-поля. Расстояние между профилями съемки – 10 м, интервал измерений по профилю – 5 м. Детализация «ядра» аномалии проводится по аналогичной методике в масштабе 1:100 по профилям через 2 м с интервалом измерений 1 м.

Результаты полевых измерений заносятся в полевой журнал, где фиксируются экспозиция измерений, отсчеты в рабочих интервалах, краткая характеристика пород и т.д.

Первичная обработка материалов гамма-спектрометрической съемки включает вычисление концентраций урана, тория и калия.

Площадная съемка оформляется в виде планов изоконцентраций каждого элемента. Все планы строятся в одном масштабе. Шаг построения изолиний должен соответствовать (как минимум) удвоенной погрешности измерения концентраций соответствующего элемента. Анализ полученных планов позволяет выделить перспективные участки («ядра» аномалий) для детальных исследований. По результатам детализационных исследований также строятся рабочие планы изоконцентраций K, U и Th в «ядре».

По итогам поведенных полевых работ дается заключение о природе радиоактивности изученной площади и выявленной аномалии, о размерах выявленной аномальной зоны, перспективности дальнейших исследований.

4.5. Гамма-спектрометрический анализ образцов горных пород

4.5.1. Гамма-спектрометр NP-424L. Четырехканальный γ-спектрометр предназначен для определения содержаний K, U и Th в специально подготовленных пробах. В состав измерительной системы кроме основного блока – спектрометра NP-424L и сцинтилляционного детектора NaI(Tl) 76×50 мм входит установка малого фона (свинцовый экран).

Основным блоком спектрометра, определяющим его метрологические характеристики, является блок детектирования. Он включает в себя детектор γ-излучения (сцинтиллятор), преобразующий энергию γ-кванта в энергию фотона; фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); предварительный усилитель.

Для получения линейной зависимости амплитуды выходного электрического импульса от энергии γ-кванта, поглощенного в сцинтилляторе, все типы преобразований (энергия γ-кванта → энергия фотона → число выбитых на катоде ФЭУ фотоэлектронов → число фотоэлектронов на аноде ФЭУ → амплитуда импульса на выходе усилителя) также должны иметь линейный вид. Однако вследствие вероятностного характера преобразования энергии в сцинтилляторе, при фотоэффекте и при лавинообразном умножении заряда в ФЭУ, линейность описанных выше процессов соблюдается лишь статистически. Качество зависимости, позволяющей прогнозировать энергию квантов по зарегистрированному распределению амплитуд импульсов, принято характеризовать понятием амплитудного или энергетического разрешения детектора. Величина этого параметра определяется через отношение ширины фотопика на полувысоте к энергии максимальной амплитуды.

Амплитудный анализатор выделяет из общего потока импульсов только те сигналы, амплитуда которых соответствует заданному диапазону значений. Одноканальный амплитудный анализатор может рассматриваться как селектор с нижней и верхней границей амплитудного отбора (нижним и верхним уровнем дискриминации). Диапазон амплитуд импульсов, пропускаемых таким селектором, называют шириной окна дискриминации.

В γ-спектрометре NP-424L анализатор импульсов выполнен на двух дифференциальных дискриминаторах импульсов с нижним (ДНУ) и верхним (ДВУ) уровнем дискриминации, и на схеме антисовпадений. Значения нижнего и верхнего порога дискриминации задаются регуляторами уровня «Е» (ДНУ) и «2ΔЕ» (ДВУ = Е+ΔЕ), вынесенных на переднюю панель прибора. Сигнал на выходе схемы антисовпадений формируется в том случае, если амплитуда импульса на входе анализатора выше порога ДНУ, но меньше ДВУ, рис. 5.10.

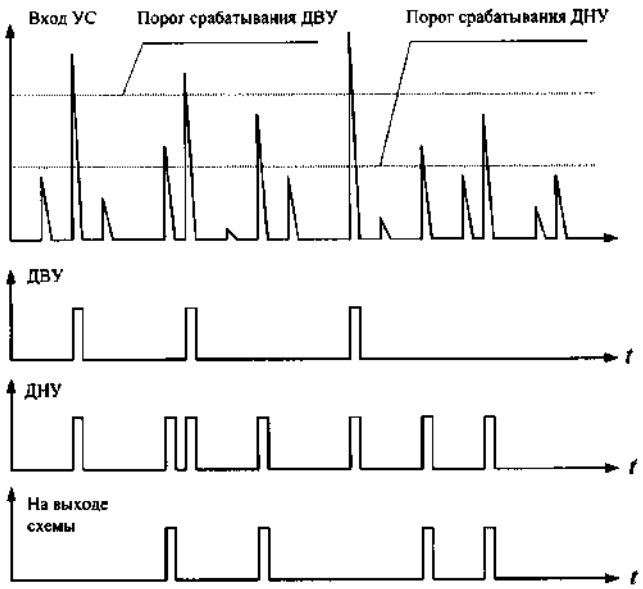


Рис. 4.10. Принцип работы амплитудного анализатора

4.5.2. Подготовка гамма-спектрометра к работе. Включает выполнение следующих операций: 1) Прогрев прибора в течении 20 минут для стабилизации теплового режима ФЭУ. 2) Проверка настройки энергетической шкалы (необходима для контроля положения границ спектральных интервалов, в пределах которых регистрируются скорости счета импульсов N1, N2, N3). При правильной настройке шкалы границы интервалов составляют:

1-й – «К»: 1350÷1600 кэВ при Е = 485, 2ΔЕ = 170;

2-й – «U»: 1650÷1900 кэВ при Е = 585, 2ΔЕ = 170;

3-й – «Th»: 2470÷2800 кэВ при Е = 860, 2ΔЕ = 220.

Настройку шкалы спектрометра проводят по γ-линии 2.61 МэВ с помощью эталона ториевой руды, добиваясь максимума скорости счета импульсов в 4-м (вспомогательном) интервале при положении уровня дискриминации Е = 900, 2ΔЕ = 10 (2610/905 ≅ 2.88 кэВ/дел.). 3) Переключатель времени измерений устанавливают на 2000 с.**4.6. Определение концентрации радона в воде**

Радиоактивные газы (эманации) – радон 86Rn222 (T1/2 = 3.82 сут) торон 86Rn220 (Tn, T1/2 = 55.6 с) и актинон 86Rn219 (An, T1/2 = 3.96 с) входят в радиоактивные цепочки последовательно превращающихся естественных радионуклидов уранового 92U 238 (T

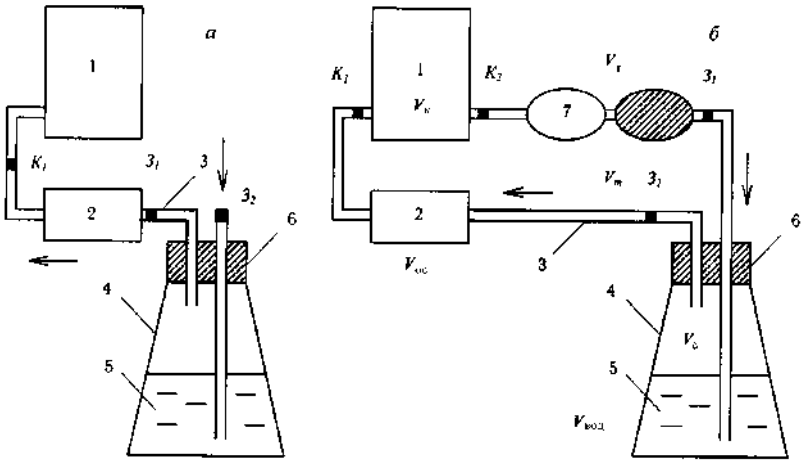
= 4.47·109 лет), ториевого 90Th232 (Т = 14·109 лет) и актиноуранового 92U 235 (Т = 7.04·108 лет) рядов.

Под эманационным методом геофизической разведки понимают исследования распределения концентрации радиоактивных газов в горных породах, рудах, почве, атмосферном воздухе, воде в целях поисков и разведки месторождений радиоактивных руд, а также для решения некоторых геологических (картирование разломов, зон трещиноватости), инженерно-геологических (выявление пород с повышенной пористостью, отслеживание водных горизонтов) и экологических задач.

Эманационный метод представляет собой один из основных радиометрических методов геофизической разведки, что обуславливается его большой по сравнению с другими радиометрическими методами глубинностью, так и его высокой чувствительностью.

4.6.1. Суть эманационных методов анализа. Радиоактивные газы извлекают из твердых или жидких веществ и переводят в сцинтилляционную камеру, чувствительную к α-частицам (радиоактивные эманации Rn, Tn, An – все α-излучатели), которая предварительно градуируется с помощью жидкого радиевого стандартного образца. По количеству импульсов определяют концентрацию эманации в камере и затем в исходной пробе почвенного воздуха или воды. Данные об активности Rn, Tn, An используют для определения содержания долгоживущих материнских веществ – U (по Ra), Th и Ac.

Существует два наиболее распространенных способа анализа концентрации



эманаций в водных пробах – вакуумный и циркуляционный.

Рис. 4.11. Вакуумный (а) и циркуляционный (б) способы эманационного анализа жидкостей. Стрелками показано направление движения воздуха.

При вакуумном способе (а) из сцинтилляционной α-камеры 1 объемом Vк и из осушителя 2 объемом Voc через соединительные трубки 3 с зажимами З1-2 откачивают воздух. Затем кран К1 и зажимы открывают, после чего атмосферный воздух, проходя

через сосуд 4, обогащается растворенным в воде 5 радиоактивным газом, начинает поступать в эманационную камеру со скоростью около 100 пузырьков в минуту. Специальный сосуд плотно закрыт резиновой пробкой 6 с винтовым зажимом, предотвращающей утечку эманации. В замкнутой циркуляционной системе (б) эманация из сосуда с водой 4 (общий объем Vс, объем воды – Vвод) с помощью нагнетательной груши 7 объемом Vг через соединительные трубки 3 объемом Vт в течении времени прокачки tпр равномерно распределяется по всему газовому объему циркуляционной системы Vсист.

Если активность эманации, растворенной в воде и в воздухе, обозначить как Qвод и Qвозд, то общее количество эманации в системе составит

$$Q_{сист} = Q_{возд} + Q_{вод} = C_{возд} V_{возд} + C_{вод} V_{вод}, \quad (4.21)$$

где Vвозд, Vвод – объемы воздуха и воды в циркуляционной системе;

Свозд, Свод – концентрации эманации в воздухе и воде.

С учетом закона Генри:

$$Q_{сист} = C_{возд} V_{возд} + \alpha C_{возд} V_{вод} = C_{возд} (V_{возд} + \alpha V_{вод}). \quad (4.22)$$

Газовый объем циркуляционной системы Vсист определяется как

$$V_{сист} = Q_{сист} / C_{возд} = V_{возд} + \alpha V_{вод} \text{ , или}$$

$$V_{сист} = V_к + V_{ос} + V_г + V_т + V_с – V_{вод} + \alpha V_{вод}. \quad (4.23)$$

После введения Rn в камеру начинает происходить накопление его дочерних продуктов распада (тоже α-излучателей), что приводит к увеличению интенсивности α-излучения во времени. Нарастание I зависит от продолжительности введения tпр эманации в камеру, от формы и размера камеры, типа детектора, поэтому наряду со значением I фиксируют интервал времени tпауз от момента прекращения прокачки системы до начала измерений. Для гидрохимических проб tпр = 3-6 мин. Для анализа на Rn отбирают 0.2-0.5 л воды и помещают ее в сосуд, включенный в циркуляционную систему. Желательно произвести эту операцию не позже 4-5 суток после момента отбора пробы, т.к. если вода не содержит солей Ra, то за это время проба может потерять значительную долю активности.

4.6.2. Эманационная съемка в полевых условиях заключается том, что в определенной точке съемочного профиля производится отбор проб почвенного воздуха с некоторой глубины. Почвенный воздух по соединительной системе с помощью ручного насоса закачивается в эманационную камеру. После введения воздуха в камеру, с помощью ФЭУ и счетного устройства импульсов определяется количество сцинтилляций, которое пропорционально концентрации Rn в камере. Сцинтилляционный метод применим для анализа проб воздуха, содержащих Rn в концентрациях от нескольких десятых долей эмана и выше.

Обозначения:

1 – шпур

2 – пробоотборник воздуха

3 – соединительный шланг

4 – эманационная камера и измерительное устройство

5 – держатель и ручной насос

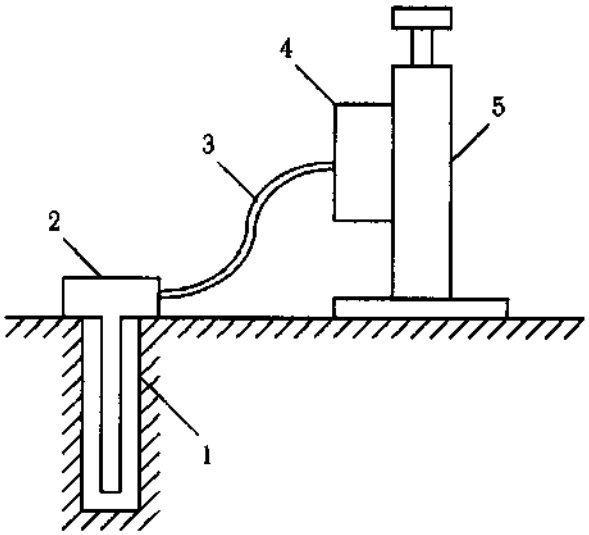


Рис. 4.12. Схема полевых эманационных измерений

4.6.3. Полевой эманометр «РАДОН». Полевой сцинтилляционный эманометр «Радон» предназначен для определения концентрации Rn в почвенном воздухе при эманационной съемке и определения Rn в пробах воды.

Эманометр состоит из следующих основных блоков: сцинтилляционной камеры, фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), блока питания и стабилизатора напряжения, усилителя импульсов, порогового дискриминатора, интенсиметра α-излучения, электромеханического счетчика (ЭМС) импульсов с секундомером. В комплект эманометра входит также ручной насос для закачки почвенного воздуха, осушитель и соединительные трубки.

Сцинтилляционная камера представляет собой металлический стакан покрытый внутри слоем ZnS(Ag) – веществом, фоточувствительным к ионизирующему воздействию α-частиц. При попадании α-частицы на слой сцинтиллятора образуется фотон, который, попадая в ФЭУ в результате фотоэффекта на катоде выбивает из него электрон. Под действием ускоряющего электрического поля напряжением ~600 В фотоэлектрон в дальнейшем столкновении с динодами ФЭУ производит лавинообразное умножение заряда, снимаемого с анода в виде короткого (~1-5 мкс) импульса напряжения. С выхода ФЭУ импульсы попадают на усилитель и далее – на пороговый дискриминатор, осуществляющий их отбор по амплитуде. С выхода дискриминатора импульсы поступают на ЭМС и аналоговый интенсиметр со стрелочным индикатором, принцип работы которого близок для большинства радиометров.

4.6.4. Подготовка прибора к работе. Начинается с зарядки батарей в отсек питания и проверки напряжения питания с помощью переключателя рода работ (положение НБ).

При правильной работе блока питания стрелка измерительного прибора должна находиться во второй половине шкалы. Далее производится проверка высокого напряжения ФЭУ: при переключателе рода работ НВ стрелка ИП должна отклоняться не менее чем на 16 делений шкалы. Если этого не происходит, то необходимо подождать 3-5 минут пока не установится рабочий режим (~18-20 делений).

Непосредственно перед началом измерений концентрации Rn необходимо проверить работоспособность эманационных камер и оценить их собственный фон. Камера считается пригодной к работе если фон не превышает 30-40 имп/мин. Дочерние продукты распада Rn, оседая на стенках сцинтилляционной камеры, могут вызвать ее радиационное загрязнение. Поэтому после измерений высокоактивных проб рекомендуется заменить камеру и не использовать ее до тех пор, пока фон не снизится до нормального уровня.

4.6.5. Подготовка установки для измерения концентраций Rn в воде заключается в сборе циркуляционной системы (см. соответствующий рисунок, б). Перед подключением соединительных трубок к эманационной камере краны К1-2 должны быть обязательно закрыты во избежание попадания эманации в детектор до начала измерений. Следует также проверять герметичность системы в целом и отсутствие в ней утечек воздуха. Следует обратить внимание на направление подключения груши, в противном случае при прокачке вместо воздуха в камеру может попасть вода и вывести прибор из строя.

Глава 5

СЕЙСМИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА

Тучки, тучки, облака – белые овечки.
Два геолога штаны штопают у речки.
С речки песня слышится, сейсмограммы пишутся.
Ой, ты, горе-сейсмограмма, ой, ты, гой еси!
Нету истины ни грамма сколько не тряси.
Но из этакой халтуры мы настряпаем структуры,
Наплевав в беспечности в обе бесконечности
Л. Тальвинский, выпускник СГИ 1952 г.

5.1. ЗАДАЧИ ПРАКТИКИ

Сейсмическая разведка – ведущий полевой геофизический метод. Он позволяет решать разнообразные геологические задачи с наибольшей детальностью и точностью по сравнению с любым другим геофизическим методом.

Сущность сейсморазведки состоит в том, что вблизи земной поверхностей при помощи взрывов или невзрывных источников (ударов, вибраций) искусственно возбуждают поле упругих (сейсмических) волн. Распространяясь в земных недрах по всевозможным направлениям, сейсмические волны отражаются и преломляются на границах слоев с различными физическими свойствами и регистрируются с помощью специальной высокочувствительной аппаратуры на поверхности земли или в скважине. При этом они приносят важную и большую по объему информацию о внутреннем строении геологической среды.

Сейсмические волны представляют собой механические колебательные движения, распространяющиеся через геологическую среду в виде деформаций, т.е. изменений взаимного расположения материальных частиц среды. В теории сейсмических волн используют два предположения. Во-первых, среда считается **упругой**, это означает, что после прохождения волны частицы среды возвращаются в исходное равновесное состояние. Во-вторых, смещения частиц считаются **малыми.**

Сейсмические волны разделяются на поверхностные и объемные. Распространение поверхностных волн связано с наличием границы раздела упругих свойств, например, земля-воздух. Вблизи границы сосредоточена подавляющая часть энергии поверхностных волн. Объемные волны распространяются внутри среды. Важнейшими для сейсморазведки являются объемные волны, в которых направление смещения частиц совпадает с направлением распространения волны - продольные (P) волны, а также волны, в которых смещение частиц перпендикулярно к направлению распространения волны – поперечные (S) волны. Скорость распространения продольных волн в среде V_P всегда больше скорости распространения поперечных волн V_S. Их отношение превышает $\sqrt{2}$.

При решении *структурных* задач изучают времена регистрации сейсмических волн. Динамические параметры волн (амплитуда, частота) позволяют получать информацию о *вещественном* составе пород - производить литологическое расчленении изучаемых разрезов, устанавливать тип флюидов в породах (вода, нефть, газ).

Наиболее широкое применение сейсморазведка получила при поиске и разведке месторождений нефти и газа. Вторым по значению применением сейсморазведки является ее использование при инженерно-геологических изысканиях.

Особенности строения сейсмического разреза в окрестности пос. В. Сысерть обусловили содержание геологических задач, которые решаются на практических занятиях по сейсморазведке. Это *задачи изучения верхней части разреза для инженерно-геологических целей* методом преломленных волн (МПВ):

- определение мощности рыхлых аллювиальных отложений в долине р. Сысерть и элювиально-делювиальных отложений на территории сейсмического полигона (рис. 5.1);

- изучение пространственного распределения неоднородностей, отображающих особенности строения рыхлой толщи мезо-кайнозойских отложений до глубины 20 м;

- регистрация элементов волнового поля с целью определения физико-механических характеристик и основных упругих модулей рыхлых отложений в разрезе и плане;

- определение состава и состояния горных пород;

- определение основных структурно-тектонических элементов рыхлой и кристаллической толщи;

- использование сейсмических методов для изучения современных геологических и инженерно-геологических процессов, таких как изменение уровня грунтовых вод (УГВ), изменение положения сейсмических границ, связанных с состоянием горных пород.

5.2. УСЛОВИЯ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЕЗА

В ходе практических занятий по сейсморазведке проводятся исследования на площадках двух основных типов.

Первый тип представлен главным образом в северной части поселка, второй - в пойменной части р. Сысерть.

Рельеф местности в пределах полигонов первого типа холмистый. Абсолютные отметки от 260 до 265 м. Относительные превышения составляют 2 – 4 м на 100 метров. Участки залесены. Лес представлен соснами высотой 20-30 м, диаметром до 60 см.

Рельеф местности в пределах полигонов второго типа равнинный, иногда заболоченный, слабозалесенный. Мощность почвенно-растительного слоя на залесенных участках составляет 0,1 - 0,2 м, в пойме реки – свыше 0,2 - 0,4 м .

В пределах полигонов имеются ЛЭП, трубопроводы.

Полигоны первого типа

Эти полигоны отличаются сложным строением. Для них характерно наличие зон тектонических нарушений, круто падающих складок и других элементов, благодаря которым в сейсмическом разрезе присутствуют границы с большими углами падения. Изучение строения участков этого типа с помощью сейсморазведки представляет собой непростую задачу. Представление о разнообразии скоростных законов в пределах площадок этого типа дают результаты сейсмического каротажа и данные изучения керна в скважинах № 1, 2, 3, 4, 5 (бурение выполнено трестом УралТИСИЗ в 1989 году). Эта информация приведена на рис. 5.2.

Полевые материалы МПВ, полученные на этих площадках, характеризуют среду, как градиентно-слоистую, с плавным изменением скорости в плане и по глубине. Форма годографов первых вступлений также плавная. Годографы могут быть проинтерпретированы как годографы рефрагированных волн. Градиент скорости наблюдается не только по вертикали, но и по горизонтали. Для отдельных участков этих полигонов характерна неувязка встречных годографов, связанная с наличием субвертикальных и крутопадающих границ. Максимальная глубина исследований на участках этого типа составляет 8-12 м при длине годографов 46 м и 6 - 7 м при длине годографа 34,5 м.

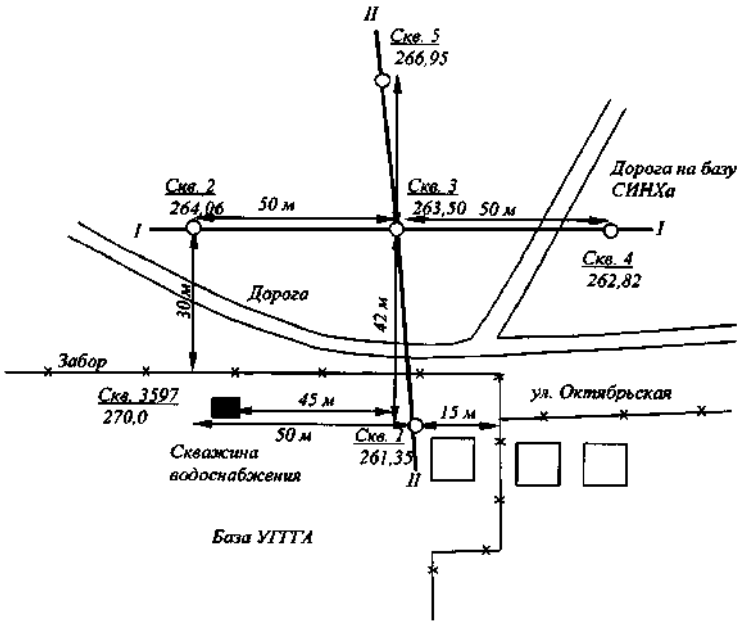


Рис. 5.1. Схема расположения инженерно-геологических скважин

Полигоны второго типа

на сейсмическом полигоне первого типа к северу от территории базы практики

Полигоны этого типа расположены на пойменных террасах. Для верхней части геологического разреза здесь характерно горизонтально-слоистое строение. Уровень грунтовых вод (УГВ) находится на глубине от 0 до 5 м. Кровля малоизмененных скальных пород расположена на глубине от 4 до 15 м. Наиболее сложным по строению участком этого типа является участок вблизи мостового перехода через р. Сысерть, находящегося около плотины. Он осложнен наличием слоев, представленных техногенными отложениями (шлак, насыпной грунт). Эта особенность разреза создает помехи при получении материалов МПВ.

Годографы первых вступлений для полигонов этого типа хорошо увязываются между собой и характеризуют среду как однородно-слоистую. Преломляющие границы горизонтальны либо слабо наклонены в сторону реки.

Максимальная глубина исследования на участке "футбольное поле" (восточная окраина п. В.Сысерть) составляет 20 м при длине годографа 92 м, на участке "мостовой переход" – 7 м при длине годографа 23 м.

Наиболее яркими сейсмическими границами в пределах описываемых участков являются:

- граница УГВ, которая характеризуется резким скачком скорости продольных волн до 1500 м/с и более в аллювиальных отложения;

-граница скальных пород (в основном разной прочности и трещиноватости) с рыхлыми четвертичными или рыхлыми мезозойскими отложениями;- граница УГВ в сильно-трещиноватых скальных породах низкой прочности.

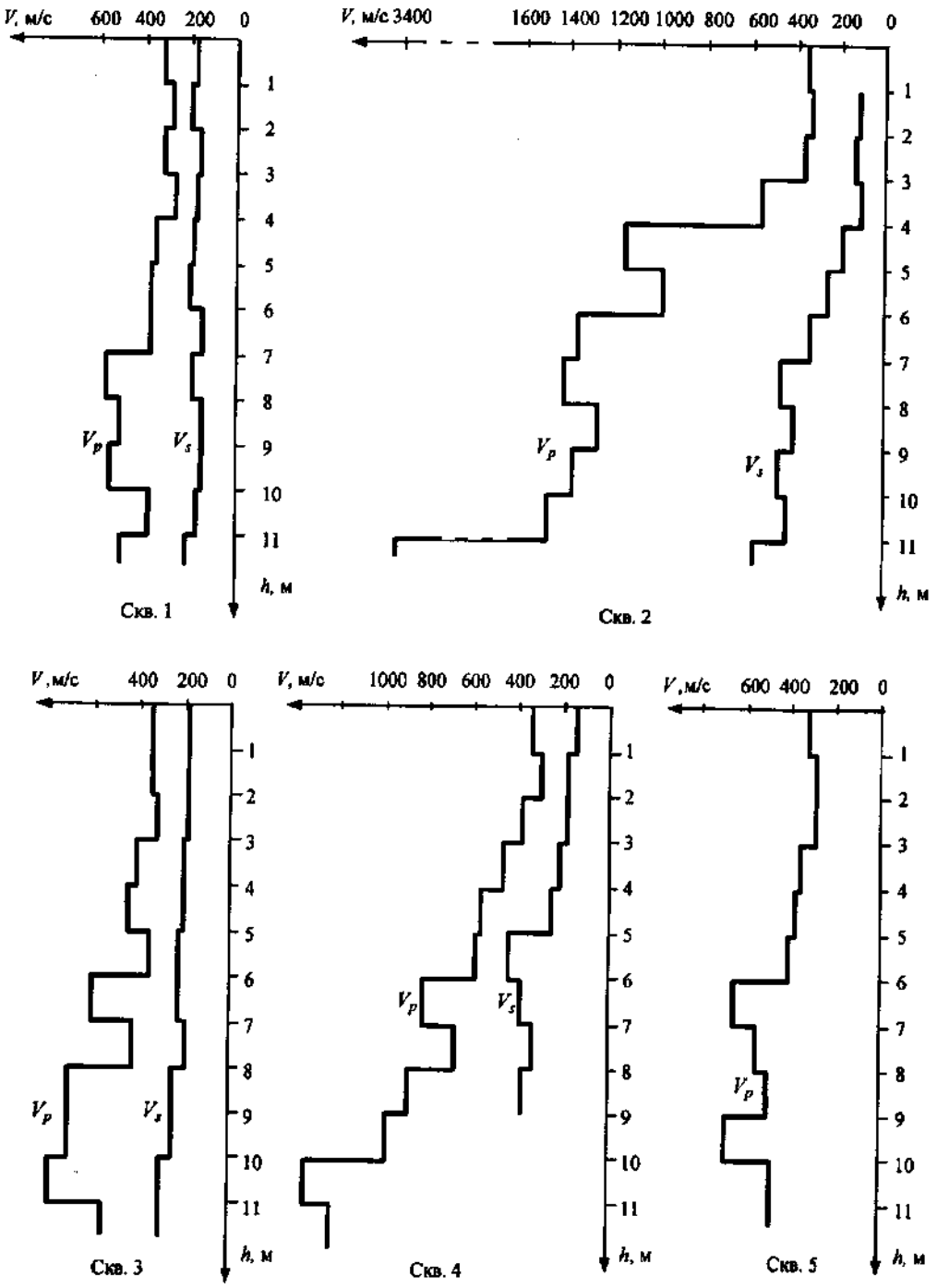


Рис. 5.2. Скоростные разрезы, полученные по скважинам № 1, 2 , 3, 4, 5 при проведении сейсмического каротажа

5.3. АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.3.1. Сейсмические станции.

Особенности проведения инженерно-сейсмических исследований определяют следующие требования к сейсморазведочной аппаратуре: - портативность, небольшие габариты и масса; - возможность синхронного накопления слабых воздействий; - наличие дисплея для оперативного контроля принимаемых сигналов, устройства воспроизведения на переносной накопитель (магнитный диск, флэш-память и т.п.).

В настоящее время в России и за рубежом выпускают цифровые сейсмические станции, отвечающие указанным требованиям. Они представлены станциями двух типов: малоканальные (12 - 48 каналов) и многоканальные (свыше 48 каналов).

Сопоставление технических параметров некоторых современных сейсмостанций, применяемых при инженерно-сейсмических работах приведено в табл. 5.1. Некоторые серийные цифровые сейсмостанции, из этого списка, например "Интромарин-L2", предназначены и для глубинных исследований на нефть и газ.

Таблица 5.1

Основные технические характеристики современных отечественных сейсморазведочных станций, применяемых в инженерной сейсморазведке

Параметры сейсмостанций	Названия сейсмостанций						
	ЭХО-3М	Интромарин –L2 "Калипсо", "Гея"	"ДИОГЕН"	ПРИСТАВКА "ДИОГЕН"	Лакколит-М	Талгар-6М"	GS-TE
Количество каналов	6-96	48-128	24-48	3-32	2-1024	12	96
Динамический диапазон, дБ	116	139	72-140	72-84	96	54	140
Частотный диапазон	1-500	3-500	5-8000	5-8000	10-2000	16-2000	0-1650
Разрядность АЦП	19	24	12-24	12-14	16	10	24
Усиления, дБ	12-96	12-48	0-90	0-90	0-52		12-48
Длина записи, с		32	4	2	2	1	32
Нелинейные искажения, %	0,002	0,001					0,001
Число накоплений			256	256	32000		
Режекторные фильтры	50Гц, 90дБ/ октаву	50Гц, 90 дБ/ октаву	50 Гц, 50 дБ/ октаву	50 Гц, 50 дБ/ октаву	50 Гц, 50 дБ/ октаву		50Гц, 90 дБ/ октаву
Бортовой компьютер	Notebook	Pentium - 3	Notebook	Notebook	Notebook	Нет	Notebook Pentium

Накопитель сейсмической информации	HDD, FDD	HDD, MO	HDD, FDD	HDD, FDD			
Сейсмический формат		SEG-D, SEG-Y					SEG-Y
Вес, кг	3	40		7		20	
Рабочие температуры, град С		0-40			-20 +40		- 40 + 60
Питание	Акк. бат. 12 В	Акк. бат. 24 В	Акк. бат. 12 В	Акк. бат. 12 В	Акк. бат. 12 В	Акк. бат. 12 В	Акк. бат. 12 В
Энергопотребление, Вт/канал	0,5	3	0,6-1,2	2,6	0,5	2,9	
Цена 1 канала, у.е.	370	500			300-350	290	

Рассмотрим принципиальные особенности устройства современной сейсмостанции на примере системы сбора сейсмической информации ***"Интромарин L2***" .

Сейсморазведочная система "Интромарин L2" предназначена для проведения профильных сейсмических исследований с высокой разрешающей способностью как в транзитной зоне (переходная между водой и сушей зона), так и на суше. Она рассчитана на ведение работ, как с импульсными, так и вибрационными источниками возбуждения сейсмических колебаний. Импульсные источники могут быть взрывного и невзрывного типа. Система может работать практически с любой из известных систем синхронизации с источником. В качестве приемных устройств применяются сейсмоприемники электродинамического типа.

Система "Интромарин L2" позволяет:

– производить регистрацию в стандартном варианте по одной линии профиля;

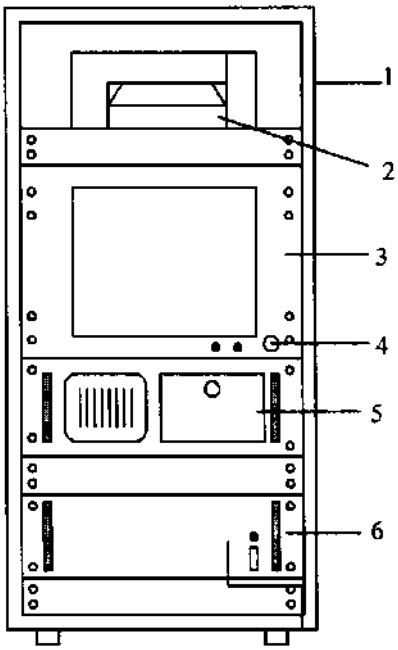
– выполнять оперативный контроль над процессом сбора, предобработки и регистрации данных;

– тестировать систему в автоматическом режиме; регистрировать данные на жесткий диск и магнитооптические диски;

– формировать рапорт оператора на гибком диске;

– выводить на бумагу сейсмограммы, результаты диагностики и рапорт оператора.

–



– *Рис. 4.3. Внешний вид стойки сейсмостанции "Интромарин L2"*

– *с блоками:*

– *1 – стойка; 2 - принтер; 3 - монитор;*

– *4 – ключ зажигания; 5 – промышленный компьютер; 6 - ПАСМ-128*

–

Система предназначена для установки на транспортных средствах или в помещении, обеспечивающих защиту от водных брызг и прямых солнечных лучей. Температура окружающей среды при эксплуатации от 10 до 40 градусов Цельсия.

5.3.2. Блок – схема сейсмостанции ***Интромарин -L2.***

Конструктивно станция выполнена в виде функционально законченного набора блоков, размещенных в стойке. Внешний вид стойки с блоками показан на рис.5.3. Система включает:

– **ПАСМ-128** - преобразователь аналоговых сигналов многоканальный (6);

– **ПК** промышленный компьютер (5);

– жидкокристаллический **монитор** (диагональ - 17”) с сенсорным экраном (3);

– струйный **принтер** HP DeskJet 640 (2);

– **БУП** - блок управления электропитанием;

– накопитель на магнитооптических дисках (**МО**);

– плата синхронизации запуска (**ПС)**

БУП представляет отдельный небольшой блок, расположенный внизу стойки сейсмостанции. Магнитооптический накопитель и плата синхронизации встроены в ПК. Кроме того, на передней панели монитора расположен ключ зажигания (4), относящийся к БУП, и обеспечивающий включение питания сейсмостанции.

Питание системы осуществляется от аккумулятора напряжением 24 В. Блок - схема электрических соединений сейсмостанции показана на рис. 5.4..

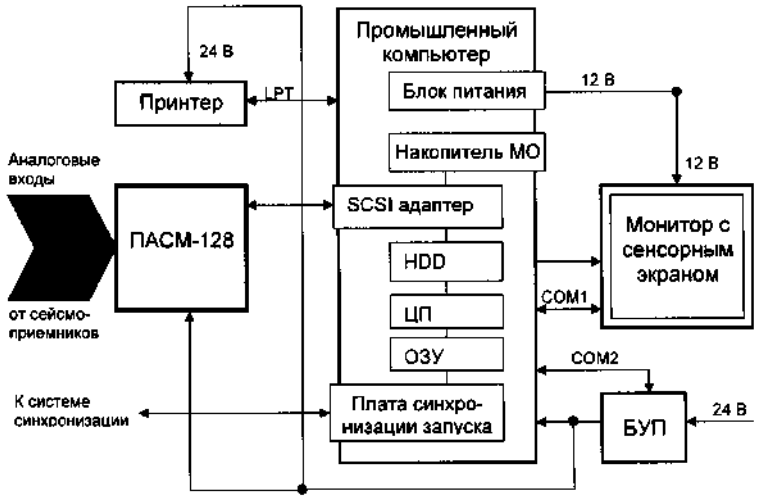


Рис. 5. 4. Блок – схема электрических соединений сейсмостанции "Интромарин-L2".

5.3.3. Устройство и работа составных частей сейсмостанции.

Многоканальный преобразователь аналоговых (сейсмических) сигналов ПАСМ-128

ПАСМ-128 служит для высокоточного аналого-цифрового преобразования напряжений, поступающих для регистрации от сейсмоприемников. Число подключаемых к ПАСМ активных сейсмических каналов составляет 120, вспомогательных - 8. В ПАСМ имеется 16 канальных плат. Каждая канальная плата рассчитана на обработку сигналов с 8 активных сейсмических каналов.

Общее количество каналов, подключаемых к канальной плате равно 16, т.е. в два раза больше, чем число активных каналов. Подключение активных каналов на вход ПАСМ осуществляется с помощью аналогового коммутатора, позволяющего подключить один из двух возможных каналов, что позволяет работать по МОГТ.

Кроме канальных плат в ПАСМ имеются плата устройства управления УУ и плата цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Плата УУ осуществляет контрольно-управляющие функции. Она передает в промышленный компьютер результаты аналого-цифрового преобразования входных сигналов, а обратно в ПАСМ команды и данные, необходимые для синхронизации и управления процессом регистрации, а также для формирования тестовых сигналов.

Плата ЦАП служит для формирования тестовых сигналов и их подачи на канальные платы в режимах калибровки и диагностики.

ПАСМ-128 обменивается данными с промышленным компьютером через высокоскоростной SCSI интерфейс. Один SCSI - адаптер обслуживает один ПАСМ-128.

На передней панели ПАСМ находится светодиод – индикатор наличия питания в ПАСМ и кнопка включения питания ПАСМ со световой индикацией. Светодиод сигнализирует об отсутствии используемых в блоке напряжений (-5В, ±12В) или о неисправности предохранителя.

Промышленный компьютер

Промышленный компьютер (ПК) предназначен для управления процессами сбора, предобработки, оперативного контроля и регистрации сейсмической информации, а также проведения цифровой калибровки каналов, тестирования и диагностики основных режимов работы.

ПК выполнен в виде встроенного в стойку пылеводозащитного блока (Aquatech 610), оснащенного системой принудительной вентиляции, состоящей из двух вентиляторов и фильтров. Корпус ПК снабжен ручками, служащими для удобства монтажа и демонтажа станции. ПК крепится четырьмя мощными болтами к стойке сейсмостанции для исключения произвольного перемещения при транспортировке.

Питание ПК осуществляется от постоянного напряжения 24 В через блок управления питанием (БУП). Это обеспечивает снижение наводок при регистрации сейсмических данных.

На передней панели компьютера расположены кнопки: "reset" – мягкая перезагрузка компьютера и "power" – включение питания компьютера. Переключатель "установка/работа" служит для выбора режима работы. В режиме "установка" выполняется инсталляция программного обеспечения, а в режиме "работа" - регистрация сейсмограмм и тестирование сейсмостанции. Кроме того, здесь имеются: разъем для подключения клавиатуры (для системных работ), вентиляционная решетка со сменным фильтром, лампочки светодиодов жесткого диска и индикации состояния питания компьютера, щели для установки МО диска и гибкого диска 3.5”.

На задней панели ПК находятся разъемы для соединения с другими блоками системы (рис. 5.5.): монитором, сенсорным экраном, блоком питания, принтером, ПАСМ и системой синхронизации источника.

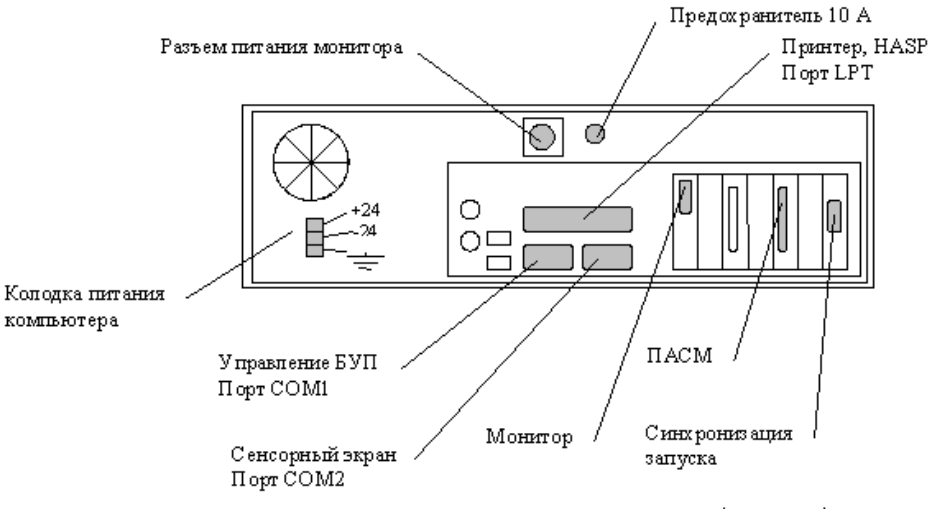


Рис. 5.5. Расположение разъемов на системном блоке (вид сзади)

Компьютер включает следующие компоненты:

- материнскую плату Pentium III 2× 550 МГц;
- оперативную память (ОЗУ) – 128 Мб;
- контроллер SCSI на два канала;
- жесткий диск (HDD) – 10 Гб (IDE);
- магнитооптический накопитель (МО) – 230/640 Мб;
- дисковод 3,5”;
- порты LPT, COM1, COM2;
- плату синхронизации запуска (FIFO).

Программное обеспечение на ПК устанавливается с МО-диска. Количество инсталляций не ограничено. При инсталляции вся сейсмическая информация с жесткого диска затирается. Для защиты программного обеспечения от несанкционированного копирования на разъем LPT подключается HASP – специальный электронный ключ.

Монитор

Монитор предназначен для отображения оперативной служебной информации (управления, тестирования, диагностики) и сейсмограмм. Благодаря наличию встроенного сенсорного экрана (***touch screen***), оператор имеет возможность управлять работой сейсмостанции путем нажатия пальцем на соответствующие участки поверхности монитора. Конструктивно сенсорный экран размещен поверх жидкокристаллического монитора. Вместо сенсорного экрана может быть подключен манипулятор типа "мышь".

Система "Интромарин L2" в стоечном варианте ("Гера") укомплектована жидкокристаллическим (LCD) монитором 17” SVGA. Монитор имеет конструкцию в исполнении "Rack mount", что обеспечивает достаточную прочность в полевых

условиях. Постоянное питающее напряжение 12 В для монитора подается через блок питания компьютера (см. рис.5.5.).

На передней панели монитора имеются скважина для ключа управления питанием (ключ зажигания) и индикаторы питающих сетей. У ключа возможны два положения: горизонтальное "ВКЛ." - включение питания сейсмостанции и вертикальное «ВЫКЛ." - отключение питания. Если включен красный индикатор, то значение напряжения питания или меньше 22 В или больше, чем 29 В, зеленый – наличие питающего напряжения в интервале от 22 В до 29 В.

Магнитооптический накопитель

Магнитооптический накопитель предназначен для записи сейсмической информации на магнитооптические диски, а также для инсталляции программного обеспечения. В отличие от ленточных накопителей МО-диск имеет меньший объем – 230/640 МБ, но зато обладает большей надежностью и высокой скоростью доступа (параллельное чтение информации). Недостатком является то обстоятельство, что этот носитель информации не является стандартным для промышленных систем обработки типа PROMAX, VISTA и др.

Накопитель МО встроен в ПК и подключается по SCSI – интерфейсу. Вставка диска в щель МО-накопителя осуществляется аналогично тому, как это делается для гибких дисков. Для извлечения МО-носителя из дисковода стандартно имеется 2 варианта: 1 – программным способом с помощью процедуры "извлечь", 2 – нажатием специальной кнопки над щелью накопителя МО. Если диск МО не извлекается стандартно, то используется специальная монтировка, которая вставляется в маленькое отверстие на панели МО-накопителя и освобождает застрявший диск.

Блок управления питанием

Блок управления питанием (БУП) предназначен для контроля в процессе мониторинга полярности и величины напряжения питания, подаваемого в блоки сейсмостанции.

БУП представляет собой автономное устройство, оснащенное микроконтроллером и аналого-цифровым преобразователем. Питание БУП осуществляется от постоянного напряжения 24 В. Схема питания сейсмостанции дана на рис. 5.6. Кабель питания от аккумулятора к БУП должен быть как можно короче и экранированным, что обеспечит защиту от электрических наводок. К компьютеру блок питания подключается через последовательный порт COM2.

При переводе ключа управления питанием в положение "ВКЛ." БУП измеряет напряжение питания и, если его значение находится в пределах от 22 В до 29 В, то через электромеханическое реле подает питание на ПК и ПАСМ.

В дальнейшем с периодом около 1 секунды БУП измеряет на входном разъеме электропитания напряжение и ток, потребляемый системой, и передает компьютеру

полученные значения по каналу RS232. Далее БУП действует в соответствии с командами компьютера, формируемыми в зависимости от величины измеряемых параметров, и обеспечивает отключение сейсмостанции при достижении напряжений 19 В и 29.5 В. Таким образом, БУП производит выключение питания станции двумя способами.

В первом случае, если оператор перевел ключ управления питанием в положение "ВЫКЛ.", то из БУП в ПК поступит команда на завершение работы. Программное обеспечение ПК выполнит действия для нормального завершения работы системы с сохранением всех текущих данных. После выполнения сворачивания программного обеспечения ПК выдаст в БУП команду на отключение питания. Через 30 секунд БУП выключает электромеханическое реле и обесточивает систему.

Во втором случае, при выходе напряжения питания за допустимые пределы 19 В и 29.5 В ПК принимает решение о завершении работы, завершает ее нормально и выдает в БУП команду на отключение питания. Через 30 секунд БУП выключает электромеханическое реле и обесточивает систему.

Принтер

Система "Интромарин L2" комплектуется струйным принтером фирмы HEWLETT PACKARD HP DeckJet 640 C. Принтер производит печать по методу термической чернильной струйной печати на обычной бумаге. Напряжение питания принтера 24 В поступает от блока управления питанием. Соединение принтера с компьютером производится по параллельному интерфейсу Centronics, IEEE 1284, совместимому с розеткой 1284 – B (Bi – Tronics, EPS).

Плата синхронизации запуска

Плата синхронизации (ПС) предназначена для синхронизации процесса регистрации информации с событием запуска источника сейсмических колебаний. Плата смонтирована в промышленном компьютере и называется FIFO. Она подключена к PCI слоту (возможны другие параллельные порты). Плата может работать с большинством систем синхронизации: ССВ-1, ССВ-2, SGS, Маша, ГС, Интромарин-S и др.

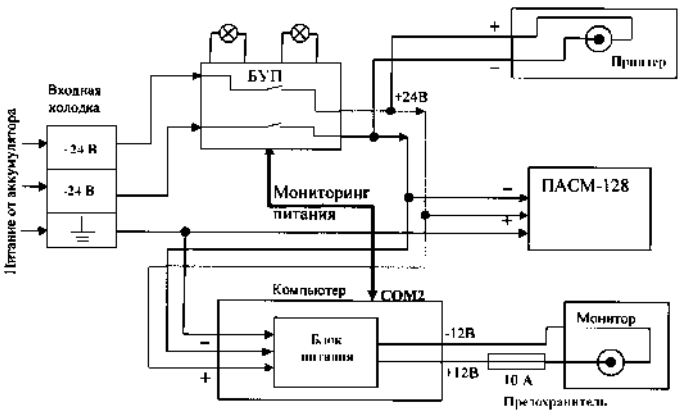


Рис. 5.6. Монтажная схема электропитания системы

5.3.4. Прохождение сейсмических сигналов в сейсмостанции

В станции предусмотрено 3 основных режима прохождения сейсмических сигналов из ПАСМ в управляющий компьютер: запись сейсмических данных, регистрируемых сейсмоприемниками, калибровка сейсмических каналов, тестирование сейсмических каналов.

В режиме записи процесс прохождения сейсмических сигналов в сейсмической станции "Интромарин L2» схематично можно представить следующим образом. Сейсмические сигналы от сейсмоприемников через специальные сейсмические разъемы сначала поступают на входы канальных плат блока ПАСМ, где происходит процесс усиления, предварительной фильтрации и преобразования аналогового сигнала в цифровой. Далее сейсмический сигнал, оцифрованный с частотой 8 кГц, в мультиплексной форме передается по шине данных на компьютер. В компьютере выполняется предварительная обработка сейсмических данных, включающая ввод корректирующих поправок, передецимацию сигнала до частоты дискретизации, более глубокую и качественную фильтрацию, демультиплексацию, суммирование и корреляцию. Обработанные сигналы записываются во внутреннем формате в оперативную память и на жесткий диск компьютера. С жесткого диска данные в стандартном сейсмическом формате могут быть записаны на магнитный накопитель. Описанная схема представлена на рис. 5.7.

В режиме калибровки автоматически измеряются напряжения на выходе АЦП при подаче на входные усилители эталонного гармонического сигнала. Данные измерений записываются в память компьютера и используются программным обеспечением для ввода поправок в амплитуды и фазы сигналов за не идентичность. Калибровка выполняется в процессе регистрации сейсмических данных несколько раз в среднем 1 раз в течение 1 часа.

В режиме тестирования выполняется два вида тестов:

- измерения сопротивления цепи подключения сейсмоприемников (тест короткого замыкания и тест обрыва косы);

- тестирование сейсмических каналов сейсмостанции (максимальные среднеквадратические значения входных напряжений, неидентичность коэффициентов усиления, среднеквадратическое напряжение шумов, коэффициенты гармоник, взаимное влияние каналов).

В обоих случаях в ПАСМ производятся измерения на гармоническом сигнале заданной частоты (31,25 и 62,5 Гц), который подается от контрольного цифро-аналогового преобразователя ЦАП DAC-7, который получает управляющие сигналы от программного обеспечения сейсмостанции при переходе в режим измерения сопротивления датчиков.

5.3.5. Сейсмические косы

Для присоединения большого количества сейсмоприемников к сейсмостанции служат специальные собранные в один пучок провода. Они называются сейсмическими косами. В качестве материала для кос может использоваться кабель КСП-27. Основными параметрами косы являются число ее каналов и шаг между выводами очередной пары проводников – шаг приемников Δx. Для тестирования кос перед работой применяют проверки на целостность соединительных проводов путем измерения сопротивлений - "прозванивания".

5.3.6. Сейсмоприемники

В качестве приемников упругих колебаний в инженерной сейсморазведке применяют стандартные сейсмоприемники вертикального типа СВ-5, СВ-10 Ц, СВ-20, СВ-30 и горизонтального типа СГ-10 (цифра обозначает частоту первого электромеханического резонанса, выше которой располагается рабочая зона частот сейсмоприемника). Внешний вид типичного современного сейсмоприемника приведен на рис. 5.8. Сейсмический приемник состоит из корпуса, жестко соединенного с корпусом сильного постоянного магнита и подвешенной на специальных пружинах катушки из немагнитного материала с намотанным на нее тонким медным проводом. В результате явления электрической индукции, возникающего при относительном перемещении катушки и магнита при быстром смещении частиц грунта в точке расположения сейсмоприемника, в проводе катушки создается малая и переменная по величине и знаку ЭДС, которая через косу передается в сейсмостанцию для усиления и обработки. Сейсмоприемники являются приборами, имеющими полярность, поэтому правильность их присоединения к сейсмической косе обеспечивается специальными разъемами.

Для проверки правильности работы сейсмоприемников с помощью омметра измеряют электрическое сопротивление катушки, а с помошью ампервольтметра можно проверить наличие переменной ЭДС.

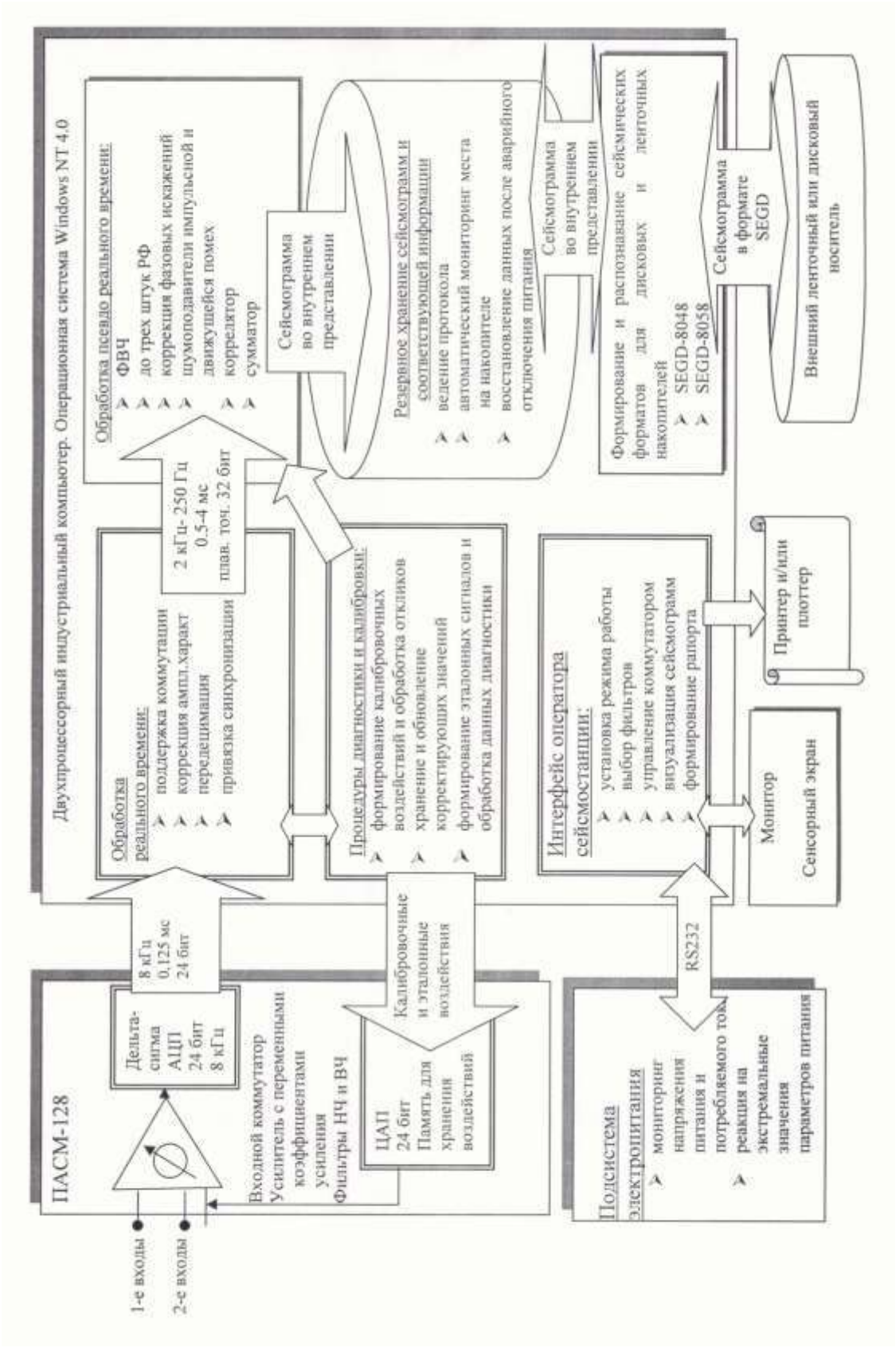


Рис. 5.7. Схема прохождения сейсмического сигнала в сейсмостанции

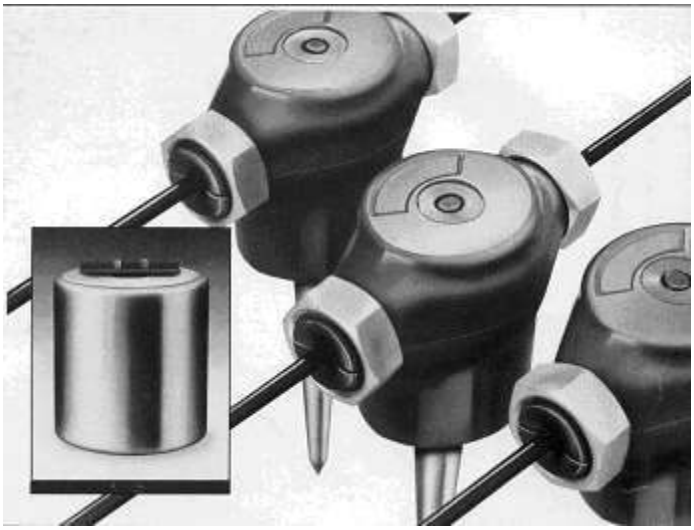


Рис. 5.8. Сейсмоприемники электродинамического типа

Основным приемом для проверки пригодности сейсмоприемников к полевым работам является специально выполняемая с помощью сейсмостанции проверка сейсмоприемников на идентичность. В ходе ее проверяемые сейсмоприемники устанавливаются на твердой площадке небольших размеров (для малого числа каналов - это площадка размером примерно 1 м × 1 м) и присоединяются последовательно к сейсмической косе. Получается ряд записей сейсмических волн с пункта возбуждения, удаленного на значительное (20 - 40 м) расстояние от этой площадки. На основе анализа полученных записей делается вывод о работоспособности, полярности и идентичности сейсмоприемников, подключенных к определенным каналам. Пример сейсмограммы с проверкой на идентичность приводится на рис. 5.9. На этой записи все сейсмоприемники работают идентично и могут быть использованы в поле.

5.3.7. Источники упругих волн

При проведении инженерно-сейсмических исследований применяются, как правило, импульсные источники сейсмических волн. Излучающим элементом импульсного источника является жесткая металлическая плита, по которой производится удар. Действие вертикальной силы на нее приводит к возбуждению продольных - P поперечных - S и поверхностных волн. На долю волн P приходится только 7 % от общей энергии, на долю волн S – 25 %, на долю поверхностных волн – 68%.

Несмотря на определенные достоинства взрывного метода (неограниченная глубинность, широкий частотный спектр), невзрывные источники исключают вредное воздействие на окружающую среду; они экономичны, обеспечивают возможность проведения исследований в населенных пунктах, могут создавать направленное воздействие для записи поперечных волн.

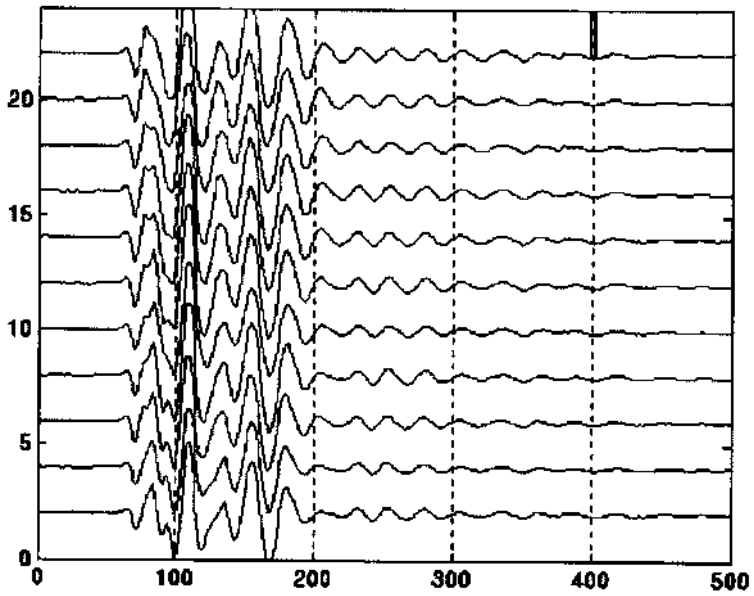


Рис. 5.9. Сейсмограмма, показывающая результаты проверки сейсмоприемников на идентичность. По горизонтали показано время в мс.

5.4. МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.4.1. Особенности технологии метода преломленных волн (МПВ)

Основным сейсмическим методом, который применяется при решении инженерно- геологических задач, является метод преломленных волн.

Метод преломленных волн (МПВ) основан на регистрации и последующем использовании записей головных, рефрагированных и др типов волн, которые показаны на лучевой схеме рис. (лучевая схема СС308). Особенностями метода являются: большой диапазон исследуемых глубин (от метров до десятков км), малая зависимость получения хороших по качеству записей от наличия регулярных волн-помех (многократноотраженных и поверхностных), сравнительно высокая детальность расчленения среды по вертикали. При интерпретации данных МПВ могут быть определены глубина залегания и форма преломляющих границ, скорости в покрывающей толще и граничные скорости, выделены и протрассированы по площади разрывные нарушения, контакты и т.д. Граничная скорость в МПВ определяется с очень высокой точностью (1-2 %).

МПВ применяется при региональных исследованиях, при проектировании инженерных сооружений, разведке грунтовых вод, для определения упругих параметров пород разреза.

Основным видом наземных сейсмических исследований является продольное профилирование. В зависимости от решаемых геологических задач наблюдения проводят по отдельным профилям или по системе пересекающихся профилей (площадная съемка). Профили стремятся располагать вдоль элементов рельефа.

5.4.2. Системы наблюдений в сейсморазведке МПВ

Взаимное расположение пунктов возбуждения ПВ и пунктов приема ПП называется **системой наблюдений**. Системы могут быть *продольными*, когда пункты возбуждения и приема располагаются на одной линии, и *непредельными* - когда пункты возбуждения располагаются на некотором расстоянии от линии наблюдений. Участок профиля, занимаемый совокупностью сейсмоприемников для записи волны от одного пункта возбуждения, называют стоянкой или базой наблюдений. Участок профиля, расположенный между соседними ПВ называют **взрывным интервалом**.. Расстояние между соседними сейсмоприемниками называют **шагом наблюдений Δx**. Системы наблюдений обычно изображают на плоскости годографа или на обобщенной плоскости (рис.5.10).

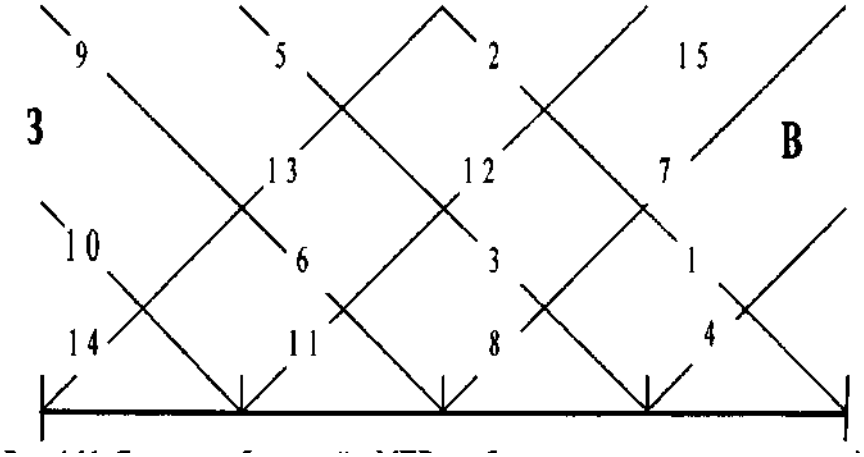


Рис. 5.10. Система наблюдений в МПВ, изображенная на плоскости годографа.

Цифрами показаны номера сейсмограмм. На горизонтальной линии располагаются сейсмоприемники. Наклонные линии пересекают ее в местах расположения пунктов возбуждения и показывают качественно вид годографов первых вступлений

Как правило, при работах МПВ выбирается система наблюдений, которая является полной, обеспечивающей увязку и корреляцию волн для прослеживаемой преломляющей границы. Это достигается получением встречных и нагоняющих годографов первых вступлений волн вдоль всего профиля. Если прослеживается несколько границ, то система наблюдений должна быть полной для самой глубокой (опорной) границы, а другие границы можно изучать по неполным системам. Выполнение названных требований к системе наблюдений позволяет использовать при интерпретации интерполяцию между отдельными точками наблюдений.

Для изучения азимутальной изменчивости граничных скоростей используют системы из нескольких пересекающихся профилей ("звездочки"), а также сочетание продольного и непродольного профилирования.

5.4.3. Выбор параметров инженерно-сейсмической съемки

Важной проблемой является выбор шага сейсмоприемника по профилю Δx, поскольку надо учитывать как требование детальности (уменьшение Δx), так и производительности работ (увеличение Δx). Для удобства значение Δx выбирают равным 1, 2, 5 или 10 м. Значения Δx обычно составляют 1,2 или 5 м при изучении глубин до 30 — 40 м, а также при детализации изучаемых объектов. При глубинах изучения 50—100 м и более шаг Δx составляет 5—10 м.

Системы возбуждения и регистрации

Выбор системы возбуждения и регистрации определяются типом используемых волн (рис. 5.12). Для получения продольной Р-волны применяют систему Z-Z: вертикальный удар и вертикальный сейсмоприемник. Для записи обменных PS-волн указанную систему дополняют горизонтальными сейсмоприемниками, направленными вдоль профиля (Z-X*).* Для регистрации поперечных SH волн используют систему Y-Y: горизонтальные сейсмоприемники ориентированы перпендикулярно к профилю. Так же ориентировано ударное воздействие. Волны, имеющие горизонтальную составляющую, возбуждают с помощью ударов по вертикальной стенке специально выкопанного шурфа.

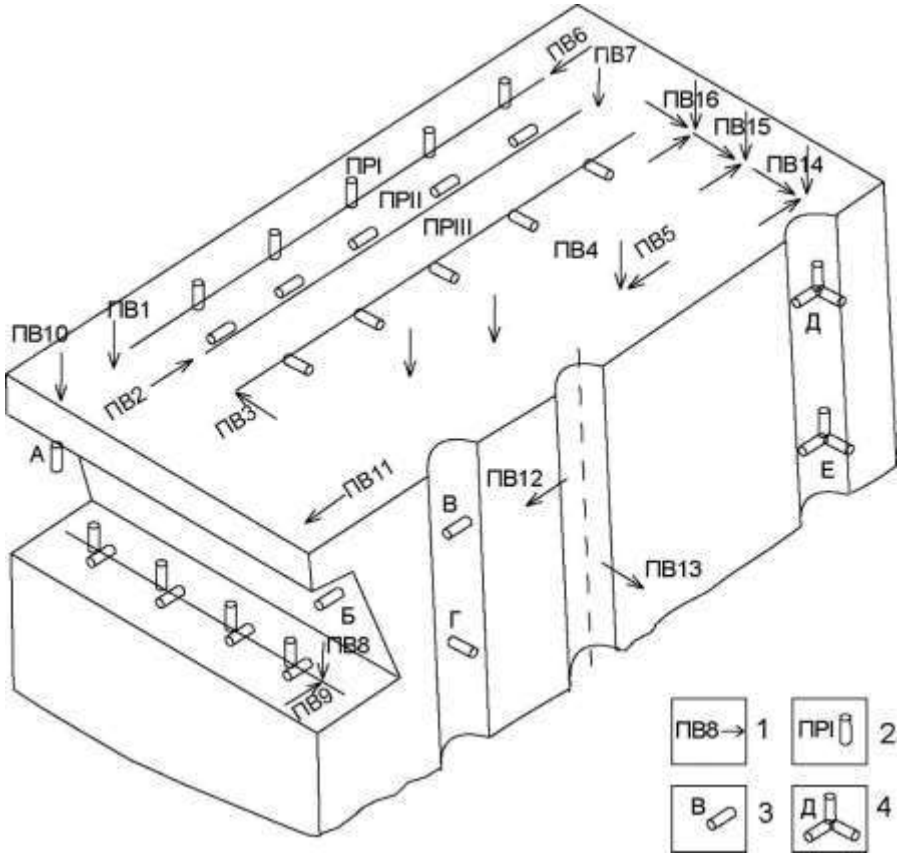


Рис. 5.11. Схемы проведения различных видов сейсмических работ .

Наземное продольное профилирование по схемам *Z - Z* (ПР I, ПВ 1), *X - X* (ПР II, ПВ 2), *Y - Y* (ПР III. ПВ 3), *Y—Z* (ПР I, ПВ 6), *Z—X*(ПР II,ПВ 7); наземное поперечное профилирование по схемам *Z - Z* (ПР I, ПВ 4) и *Y - Y* (ПР II, ПВ 5); продольное

профилирование в горной выработке по схемам *Z -Z* и *У -Y* (ПР IV, ПВ 8 и ПВ 9); просвечивание между горной выработкой и поверхностью на продольных (сейсмоприемник *А,* ПВ10) и поперечных волнах (сейсмоприемник *Б,* ПВ11): просвечивание между скважинами на продольных (сейсмоприемник *В,* ПВ12) и поперечных волнах (сейсмоприемник Г, ПВ13); вертикальное сейсмическое профилирование с использованием трехкомпонентных установок *X, Y, Z* (ПВ14- ПВ16); 1- -пункты возбуждения колебаний с соответствующим направлением воздействия; 2 — профили сейсмических наблюдений с ориентированными сейсмоприемниками;

3 — одиночные сейсмоприемники; 4 — трехкомпонентные установки

5.4.4. Методика наземных наблюдений МОВ

Метод отраженных волн пока еще не нашел широкого применения в инженерной сейсморазведке, несмотря на определенные преимущества МОВ перед МПВ в отношении разрешающей способности, точности определения глубин, возможности прослеживать пласты с пониженной скоростью упругих волн. Основные трудности использования МОВ связаны с необходимостью перехода на более высокие частоты, чему препятствует их высокое поглощение в зоне малых скоростей (ЗМС), с трудностью подавления волн-помех вблизи пункта взрыва (ПВ).

Использование цифровых сейсмостанций с накоплением позволяет перейти к регистрации отраженных волн, приходящих с малых глубин. Для этого применяют многократное перекрытие (до 12), уменьшенный шаг $\Delta x = 2$ -5 м, выносные ПВ, невзрывные источники. Если отражение уверенно идентифицируется визуально, применяют профилирование на постоянной базе, что значительно упрощает методику работ.

5.5. СЕЙСМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД НА УЧАСТКЕ РАБОТ

Несмотря на существенные вариации значений скоростей упругих волн на площадках, где проводятся сейсмические исследования в п. В. Сысерть, можно привести некоторые обобщенные сведения об упругих параметрах по основным типам горных пород разреза. Они получены по данным УралТИСИЗ [3] или нашим исследованиям. Такие сведения по плотностям амфиболитов приводятся на рис. 5.13, а в таблице 5.2 показаны значения скоростей V_P, V_S и отношение V_S/V_P , плотности и модуля деформации E в горных породах в различном состоянии.

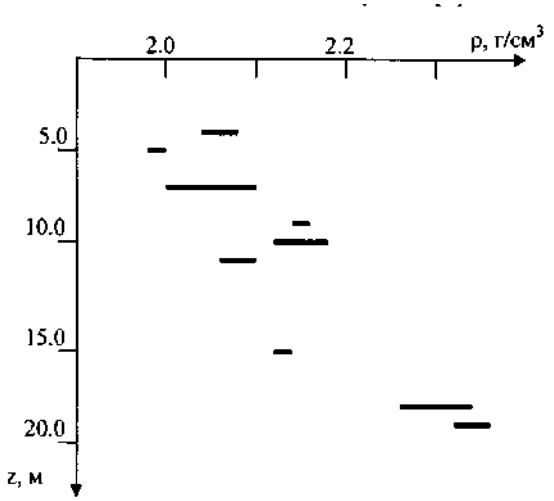


Рис. 5.12 Зависимость плотности от глубины для амфиболитов низкой и пониженной прочности (УралТИСИЗ, 1989)

Таблица 5.2

	Порода	Глубина. м	V_P , м/с	V_S ,м/с	ρ, г/см^3	E, МПа
Неводонасыщенное состояние	Почвенный слой	0-0.4	140-170	50-200		
	Насыпной грунт	0-2.0	200-280	-	-	
	Суглинок, dQ	0-3,5	200-250	100 - 120	1,85-1,86	10
	Песок,eMz	0-7	300-400	100-400	1,85-1,89	14
	Песок,eMz	7-11	400-600	170-230	1,89-1,94	15
	Супесь, eMz	0,4-8	290-410	180-210	1,87-1,93	
	Суглинок, eMz	1-3	320-380	140	1,88	10
	Щебенистый грунт, eMz	3,5-10	410-660	200-250	1,9-2,05	12-13
	Дресвяный грунт, eMz	2-11	560-780	200-300	1,95-2,02	14
	Песчаник, C_2-C_3	18-30	-	-	2,14-2,17	-
	Гранит-аплит низкой прочности, Pz_3	2-6 6-10 10-12	390-600 820-980 1200-1400	190-440 340-400 340-400	1,96-2,1 2,1-2,2 2,25-2,3	15-25 25
	Амфиболиты низкой прочности, Pt_2-Pz_1	4-6 7-11	900-1180 1300-1530	180-240 380-440	2,15-2,18 2,2-2,28	18 25
Элювиальные	Песок, aQ		1500-2000	150—300		
	Супесь, dQ		1450-2100	120—280		

	Суглинок, dQ		1500-1900	100—250		
	Амфиболиты низкой прочности, Pt_2-Pz_1	11-20	3400	580	2,37	25
	Серицит-хлоритовые сланцы	3,5-5	2800-2900	-	-	-
	Выветрелые амфоболитовые сланцы	5,5	2600-3600	-	-	-
	Графитовые сланцы	6-10	2600-2900	-	-	-
	Амфиболиты малопрочные	15-27			2,4-2,52	-
	Гнейсы прочные сильно трещиноватые	23-28			2,83-2,95	26-49

5.6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Задачей интерпретации сейсмических данных является построение геологического разреза, определение состава и физических характеристик изучаемых сред. Процесс интерпретации разделяется на два этапа: *предварительную обработку* и собственно *интерпретацию* или решение обратной задачи. В инженерной сейсморазведке МПВ в большинстве случаев обратную задачу решают на основе анализа и обработки годографов, т. е. графиков *t(x),* где *t* — время прихода волны; *x* — расстояние от источника колебаний до точки измерения. Методы решения обратной задачи основаны на результатах решения прямых задач, т. е. на анализе сейсмических годографов для моделей среды, используемых в инженерной сейсморазведке.

5.6.1. Предварительная обработка

На первом этапе на основании имеющейся априорной геолого-геофизической информации и просмотра полученных сейсмограмм интерпретатор проводит корреляцию (прослеживание) целевых волн, дающих необходимую информацию. Основные трудности при этом связаны с наличием случайных помех-микросейсм и регулярных волн-помех (звуковая, поверхностные, дифрагированные), которые мешают проведению корреляции. Особенности корреляции волн при изучении верхней части разреза (ВЧР) заключаются в следующем. Поскольку изменения расстояний от ПВ до точки измерения по сравнению с глубиной изучаемых границ весьма значительны, динамические особенности волн (период, амплитуда) изменяются заметно. Первые вступления волн можно выделить только вблизи ПВ. Как правило, корреляцию проводят по максимумам или минимумам колебаний (рис. 5.14). Оси синфазности, соответствующие различным фазам одной волны, обычно параллельны, и годографы фаз приводятся к годографам первых вступлений сдвигом на фазовую поправку.

. 4.14. Корреляция волн, приходящих в первых вступлениях на сейсмограмме МПВ

Признаком смены волн являются изменения кажущейся скорости *V** и динамических характеристик (амплитуд, частот, фаз). Следует иметь в виду, что аналогичные признаки могут наблюдаться и при осложнениях записи вследствие криволинейности преломляющей границы, наличия вертикальных контактов различных пород и т.д. Поэтому для выяснения причин кажущейся смены волн используют нагоняющий годограф, на котором смена волн должна наблюдаться примерно на таком же расстоянии от ПВ (т. е. на другом ПК профиля), а осложнение будет отмечаться на том же ПК (т. е. на другом расстоянии от ПВ). Наиболее четко смена волн устанавливается в тех случаях, когда наблюдается зона интерференции, за которой обе волны прослеживаются раздельно.

Для отождествления волн, прослеженных на разных сейсмограммах, сопоставляют записи, полученные во взаимных точках. В соответствии с принципом

взаимности для определенной волны времена прихода во взаимных точках должны быть равны. При идентичности условий возбуждения и приема принцип взаимности распространяется и на форму записи. Принцип взаимности не выполняется для несимметричных обменных отраженных и головных волн (PPS, SSP, PS и др.) в случае наклонной границы. Для определения природы волн сопоставляют нагоняемый и нагоняющий годографы. Для головных волн они параллельны, для отраженных волн — расходятся, для рефрагированных — сближаются.

По результатам корреляции волн строят графики годографов на базе наблюдений и монтажи сейсмограмм на профиле. Обычные масштабы построения годографов: по горизонтали – в 1 см шаг сейсмоприемников, по вертикали – в 1 см 10 или 5 мс. На рис 5.15 показаны примеры построения годографов волн, приходящих в первых вступлениях.

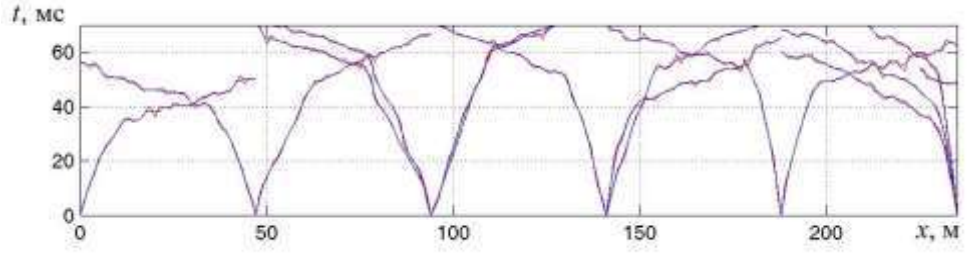


Рис. 5.14. Пример построения годографов первых волн. По горизонтали показаны положения сейсмоприемников, по вертикали - время прихода первых вступлений головных волн в мс.

5.6.2. Сейсмические модели реальных сред

Для правильного понимания полученного материала и выбора последующих шагов обработки данных интерпретатор должен иметь представление о форме годографов головных волн для некоторых простых типов сейсмических моделей геологической среды.

Одновременное воздействие геологических факторов обусловливает различный характер изменения скоростей в реальных средах. Наблюдается как постоянство скорости упругих волн (однородный слой), так и плавное изменение ее с глубиной, например, в сухой песчаной толще (вертикально-неоднородная среда). Что касается сейсмических границ, то можно говорить о двух их типах: границе *первого рода*, когда скорость изменяется скачком (например, контакт рыхлых и скальных пород), и границе *второго рода*, когда скачком изменяется вертикальный градиент скорости *dV/dz* (например, в зоне выветривания). Сочетание таких типов сред и границ позволяет моделировать реальные среды.

Простейшими моделями, используемыми при интерпретации данных инженерной сейсморазведки, являются следующие: однородный слой на однородном полупространстве и вертикально-неоднородная (градиентная) среда с монотонным увеличением скорости с глубиной.

Рассмотрим для этих моделей особенности наблюдаемой волновой картины и характер годографов волн, т. е. графиков зависимости времени прихода t от расстояния до источника *x.*

5.6.3. Однородный слой на полупространстве. Предположим, что слой мощностью h_1 со скоростью V_{P1} и плотностью ρ_1 лежит на полупространстве с параметрами V_{P2} и ρ_2. В этом случае при выполнении условия $V_{P1} < V_{P2}$ на границе раздела возникает **головная** волна. Если при этом также выполняется условие $V_{P1}\cdot\rho_1 \neq V_{P2}\cdot\rho_2$,то возникает и **отраженная** волна. При регистрации на дневной поверхности головной и отраженной волн можно получить информацию о глубине залегания границы и скоростях V_{P1} и V_{P2}, т. е. решить обратную задачу сейсморазведки. Наклон годографа головной волны определяется значением скорости V_{P2}. Тангенс угла наклона годографа равен:

$$\mathbf{tg\ \alpha = 1/V_{P2} = dt/dx.} \qquad \mathbf{(5.1.)}$$

Соотношение годографов прямой P_1 головной $P_1P_2P_1$ отраженной P_1P_1 и поверхностной R волн приведено на рис. 5.16. В начальной точке ($x_н$, $t_н$) годограф головной волны касается годографа отраженной. Годограф отраженной волны имеет гиперболическую форму и при увеличении координаты *x* приближается к годографу прямой волны, как к асимптоте. В точке излома (x_{12}, t_{12}) пересекаются годографы прямой и головной волн.

Все эти рассуждения справедливы для продольных волн. Если сейсмический источник возбуждает монотипные поперечные SH-волны с горизонтальной поляризацией смещений (система наблюдений Y— Y), то также будут наблюдаться поперечная прямая S_1 и поперечная отраженная и головная волны S_1S_1 и $S_1S_2S_1$. Вместо поверхностной волны Рэлея будет регистрироваться поверхностная волна Лява. Значение ее скорости лежит в пределах V_{S1} - V_{S2}.

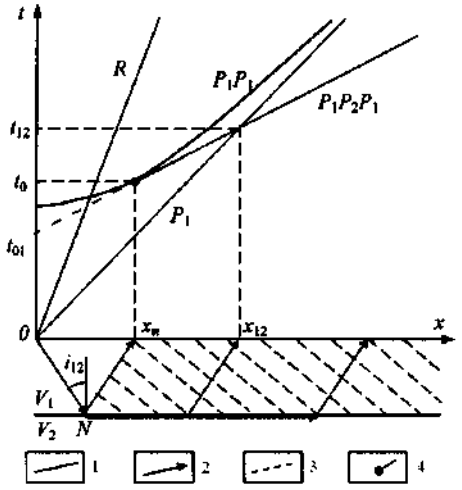


Рис. 5.15. Годографы головной $P_1P_2P_1$, отраженной P_1P_2, прямой P_1 и поверхностной R волн для двухслойной модели: 1 — годографы; 2 -лучи головной волны; 3 фронт головной волны; 4 —начальная точка

5.6.4. Вертикально-неоднородная градиентная среда. Сейсмические волны, распространяющиеся в градиентных средах,

относятся к классу **рефрагированных** (продольных или поперечных). Так как скорость изменяется непрерывно, то луч будет так же непрерывно преломляться. Поэтому для рефрагированных волн характерна криволинейная форма лучей (рис. 5.16).

Наибольшее практическое применение нашла вертикально-неоднородная модель среды, для которой скорость является функцией только глубины $V = V(z)$, а линии равных скоростей — *изотахи* — плоскими горизонтальными линиями. Градиент скорости при этом направлен по нормали к изотахам.

Для вертикально-неоднородной среды (см. рис. 5.16) встречные годографы идентичны, и достаточно рассматривать одиночный годограф. Луч сейсмической волны, выходящий под углом i_0 , из источника, расположенного на поверхности, возвращается к поверхности в точке x под таким же углом i_0 и имеет кажущуюся скорость $V^*(x) = V_0 / \sin i_0$, где V_0 — скорость у поверхности. Указанный луч симметричен относительно вертикали, проходящей через точку $x/2$. В точке с этой координатой луч достигает своей максимальной глубины z_m. Из законов геометрической сейсмики следует, что $V^*(x) = V(z_m)$. Радиус кривизны сейсмического луча обратно пропорционален градиенту скорости. При положительном градиенте скорости кривизна положительна, т. е. сейсмический луч обращен вогнутостью вверх. Наклон начальной части годографа определяется скоростью V_0. Практически важным является случай залегания градиентной среды под однородным слоем, когда в результате проникания в нижнюю среду возникают **преломленно-рефрагированные** волны. Вблизи начальной точки годографы головной и преломленно-рефрагированной волн совпадают. При увеличении расстояния от ПВ для преломленно-рефрагированных волн наблюдается закономерное уменьшение разности времен по нагоняющим годографам. Для преломленно-рефрагированных волн отмечаются также большая интенсивность и меньшее затухание с расстоянием, чем для головных волн. Эти признаки выражены тем больше, чем больше градиент в подстилающей среде.

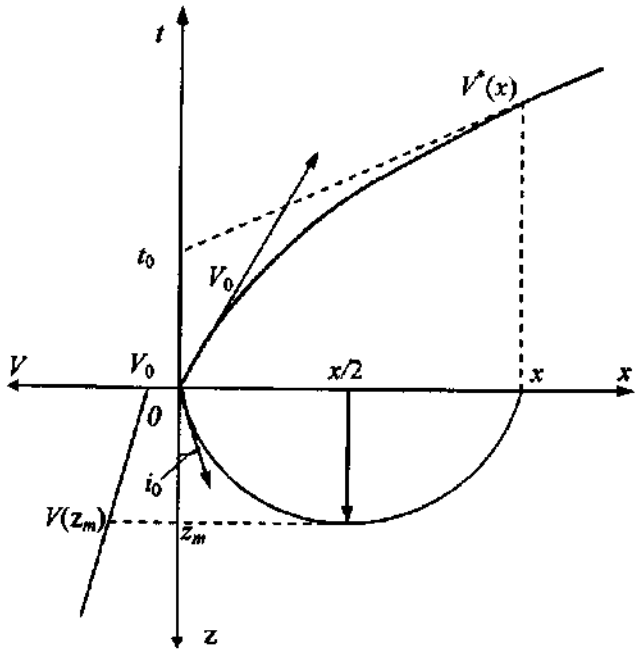


Рис. 5.16. Годограф и луч рефрагированной волны в вертикально-неоднородной среде

5.6.5. Обработка годографов для слоисто-однородных сред

В случае наличия в среде последовательности из n плоских горизонтальных границ (при условии $V_1<V_2<...<V_n$) на каждой границе возникает головная волна, которая будет регистрироваться на дневной поверхности (рис. 5.18). Уравнение годографа этой волны записывается в виде:

Для каждого слоя с номером k по наклону соответствующего элемента годографа головной волны может быть определена граничная скорость V_k по формуле (5.1). По точке пересечения годографов от вышележащего ($k-1$) и данного (k) слоя определяется точка излома $x_{k-1,\,k}$, а по точке пересечения продолжения данного элемента годографа с осью времени значение времени $t_{0,\,k-1}$.

По полученным данным возможно определение мощностей слоев в рамках модели слоисто-однородной среды. Для этих целей на практике применяют обычно два способа интерпретации: *способ пластовых скоростей* (" t_0 ") и способ точки пересечения или излома. В каждом из них в результате интерпретации годографов определяются мощности слоев и пластовые скорости Мощности слоев определяют последовательно сверху вниз.

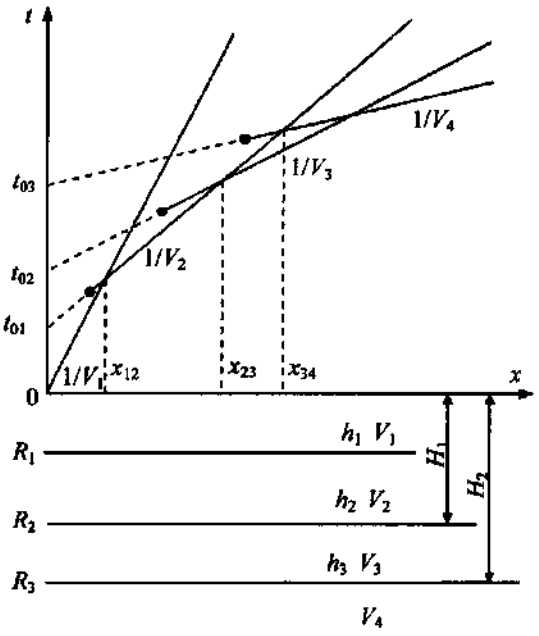


Рис. 5.17. Годографы головных волн для многослойной однородно-слоистой среды

Рассмотрим способ пластовых скоростей. Определив по наклону элементов годографов значения скоростей V_1, V_2, V_3, V_4, … , а на оси времени значения времен t_0(t_{01}, t_{02} и т.д.), будем последовательно вычислять мощности слоев по формулам:и т.д. В этих формулах каждый угол $i_{k,m}$ определяется из выражения:.

Указанный способ можно использовать для любого числа слоев.

5.6.6. Интерпретация годографов преломленных волн для одной криволинейной границы.

Предположим, что в верхней части разреза находится однородный слой, значение скорости упругих волн в котором равно V_1. Слой отделен криволинейной преломляющей границей от нижележащего однородного полупространства со скоростью $V_2 > V_1$. В этом случае имеется возможность определения рельефа этой преломляющей границы, а также и значения так называемой "граничной" скорости V_2 по двум встречным годографам головных волн. Предположим, что рельеф преломляющей границы плавный и на годографах отсутствуют петли. Поставленная задача решается *методом t_0 и разностного годографа.*

Рассмотрим этот метод подробнее. Если имеются два встречных увязанных годографа головных волн, то значение времени t_0, позволяющее определить глубину до преломляющей границы, можно получить в любой точке профиля, используя условие, которое вытекает из гипотез параллельности однонаправленных годографов головных волн и приблизительно прямолинейного скольжения головной волны вдоль границы. Возьмем произвольную точку D профиля, находящуюся между двумя пунктами возбуждения сейсмических волн O_1 и O_2 (рис. 5.19). Если бы годограф в прямом направлении (от O_1 к O_2) был бы получен из точки D, то он был бы параллелен данному исходному годографу $t_1(x)$, а в точке O_2 имел координату $t_2(D)$, так как это взаимные точки. Следовательно, значение $t_0(D)$ можно получить, вычитая из $t_1(D)$ величину параллельного переноса, равную $T - t_2(D)$. Отсюда следует, что $t_0(D) = t_1(D) - [T - t_2(D)]$.

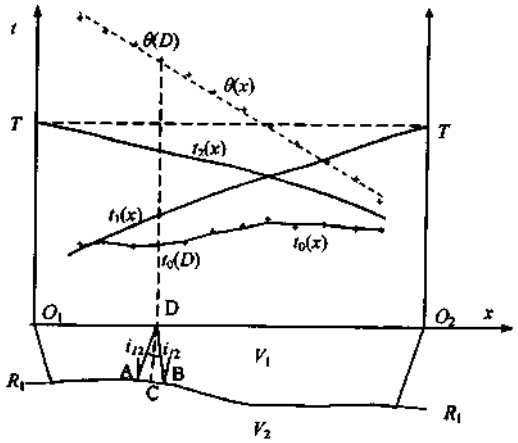


Рис. 5.18. Лучи и годографы головной волны в среде с криволинейной преломляющей границей. R_1 -криволинейная преломляющая граница, t_1,t_2-сводные встречные годографы головной волны в интервале O_1O_2,: 1- линия $t_0(x)$, 2- разностный годограф $\theta(.x)$

Аналогично можно получить значение $t_0(x)$ в любой точке с координатой x на участке O_1O_2:

$$t_0(x) = t_1(x) - [T - t_2(x)]. \qquad (5.4)$$

Каков физический смысл t_0 в случае неплоской границы? Как следует из приведенных формул и из рис.5.19, время t_0 - это разность времен пробега:

$$t_0(D) = [t(AD)+t(BD)]-t(AB). \qquad (5.5)$$

Это определение верно также и для градиентной покрывающей среды, когда лучи *AD* и *BD* криволинейны.

При некоторых предположениях можно использовать t_0 для определения глубины залегания криволинейной границы. Если на участке *AB* границу можно считать плоской и V_1 и V_2 постоянны, то

$$t_0(D) \approx 2\cdot h_D\cdot\cos i_{12}/V_1 . \qquad (5.6)$$

Интервал *AB* равен двойному сносу сейсмического луча ($AB = 2\cdot h\cdot \mathrm{tg} i_{12}$). При соотношении скоростей, характерных для верхней части разреза (ВЧР), - $AB \le h$. Следовательно, для криволинейных границ с большим радиусом кривизны можно использовать линию $t_0(x)$ для приближенного построения глубинного разреза, определяя h (глубину по нормали) по обычной формуле (5.6). Линию t_0 можно считать изображением границы во временной области. Совокупность линий t_0 для разных преломляющих границ дает временной разрез по преломленным волнам подобно временным разрезам МОВ, представленным линиями $t_0(ОВ) = 2h_i/V_i$. Однако есть существенное различие по сравнению с МОВ: значения $t_0(x)$ зависят от отношения V_1/V_2.

Способ разностного годографа используют в сочетании с методом t_0 для более надежного определения значения граничной скорости V_2 . Разностный годограф $\theta(x)$ может быть получен на участке, где имеются встречные годографы, по формуле:

$$\theta(x) = t_1(x)-t_2(x). \qquad (5.7)$$

Наклон какого-либо элемента разностного годографа с учетом различного направления встречных годографов оказывается связан со значением скорости V_2:

$$d\theta/dx = \sin(i \pm\varphi)/V_t + \sin(i \ominus \varphi)/V_1 = 2\cos\varphi/V_2. \qquad (5.8)$$

Для малых углов наклона φ преломляющей границы, можно приблизительно считать $\cos\varphi = 1$. Тогда из формулы (5.8) следует, что граничная скорость V_2 равна

$$V_2 = 2dx/d\theta. \qquad (5.9)$$

Принятое допущение позволяет определить значение граничной скорости с погрешностью не более 6 %, для границ с углами φ, не превышающими 20 °.

Достоинства метода t_0 заключаются в его простоте, возможности вычисления граничной скорости без построения разреза, даже когда скорость V_1 не известна. При построении разностного годографа локальные отклонения встречных годографов, связанные с поверхностными неоднородностями и условиями установки

сейсмоприемников, взаимно вычитаются, поэтому разброс точек на разностном годографе меньше, чем на наблюденном.

5.6.7. Интерпретация годографов для неоднородно-слоистых сред.

Наиболее общим способом интерпретации годографов рефрагированных волн является способ Вихерта — Чибисова, справедливый для произвольного монотонного увеличения скорости с глубиной. гласно этому способу для любой точки годографа, имеющей координату x, вычисляют численным дифференцированием годографа $t(x)$ кажущуюся скорость $V^*(x)$, которая затем относится к максимальной глубине проникновения соответствующего луча z_m (см. рис. 5.17):

Таким образом, для определения глубины проникновения луча, соответствующего данному бесконечно малому элементу годографа, используют только величины, определяемые положением этого элемента (x и $V^* = dx/dt$) в плоскости годографа. Любая точка годографа рефрагированной волны при этом рассматривается и как точка пересечения двух близлежащих элементов, и как начальная точка следующего элемента. Интерпретация годографов рефрагированных волн значительно упрощается, если закон изменения скорости с глубиной может быть выражен простой аналитической функцией (линейной, параболической и др.).

Для расчета глубины отнесения скорости z_m при этом предположении можно использовать способ О. К. Кондратьева, основанный на применении метода t_0. Алгоритм этого способа можно изложить следующим образом. Для каждой точки x годографа рефрагированных волн определяются две скорости – кажущаяся $V^*(x)$ и средняя - $Vcp(x)$. По их значениям вычисляется глубина максимального проникновения z_m луча, пришедшего в данную точку с координатой x. Основные формулы этого способа следующие:

$$\boldsymbol{V^*(x) = \Delta x / \Delta t}, \quad \boldsymbol{Vcp(x) = x / t(x)}, \quad . \qquad \textbf{(5.11)}$$

Среднюю скорость иногда вычисляют по более надежной формуле [2]:

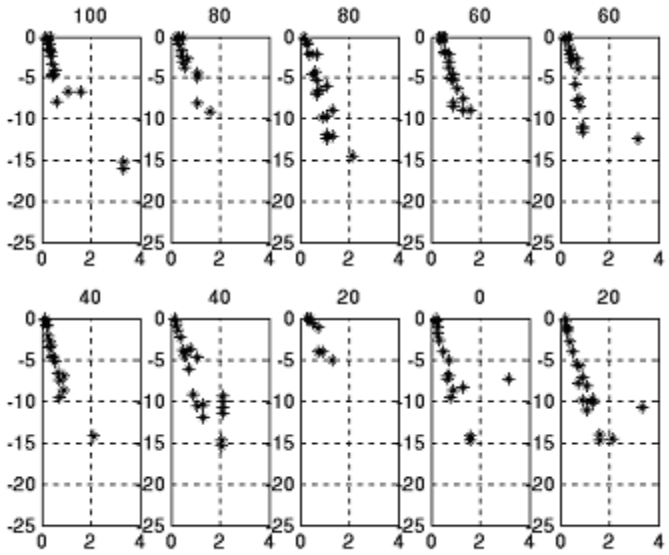


Рис. 5. 19. Скоростные разрезы, построенные по способу Кондратьева. По вертикали показана глубина в м, по горизонтали скорость продольных волн в км/с

Результаты обработки годографов первых волн с помощью описанных выше способов позволяют определить так называемые скоростные разрезы в отдельных точках профиля. Обычно полученные значения скоростей в разрезе относят к положению пункта возбуждения волн на профиле, или точке, соответствующей глубине максимального проникновения луча рефрагированной волны, т.е. к точке с горизонтальной координатой *x*/2, находящейся межу источником и приемником. Примеры изображения скоростных разрезов приводятся на рис.5.20. По нескольким разрезам на профиле строятся вертикальные карты скоростей (рис.5.21).

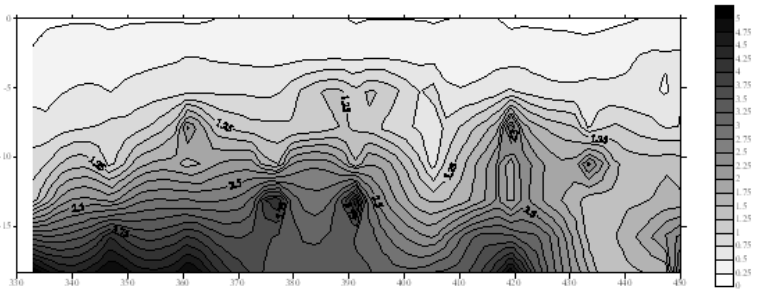


Рис. 5.20. Вертикальная карта скоростей по одному из сейсмических профилей. По вертикали показана глубина в м, по горизонтали координата на профиле в м, изолиниями показаны значения скорости продольных волн в км/с

5.7. НАПИСАНИЕ ОТЧЕТА

На основании полученных скоростных разрезов и карт выполняется геологическая интерпретация данных сейсморазведки, при этом используются как сведения по скважинам, так и дополнительная информация, полученная с использованием различных типов волн (продольных, поперечных, поверхностных).

При решении задачи определения состояния горных пород в разрезе по значениям скоростей двух типов волн - продольных и поперечных или продольных и релеевских - с помощью эмпирических формул, приводимых в [4], могут быть также выполнены вычисления важнейших физико-механических параметров горных пород – модулей деформации, удельного сцепления, пористости, влажности, угла естественного откоса и т.п. После этого также строятся вертикальные или горизонтальные карты этих характеристик.

По результатам всех выполненных в процессе практики по сейсморазведке работ каждый студент составляет отчет, перечень разделов которого приведен ниже:

Введение

1. Условия производства работ

2. Краткая геолого-геофизическая характеристика участков работ

3. Характеристики применяемой аппаратуры и оборудования для выполнения сейсмических работ

5. Методика и технология проведения полевых исследований

5. Методика обработки и интерпретации результатов

6. Основные геолого-геофизические результаты исследований

Заключение

Во *введении* описывается поставленная перед учебной группой геологическая задача, называются сроки практики и виды работ, выполненных автором отчета.

В разделе 1. *Условия производства работ* описывается положение участка исследований, погодные условия, залесенность, особенности рельефа местности, условия для транспортировки аппаратуры и оборудования (рис. 5.21), приводится перечень основных благоприятных и неблагоприятных факторов при проведении работ.

Рис. 5.21. Участок работ, условия производства работ описываются в разделе 1 отчета

В разделе 2. *Краткая геолого-геофизическая характеристика участков работ* приводятся сведения по геологическому строению участка исследований, дается характеристика основных результатов, полученных при ранее выполненных геофизических работах.

Рис. 5.23. В главе 4 описывает способ возбуждения сейсмически волн,

взаимное расположение источников и приемников

В разделе 3. *Характеристики применяемой аппаратуры и оборудования для выполнения сейсмических работ* приводится конкретной описание применяемых в ходе работ аппаратуры и оборудования, указываются основные их параметры, рассказывается о принципах работы основных блоков и модулей сейсморазведочной станции (рис.5.23).

В разделе 4. *Методика и технология проведения полевых исследований* описываются методика полевых работ, схемы и системы наблюдений, методические приемы борьбы с помехами, основные проверки и тесты различных видов оборудования (рис.5.24).

В разделе 5. *Методика обработки и интерпретации результатов* рассказывается о последовательности выполнения процедур обработки и интерпретации полученных полевых данных, приводятся сведения об алгоритмах основных процедур.

В разделе 6. *Основные геолого-геофизические результаты исследований* описываются и анализируются полученные геофизические и геологические результаты. Проводится их сопоставление с другими данными по этому же участку исследований.

В *заключении* делаются выводы о полноте решения поставленной геологической задачи и на этой основе оценивается выбранная методика исследований.

К отчету прилагаются следующие графические приложения:

- схема расположения сейсмических профилей на карте местности с привязкой к имеющимся инженерно-геологическим скважинам;

- применяемая система наблюдений (на обобщенной плоскости или плоскости годографа);

- годографы волн первых вступлений по сейсмическим профилям вместе с результатами обработки по методу "t_0";

- скоростные разрезы для каждого пункта возбуждения;

-построенные на основании скоростных разрезов, вертикальные карты скоростей по каждому сейсмическому профилю и результаты геологической интерпретации этих карт;

- карты значений сейсмических параметров на глубинах 2, 5 и 10 м (при наличии достаточно плотной сети сейсмических профилей по площади исследований).

Библиографический список

1. Бондарев В.И. Основы сейсморазведки. – Екатеринбург, Изд-во УГГГА, 2000, -252 с.

2. Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Ященко З.Г. Инженерная геофизика. - М.:Недра,1989.-252 с.

3. Отчет об инженерно-геологических и геофизических изысканиях для учебного полигона СГИ в пос. В.Сысерть Свердловской области. – Свердловск, УралТИСИЗ,1989.- 56 с.

4. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов.- Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997.- 220 с.

Глава 6

Электроразведки
А. А. Редозубов

Как мины

По точкам,

Сгущается сетка

И бьет по глубинам

Электроразведка

Ю. Канторович,
выпускник СГИ 1960 г.

6.1. Задачи практики

Полигон учебной практики по электроразведки располагается к северу от западной окраины поселка В. Сысерти. На севере он протягивается до ог. Месилов ключ, с запада и востока ограничен линией электропередач и дорогой на поселок Асбест. В меридиональном направлении по полигону проходит разлом, разделяющий контрастные по удельному сопротивлению и поляризуемости графит содержащие породы игишской свиты и гнейсовидные образования саитовской свиты. Породы игишской свиты прорезаны крупной, до 200-300 м мощностью, дайкой гранитов. В южной части, непосредственно через базу УГГГА, проходит субширотный Верх-Сысертский разлом, являющийся водоносным.

Таким образом, на полигоне имеются благоприятные предпосылки для применения методов сопротивлений и вызванной поляризации, а также метода естественного поля, так как графитизированные породы являются источником электрических полей большой интенсивности. Эти породы обладают также значительной анизотропией, как по удельному сопротивлению, так и по поляризуемости.

Задачей практики является приобретение студентами практических навыков проведения полевых работ электроразведочными методами, умение выполнять измерения с простейшей аппаратурой в реальных условиях. В процессе камеральных работ они должны выполнить обработку результатов измерений, оценить их качество, представить полученные материалы в графической форме в виде графиков и карт и выполнить их интерпретацию. В итоге студенты на собственном опыте знакомятся с возможностями различных электроразведочных методов в конкретной геологической обстановке, а также с элементами комплексирования различных модификаций электроразведки.

В настоящие время в процессе проведения практике выполняются наблюдения методами вертикального электрического зондирования, дополнительного профилирования, вызванной поляризации и естественного поля. Набор методов выбран,

исходя из имеющихся физико-геологических предпосылок и наличной аппаратуры, а также бюджета времени. В прежние годы выполнялись также работы методами комбинированного профилирования, заряда и картирования анизотропных образований крестообразной обстановкой (со студентами рудной специализации, у которых на практику по электроразведке отводилось больше времени).

Метод естественного поля

В методе естественного поля изучаются постоянные электрические поля, самопроизвольно возникающие в земной коре. Основные причины возникновения таких полей – диффузионно-адсорбционные процессы, фильтрация через горные породы подземных вод и процессы окислительно - восстановительного характера. В полевой электрозведке наибольшее значение имеют поля, вызванные двумя последними причинами.

Для образования поля окислительно-восстановительного происхождения необходимо наличие объекта, обладающего достаточно высокой электронной проводимостью. Такие тела образуют многие рудные минералы, графит, антрацит. Верхняя граница объекта должна располагаться в зоне окисления. На границе объекта насыщающими вмещающие породы поровыми водами, являющимися электролитом, образуется двойной электрический слой. В верхней части разреза среда насыщена кислородом и имеет окислительный характер. Поэтому внешняя обкладка двойного слоя, т. е. окружающие объект породы, имеют отрицательный знак. Сам же объект, в котором располагается внутренняя обкладка двойного слоя, приобретает положительный заряд (см. рис. 6.1.).

В области нижней части объекта, напротив, наблюдается недостаток кислорода, и среда имеет восстановительный характер. Это приводит к образованию отрицательных зарядов на внутренней поверхности объекта и положительных – в прилегающих вмещающих породах. В результате образуется система, представляющая собой природный гальванический элемент, в котором проводящий объект играет роль внешней цепи. Возникающие под действием разности потенциалов токи между верхней и нижней частями объекта поддерживают систему в равновесном состояние и создают в окружающей среде электрическое поле. При измерении потенциала на поверхности земли над таким объектом наблюдается минимум потенциала (6.1.).
На полигоне практики, как уже указывалось, источником естественного электрического поля является графитизированные породы игишской свиты.

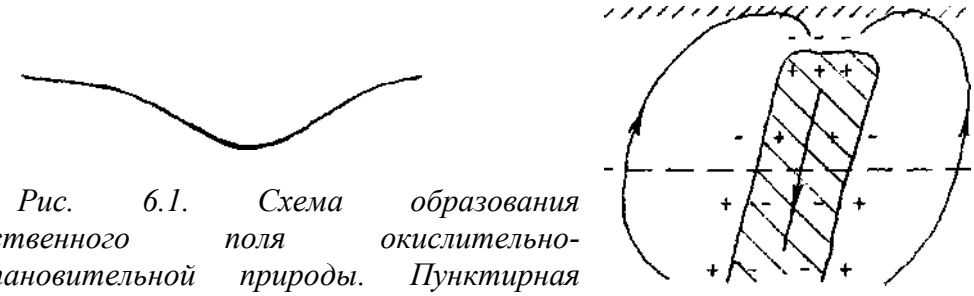


Рис. 6.1. Схема образования естественного поля окислительно-восстановительной природы. Пунктирная линия – уровень грунтовых вод; стрелки – токовые линии.

Электрические поля фильтрационной природы возникают при просачивании подземных вод через поры горных пород. На границе непроводящих твердых зерен породы и поровой жидкости всегда существует двойной электрический слой. Часть ионов двойного слоя захватывается фильтрующейся жидкостью и увлекается потоком. Поэтому по направлению движения потока происходит накопление ионов, имеющих знак внешней обкладки двойного слоя. Так как внешняя обкладка обычно образуется положительными ионами, по направлению потока наблюдается повышение потенциала. Фильтрационные поля используются при решении различных гидрогеологических - и инженерно - геологических задач (прослеживание мест утечек воды через плотины и т. п.).

В В. Сысерти естественные поля фильтрационной природы наблюдаются в пойме реки ниже платины. Там наблюдается сложная картина распределения потенциала, отражающая наличие участков выхода грунтовых вод на поверхность и просачивания их в землю. При проведении измерений вдоль плотины со стороны пруда наблюдались слабые локальные отрицательные аномалии, не остающиеся постоянными в разные годы. По-видимому, они фиксируют участки слабого просачивания воды из пруда в верхнюю часть тела плотины.

Так как при измерениях естественного поля нельзя воспользоваться компенсатором поляризации, для измерений применяются неполяризующиеся электроды, обладающие малой собственной разностью потенциалов (э. д. с. поляризации). Неполяризующиеся электрод представляет собой керамический сосуд, заполненный раствором медного купороса. В него помещен медный стержень, к которому подключается провод (рис. 6.2.). Контакт с почвой осуществляется через медленно фильтрующийся сквозь сосуд электролит. Метал, помещенный в раствор собственной соли, обладает характерным для него электродным потенциалом, мало меняющимся под действием внешних факторов. Поэтому разность потенциалов между двумя такими электродами не велика и стабильна во времени.

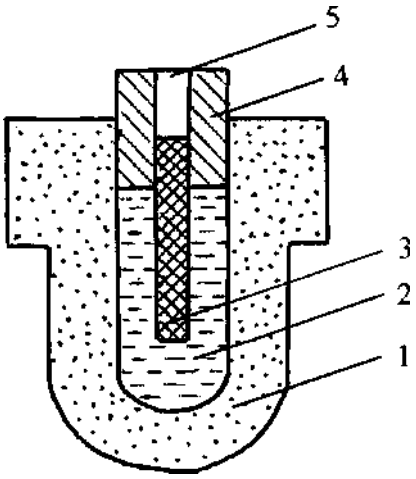


Рис.6.2. Неполяризующийся электрод.1- керамический корпус; 2- раствор медного купороса; 3- медный стержень; 4- пробка; 5- гнездо (трубка) для подключения провода.

Собственная э.д.с. электродов не должна превышать 1-2 мВ. Для измерения собственной э.д.с. электроды устанавливают рядом в рыхлую землю и подключают к измерительному прибору. Так как при малом расстоянии между заземлениями разность потенциалов естественного поля пренебрежимо мала, всю измеренную ΔU можно считать собственной э.д.с. электродов.

Для измерений можно использовать любой электроразведочный прибор постоянного тока, например, автокомпенсатор АЭ-72 или аппаратуру ЭРА-П. Обычно наблюдения производятся по способу измерения потенциала. Для этого один из электродов остается неподвижным, его потенциал принимается за условный нуль. Другой электрод перемещается по точкам профиля и измеряется его потенциал относительно неподвижного электрода. Так как знак потенциала естественного поля может изменяться, необходимо строго соблюдать полярность подключения электродов к прибору. Неподвижный электрод всегда подключается к клемме *N*, подвижный – к клемме *M*. В этом случае знак измеряемого потенциала соответствует положению переключателя полярности прибора.

При работе неподвижный электрод *N* устанавливается около исходного пикета (не на пикете). Рядом с ним устанавливается измерительный прибор. Подвижный электрод *M* устанавливается на исходном пикете и измеряется его потенциал. Затем электрод *M* переносится на следующий пикет и снова измеряется его потенциал и т.д. Чтобы обеспечить связь подвижного электрода с прибором он подключается к прибору через длинный провод, намотанный на катушку. При перемещении электрода провод сматывается с катушки (рис.6.3.). Так как неполяризующиеся электроды имеют относительно высокое собственное сопротивление, необходимо постоянно следить за качеством заземлений. При установке электрода выкапывается небольшая лунка, дно которой разрыхляется. В эту разрыхленную землю вдавливается электрод. Если земля сухая, лунки готовят заблаговременно и заливают водой.

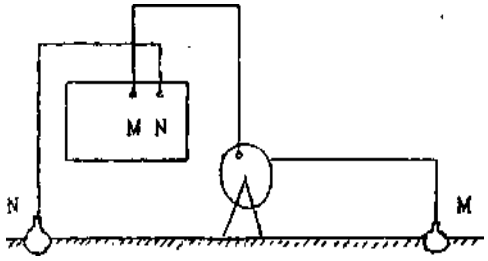


Рис.6.3 Схема установки для метода естественного поля.

Чтобы выполнить наблюдения при одном положении электрода *N* на возможно большем участке профиля, электрод устанавливают так, чтобы можно было

выполнить измерения в обе стороны от него на длину провода. Если при этом не удается отработать весь профиль, неподвижный электрод переносят в новую точку (N_1), но так, чтобы с ним можно было повторить 3 - 5 точек, на которых были выполнены измерения при первом положении электрода (N_1), как показано на рис.6.4. В точках перекрытия вычисляют разницу между значениями потенциала при разных положениях электрода и находят среднюю величину этой разницы. На эту величину изменяют значения потенциала, измеренные при одном из положений электрода *N*, так чтобы получился единый график (см. рис.6.4.)

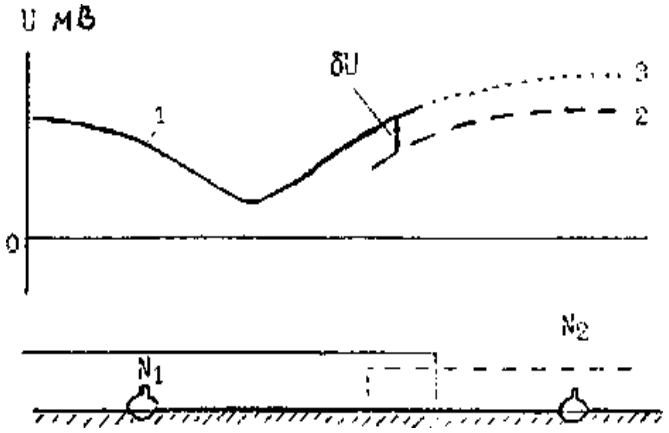


Рис.6.4. Приведение результатов наблюдений к общему нулю

1 - график потенциала, измеренного с электродом N_1; 2 - то же, с электродом N_2; 3 -график потенциала, измеренного с электродом N_2, приведенный к нулю электрода N_1.

Аналогично выполняется приведение к общему нулю измерений потенциала на разных профилях. Для этого выполняется увязка, т.е. измеряется потенциал на разных профилях, обычно по пикетам, стоящим на магистрали, при расположении неподвижного электрода на одном из профилей. Увязочные измерения производятся не менее двух раз.

Для контроля за качеством измерений при смотке провода выполняются повторные наблюдения. Среднее расхождение между первичными и повторными измерениями не должно превышать 5 мВ. На отдельных точках допускается разница до 15 мВ. Так же оценивается точность по контрольным наблюдениям, которые выполняются другим оператором, в другое время и желательно с другим комплектом аппаратуры.

Результаты работ представляются в виде графиков потенциала, приведенных к общему нулю для всего участка, и в виде плана изолиний потенциала. Нулевой уровень при этом выбирается с учетом общей

картины поля и геоэлектрической обстановки.

На рис. 6.5. показаны графики потенциала естественного поля по трем профилям, проведенные к общему нулю. При выборе нуля учитывалась геологическая обстановка. В восточной части участка залегают гнейсовидные породы саитовской свиты, не содержащие проводящих минералов. Поэтому возникновение над ними естественных электрических полей мало вероятно. На западе, напротив, установлены графитизированные породы, которые могут создавать интенсивные электрические поля. Из этих соображений нулевой уровень выбран таким образом, чтобы в восточной части

всех профилей значение потенциала естественного поля были близки к нулю. Над западной частью участка, сложенного графитизированными породами, в этом случае наблюдается отрицательная аномалия интенсивностью в несколько сот милливольт. На всех профилях на интервале от 20-28 пикетов наблюдается резкое возрастание потенциала естественного поля. Средняя часть этого участка с большим градиентом $U_{ЕП}$ в пределах аномалии связаны, по-видимому, с разной степенью графитизации пород.

Задание

1. Получить комплект аппаратуры и оборудования и проверить его исправность.
2. Выполнить наблюдения по методу естественного поля по способу измерения потенциала на указанных преподавателем профилях (ориентировочная дневная норма два профиля), выполняя при обратном ходе повторные измерения в количестве 20% от общего объема.
3. Оценить по повторным измерениям, а если выполнялись контрольные наблюдения - и по контрольным измерениям, погрешность и сопоставить ее с требованиями Инструкции по электроразведке
4. Проверить исправность аппаратуры и оборудования и сдать их в лабораторию. При обнаружении неисправностей выполнить необходимый ремонт.
5. Построить графики и план изолиний потенциала естественного поля, выполнить их интерпретацию.
6. .Составить текстовую часть отчета.

Дипольное электрическое профилирование (ДЭП)

В дипольном профилировании используется осевая дипольная установка. В дипольной установке поле создается сближенными заземлениями *A* и *B*, образующими питающий диполь, а разность потенциалов измеряется между электродами *M* и *N*, образующими приемный (измерительный) диполь. Размеры диполей l должны быть в несколько раз меньше расстояния между центрами диполей *L*, которое принимается за размер установки. В осевой установке оси диполей расположены на одной прямой линии, при профилировании совпадающей с профилем наблюдений (рис.6.6). Размеры диполей делают одинаковыми, как показано на рисунке, или питающий диполь делают больших размеров для увеличения измеряемой разности потенциалов. Применяется дипольное профилирование, как и другие модификации электропрофилирования, для решения задач геологического картирования и для поисков различных объектов, преимущественно крутопадающих.

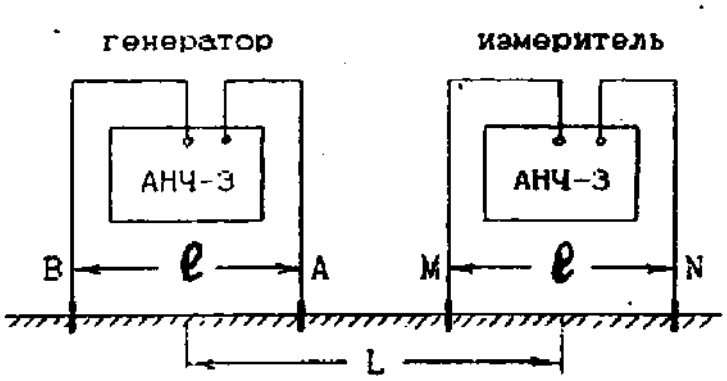


Рис.6.6. Установка для дипольного профилирования.

Измерения в дипольном профилировании удобнее выполнять на низкочастотном переменном токе, например, с аппаратурой АНЧ – 3 или ЭРА-ЗНАК. В этом случае нет необходимости в проводах, связывающих измеритель с питающей линией, и установка получается легкой и мобильной (см. рис. 6.6) На каждой точке измеряют

разность потенциалов между электродами *M* и *N* и силу тока в цепи AB (если он не стабилизирован) и вычисляют кажущееся сопротивление. Результат измерения относят к центру измерительного диполя *MN*.

При вычислении $p_к$ можно пользоваться общим выражением для коэффициента установки или привести его к более удобному виду:

$$K = \frac{2\pi}{1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN} = \frac{2\pi}{1/(L-l) - 1/L + 1/(L+l)} = \frac{2\pi}{2L/(L^2 - l^2) - 2/L} =$$

$$= \frac{\pi L(L^2 - l^2)}{l^2}. \quad \textbf{(6.1.)}$$

Окончательное выражение в формуле (6.1.) справедливо только для дипольной установки с одинаковыми размерами питающего и измерительного диполей.

Результаты электропрофилирования изображают в виде графиков p_k по профилям. Рассмотрим график p_k по профилю, пересекающему контакт горных пород с удельными сопротивлениями p_1 и p_2, воспользовавшись для этого формулой

$$p_k = p_{MN} \frac{j_{MN}}{j_{0MN}}, \qquad \textbf{(6.2.)}$$

где p_{MN} - удельное сопротивление среды между приемными электродами;

j_{MN} - плотность тока между приемными электродами;

j_{0MN} - плотность тока между приемными электродами в однородной среде.

Пусть сопротивление горных пород справа от контакта меньше, чем сопротивление p_1 слева от границы раздела. Осевая дипольная установка *BAMN* перемешается по профилю слева направо. Пока установка располагается далеко от контакта в среде p_1, растекание тока с питающих заземлений не отличается от случая однородного полупространства, т.е. $j_{MN} = j_{0MN}$,и согласно (6.2.) Рк = P_1. По мере приближения установки к контакту ток натекает в более проводящую среду p_2 и плотность тока на участке расположения приемных электродов MN увеличивается ($j_{MN} \rangle j_{0MN}$). Поэтому рк становится больше p_1, постепенно увеличиваясь по мере приближения к контакту (рис.6.7). Максимального значения Рк достигает, когда электрод *N* становится на контакт (точка а). При переходе приемного диполя черев контакт сопротивление рмN уменьшается от p_1 до p_2 и кажущееся сопротивление на участке аб резко уменьшается. Пока контакт располагается между питающим и приемным диполями, разность потенциалов не зависит от положения границы раздела и на графике наблюдается площадка равных значений Рк (участок бв). На площадке равных сопротивлений $p_k = p_1(1 + k_{12})$, где K_{12}- коэффициент отражения, равный $\frac{p_2 - p_1}{p_1 + p_2}$. При

переходе через контакт питающего диполя кажущееся сопротивление уменьшается до величины, несколько меньшей P_2 (точка г), а затем по мере удаления установки от контакта постепенно приближается к P_2. Таким образом, в рассмотренном случав контакт отмечается участком резкого уменьшения $p_к$.

Если удельное сопротивление p_2 горных пород справа от контакта более высокое, чем слева, при приближении установки к контакту $p_к$ уменьшается, так как плохо проводящие породы препятствуют растеканию тока и плотность тока на участке *MN* уменьшается (см. рис. 6.7, б). При переходе через контакт приемного диполя $p_к$ возрастает до уровня площадки равных сопротивлений (участок аб), который существенно ниже p_2. Лишь после площадки равных значений $p_к$, когда через контакт переходит питающий диполь, наблюдается резкое повышение рк до уровня, несколько превышающего p_2 (участок вг), после чего график плавно приближается к уровню p_2.

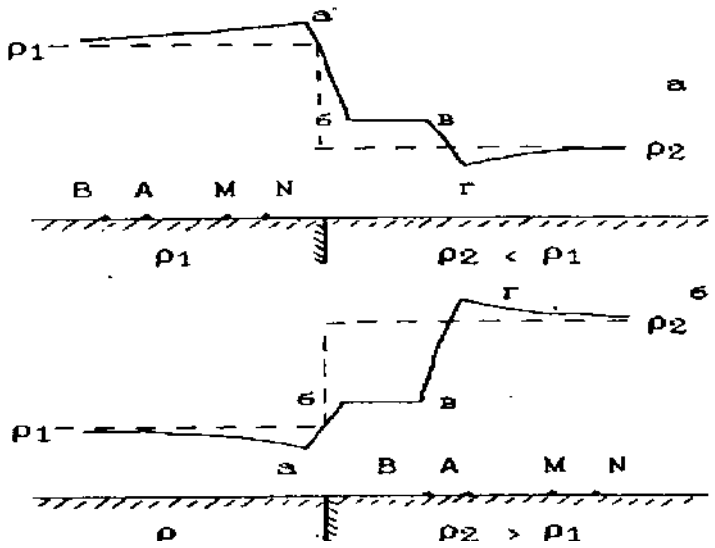


Рис.6.7. Вид графиков $p_к$ *при профилировании через контакт дипольной установкой.*

Таким образом, в зависимости от соотношения удельных сопротивлений контакт в дипольной установке проявляется по-разному. Когда установка ориентирована таким образом, что со стороны пород с высоким сопротивлением располагается питающий диполь (см. рис.7а), контакт четко отмечается резким изменением $p_к$ и легко может быть выделен. Если со стороны пород с высоким сопротивлением располагается приемный диполь (см. рис.6.7,б) изменение $p_к$ над контактом незначительно, зато появляется резкий скачок $p_к$ над породами с высоким сопротивлением на расстоянии размера установки от контакта. Это обстоятельство затрудняет интерпретацию, особенно в случае более сложных геоэлектрических разрезов. Например, на рис.6.8 изображен вид графиков $p_к$ над мощным пластом высокого сопротивления. Как видно из рисунка, при интерпретации графика $p_к$ для любой из дипольных установок будет уверенно выделен один из контактов, а другой контакт будет выделен в средней части пласта и мощность пласта окажется заниженной более чем вдвое. Поэтому для более уверенной интерпретации целесообразно применять одновременно обе дипольные установки (такие установки называются встречными). По графикам рк встречных дипольных установок в рассматриваемом примере уверенно

выделяется положение обоих контактов пласта. Над срединой пласта наблюдается пересечение графиков $\rho_к$, при котором график $\rho_к$; пересекает другой график снизу вверх (такое пересечение называется «обратным", оно характерно для плохо проводящих пластов). Для хорошо проводящих пластов характерно "прямое" пересечение, при котором график $\rho_к^{BAMN}$ пересекает другой график сверху вниз при одновременном понижении $\rho_к$

Если размеры питающего и приемного диполей одинаковы, в проведении измерений с установкой, повернутой на 180°, нет необходимости. Для электрического поля справедлива теорема взаимности, согласно которой, если поменять назначение питающих и приемных заземлений, т.е. если электроды *А к В* сделать приемными, а *М* и *N* -питающими, то результат измерений не изменится. Поэтому если сместить один из графиков $\rho_к$ в сторону питающего диполя на размер установки, то он точно совпадет с графиком $\rho_к$ для другой дипольной установки (см. рис.6.8.). Практически достаточно выполнить измерения с одной дипольной установкой, например, с *BAMN* и построить два графика $\rho_к$, относя результаты измерений к центру приемного диполя (график $\rho_к^{BAMM}$) и к центру питающего диполя (график ρ_k^{MNBA}).

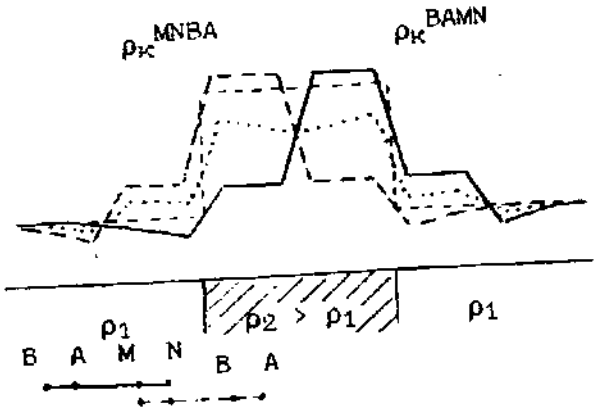


Рис.6.8. Графики Рк дипольного профилирования над мощным пластом высокого сопротивления (точечный пунктир - график среднего значения Рк для встречных дипольных установок)

График среднего арифметического значения $\rho_к$ встречных дипольных установок почти не отличается от графика $\rho_к$ симметричной четырехэлектродной установки AMNB. На нем плохо проводящий пласт отмечается повышенными значениями $\rho_к$, а над контактами наблюдается резкое изменение значений кажущегося сопротивления (см. рис.6.8.). При проведении площадной съемки методом дипольного профилирования целесообразно вычислять средне значение и строить план его изолиний (план изоом). На плане изоом наглядно отображаются общие черты геоэлектрического строения изучаемой площади.

На рис. 6.9. приведен пример графиков р встречных дипольных установок. На профилях 3-5 III-V повышением кажущегося сопротивления отчетливо отмечается дайка гранитов, имеющая высокое сопротивление по сравнению с вмещающими ее графитизированными породами. На графике lk установки MNBA резким ростом

кажущегося сопротивления отмечается западный контакт дайки. Восточный контакт дайки отмечается резким уменьшением lk установки BAMN. В целом графики аналогичны приведенным на рис 6.8. При этом западный контакт, выделяемый по данным электропрофилирования, точно совпадает с западным контактом дайки, показанным на геологической карте. Восточный же контакт дайки совпадает с данными электропрофилирования только на профиле III. На профилях IV и V контакт по сопротивлению располагается восточнее, а на профиле VI дайка не отмечается вовсе. Таким образом, по данным электропрофилирования на интервале между профилями III и V дайка имеет постоянную мощность. На севере она тупо выкликивается между V и VI профилями, по-видимому, срезается субширотным тектоническим нарушением, аналогично тому, как на юге она срезается Верх-Сысертским разломом. Еще более наглядно постоянство мощности дайки и ее тупое выклинивание видны на плане изоом (рис. 6.10).

Кроме плохо проводящего пласта, соответствующего дайке гранитов, в северо-западной части участка отмечаются еще две зоны повышенных значений lk, расположенные в пределах развития графитизированных пород (см. рис. 6-9). Очевидно, они соответствуют интенсивно окварцованным разностям этих пород. Этот участок хорошо обнажен и других причин повышения сопротивления здесь не наблюдается.

Контакт между игишской и саитовской свитами по данным дипольного профилирования, за исключением профиля VI, не выявляется. Это связано с малыми размерами применявшейся установки. Гнейсовидные породы саитовской свиты неустойчивы к выветриванию и мощность коры выветривания на них составляет несколько десятков метров. Сопротивление коры выветривания примерно такое же, как у графитизированных пород. При увеличение размеров установки, как будет показано ниже, этот контакт выявляется достаточно четко.

Задание

1. Получить комплект аппаратуры и оборудования. Проверить работоспособность аппаратуры и исправность оборудования.
2. Выполнить дипольное профилирование на указанных преподавателем профилях (ориентировочная дневная норма 2 профиля). Выполнить в необходимом количестве повторные наблюдения (при обратном ходе по профилю).
3. Оценить по повторным измерениям, а если выполнялись контрольные измерения – и по контрольным измерениям относительную погрешность по формуле (6.3.) и сопоставить ее с требованиями инструкции по электроразведке.
4. Проверить исправность аппаратуры и оборудования и сдать их в лабораторию. В случае обнаружения неисправностей выполнить необходимый ремонт.
5. Построить графики дипольного профилирования и план изоом для среднего значения pk. Выполнить интерпретацию полученных материалов.
6. Составить текстовую часть отчета.

Метод вызванной поляризации.

При пропускании через реальную горную породу электрического тока между приемными электродами кроме разности потенциалов, вызванной омическим падением напряжения на участке MN, возникает дополнительная разность потенциалов. Причиной ее является поляризация среды под действием тока. Это явление называется вызванной поляризацией. Если через питающие заземления пропустить прямоугольный импульс постоянного тока, на приемных заземлениях практически мгновенно возникает разность потенциалов $\Delta U^{(0)}$, соответствующая омическому падению напряжения. После этого величина ΔU продолжает плавно возрастать, асимптотически приближаясь к некоторому предельному значению.

Эта дополнительная разность потенциалов $\Delta U_{вп}$ обусловлена полем вызванной поляризации. После выключения тока разность потенциалов скачком уменьшается на величину $\Delta U^{(0)}$, а затем плавно убывает до нуля(рис.6.11.) После выключения тока поле вызванной поляризации можно наблюдать в чистом виде. $\Delta U^{(0)}$ называют разностью потенциалов первичного поля, а разность потенциалов суммарного поля $\Delta U = \Delta U^{(0)} + \Delta U_{вп}$ - разностью потенциалов поляризующего поля. Способность среды поляризоваться и создавать поле вызванной поляризации определяется ее поляризуемостью, которая равна отношению $\Delta U_{вп}$ и разности потенциалов поляризующего поля и обычно выражается в процентах:

$$\eta = {\Delta U_{вп}}/{\Delta U} \cdot 100\%. \qquad \textbf{(6.3.)}$$

Чтобы результаты измерений поляризуемости были сопоставимы, надо выдерживать постоянными длительность токового импульса (время зарядки $t_э$) и паузу между моментом включения тока и моментом измерения $\Delta U_{вп}$ (время спада $t_{с)}$. Обычно принимается $t_{э=1}$ мин., а $t_{сп}$ =0.5 с. Если измерения выполняются в неоднородной среде, получается некоторое эффективное значение поляризуемости – кажущаяся поляризуемость η_k . Кажущаяся поляризуемость соотносится с истинной аналогично тому, как соотносятся кажущееся и истинное удельные сопротивление.

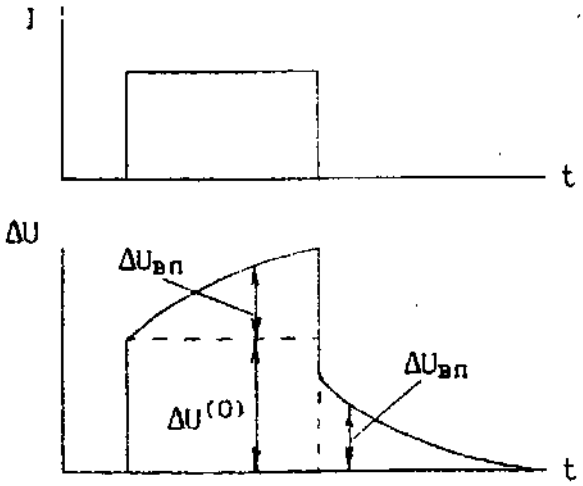


Рис.6.11. График ΔU *при пропускании через поляризующуюся среду прямоугольного импульса тока .1- график* $\Delta U^{(0)}$ *первичного поля; 2- график* ΔU *суммарного (поляризующего) поля.*

Причиной вызванной поляризации является перераспределение потоков в жидкой среде горной породы (в поровых видах) под действием электрического тока. Но разные стороны сужений поровых каналов и зерен проводящих минералов возникают скопления

потоков разного знака, образующие электрические диоды. Эти диоды и являются источниками поля вызванной поляризации. Породы, обладающие только полной проводимостью, имеют небольшую поляризуемость, обычно не превышающую 2-3%. Породы, содержащие выравненность минералов, обладающих электронной проводимостью, характеризуются высокой поляризуемостью, достигающей нескольких десятков процентов. При равномерном распределении выравненности один процент ее увеличивает поляризуемость горной породы на 1,5-2,5% (при содержащих до 15-20%).

Поэтому метод вызванной поляризации эффективен при поисках объектов, содержащих включения рудных минералов или графита.

Вызванная поляризация проявляется и в поле переменного тока. Пусть через питающие заземления пропускается синусоидальный ток. В неполяризующейся среде на приемных заземлениях при этом наблюдается совпадающая с током по фазе разность потенциалов $\Delta U^{(0)}$ такой же формы (если полагать, что реактивное сопротивление цепи мало). Если среда поляризуется; под действием тока возникает тоже знакопеременная разность потенциалов вызванной поляризации. Но так как нарастает и спадает не мгновенно, смена знака $\Delta U_{вп}$ запаздывает по отношению к смене знака первичного поля (рис.6.12). Поэтому результирующая разность потенциалов ΔU, наблюдаемая на приемных заземлениях, отличается от $\Delta U^{(0)}$ как по амплитуда, так и по фазе. По мере повышения частоты тока эффект вызванной поляризации уменьшается так как при высокой частоте за половину периода объект не успевает зарядиться

Из описанного характера проявления вызванной поляризации в переменном, электрическом поле вытекает два возможных способа ее измерений: амплитудный и фазовый. При амплитудных измерениях надо сравнить значения ΔU при двух частотах. При более низкой частоте f_1 *эффект* вызванной поляризации достаточно выражен, при более высокой частоте f_2 он незначителен. Кажущаяся поляризуемость на переменном токе

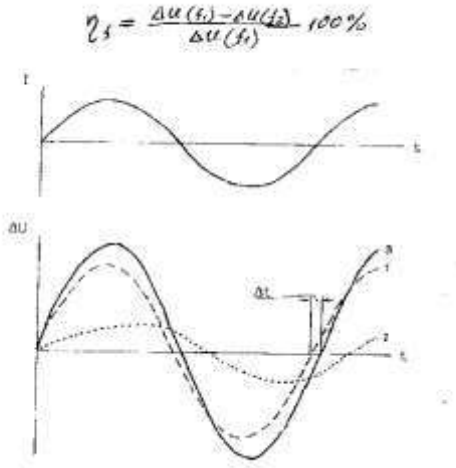


Рис. 6.12. График ΔU *при пропускании через поляризующуюся среду синусоидального тока. 1- график* $\Delta U^{(0)}$ *первичного поля; 2- график* $\Delta U_{вп}$*; 3- график* ΔU *наблюдаемого поляризующего поля.*

по своему физическому смыслу аналогично кажущейся поляризуемости n_k измеренной на импульсном токе. В этой формуле разности потенциалов $\Delta U(f_1)$ и $\Delta U(f_2)$ должны быть измерены при одной силе тока. Частота f_1 берется очень малой, обычно это доли герца или первые единицы герц, Частота f_2 должна быть в несколько раз больше.

При фазовых измерениях измеряется фазовый сдвиг между разностями потенциалов, измеренными на двух частотах. Практически измеряется интервал времени Δt между моментом перехода через нуль разностей потенциалов при частотах f_1 и $f_2=3f_1$. Фазовый сдвиг, обусловленный вызванной поляризацией,

$$\varphi_{вп} = f_1 \cdot \Delta t \cdot 360^0 \qquad \textbf{(6.5.)}$$

Величина $\varphi_{вп}$ всегда отрицательна. По модулю она ведет себя точно так же, как n_f и n_k. Можно считать, что $\left|\varphi_{вп} = 1^0\right|$ соответствует 3% n_k , измеренной в импульсном режиме.

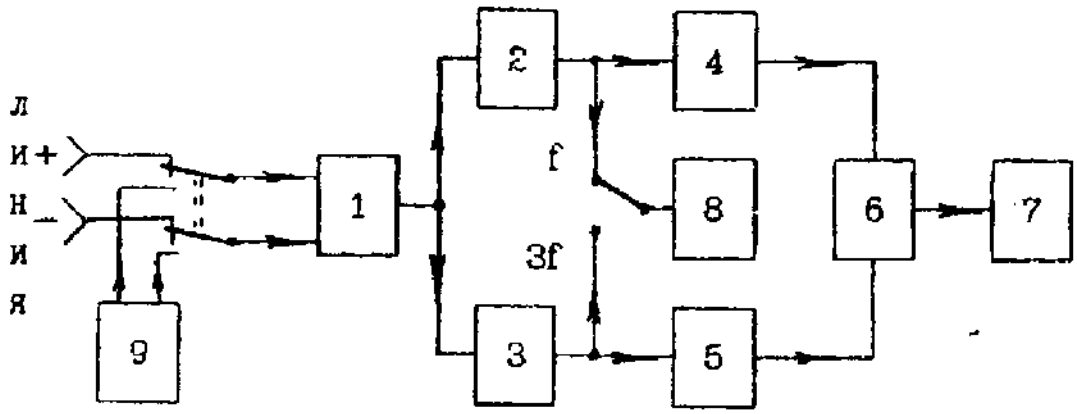
Существует несколько вариантов аппаратуры для фазовых измерений вызванной поляризации. На эти типы построены на одном принципе и отличается лишь в деталях.

Рассмотрим переносный вариант такой аппаратуры, имеющий марку ВП-Ф. Аппаратура ВП-Ф предназначена для фазовых измерений вызванной поляризации. Одновременно, как и при импульсном режиме, измеряется кажущееся сопротивление. В комплект аппаратуры входят генератор и трт измерителя. В качестве источника тока может быть использован бензоагрегат АВ-0,5 (напряжение 115 В, частота 400 Гц) или обычно батарея аккумуляторов с напряжением 12 В. В последним случае используется автомобильный аккумулятор. В последних выпусках в комплект аппаратуры был еще включен стабилизатор тока, который включается последовательно с генератором.

Генератор, вырабатывающий переменный ток прямоугольный формы. Он построен по обычной схеме. Он состоит из блока питания, инвертора и задающего генератора. Переменное синусоидальное напряжение 115 В частотой 400 Гц подается по кабелю от бензоагрегата на вход генератора. В блоке питания трансформатором с секционированной вторичной обмоткой оно изменяется до нужной величины, которую можно ступенчато изменять от 70 до 400 В с помощью переключателя "выходное напряжение". Далее это напряжение выпрямляется и подается на инвертор, где оно преобразуется в переменное заданной частоты и подается на выходные гнезда АВ. Управление инвертором осуществляется задающим генератором, вырабатывающим управляющие импульсы заданной частоты. Генератор имеет пять фиксированных значений частоты от 0.3 до 4.88 Гц. Установка необходимой частоты производится переключателем "частота". При питании от аккумулятора подаваемое от него постоянное напряжение преобразуется в переменное и затем подается на трансформатор. В остальном работа схемы не отличается от описанной выше. Следует заметить, что наибольшая частота генератора ВП-Ф такая же, как у генератора АНЧ-3. Поэтому при работе с питающими линиями не бывших размеров можно использовать генератор АНЧ-3, что существенно облегчает установку.

Измеритель определяет фазовый сдвиг между первой и третьей гармониками, на которые разлагается измеряемый сигнал. Из математики известно, что при разложении в ряд Фурье периодической функции прямоугольной формы, получающиеся нечетные гармоники совпадают по фазе. В случае отличия от прямоугольной формы между

гармониками появляется фазовый сдвиг тем больший, чем больше это отличие. Поэтому при пропускании переменного тока прямоугольной формы через неполяризующуюся среду, когда на приемных заземлениях также имеет прямоугольную форму, фазовый сдвиг между первой и третьей гармониками отсутствует. Если среда поляризуется, за



счет форма разности потенциалов на искажается и становится отличной от прямоугольной. Это приводит к появлению фазового сдвига между гармониками.

Рис. 6.13. Упрощенная структурная схема измерителя ВП-Ф 1-широкополосный усилитель; 2- избирательный усилитель основной частоты f; 3- избирательный усилитель третьей гармоники 3f; 4 и5 – формирователи импульсов; 6- измеритель фазы; 7-индикатор (цифровое табло); 8- электронный милливольтметр; 9- калибратор.

Структурная схема измерителя приведена на рис.6.13. Разность потенциалов с приемных заземлений подается на гнезда "линия" ("+" "-") и далее на широкополосный усилитель 1. После этого цепь разветвляется. В одной ветви включен избирательный усилитель 2, настроенный на основную частоту f, соответствующую частоте тока в питающей линии. В другой ветви включен избирательный усилитель 3, настроенный на частоту третьей гармоники 3f. Формирователи импульсов 4 и 5 вырабатывают короткие импульсы прямоугольной формы в моменты перехода гармоник f и 3f через нуль. В измерителе фазы 6 определяется время между этими импульсами, т.е. интервал времени между переходами гармоник через нуль Через, в соответствии с (6.5), определяется фазовый сдвиг. Результат измерений высвечивается на цифровом табло 7.

Разность потенциалов на приемных заземлениях измеряется электронным вольтметром 8, который тумблером "f-3f " может быть включен в любой гармоники.

Для контроля правильности измерений предусмотрен калибратор 9, формирующий прямоугольное напряжение рабочей частоты, стабилизированное по амплитуде. С его помощью устанавливается номинальная чувствительность миллиамперметра и проверяется правильность показаний измерителя фазы.

Для изучения вызванной поляризации можно использовать любые электроразведочные установки. Наиболее часто применяют установку срединного

градиента. В этой установке питающие заземления, разнесенные на достаточно большие расстояние (обычно 1- км), в процессе работы остаются неподвижными, а приемная линия перемещается по профилю в средней части линии АВ. Длина рабочего участка профиля составляет в зависимости от мощности рыхлых отложений от 0.5 до 0.8 разноса АВ. Наблюдения выполняются также на соседних профилях, которые могут быть удалены от питающей линии на расстояние до АВ/4.

Измерения вызванной поляризации, как указывалось выше, могут выполняться в импульсном режиме или на переменном токе. Описание работы на профиле дается ниже применительно к фазовым измерениям на переменном токе с аппаратурой ВП-Ф.

На центральном профиле устанавливаются питающие заземления и между ними раскладывается подводящий провод. Для обеспечения достаточно малого сопротивления каждое заземление устраивается из нескольких электродов, забитых в землю на максимальную глубину. Электроды в одном заземлении соединяются между собой и подключаются к подводящему проводу. Генератор устанавливается вблизи одного из заземлений. Поэтому один из подводящих проводов должен иметь длину, равную разносу АВ, а второй провод короткий, для подключения генератора к ближнему заземлению, Схема включения генератора показана на рис.6.14.

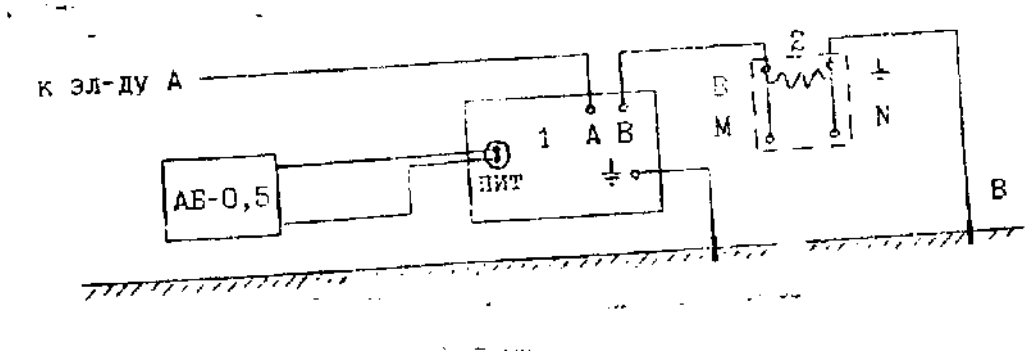


Рис. 6.14. Схема включения генератора 1- генератор; 2- активное сопртивление.

Рабочая частота выбирается такой, чтобы результаты измерений не искажались индукционными эффектами. Для этого необходимо, чтобы характеризующий степень влияния индукционных эффектов параметр

$$p = L^2 \frac{f}{\rho_k} \qquad \textbf{(6.6)}$$

не превышал 0,001-0,002. В формуле (6.6) L=АВ/2– полуразное питающей линии в километрах, f- частота, ρ_k - минимальное ожидаемое кажущееся сопротивление.

Включение генератора следует производить после проверки положения всех переключателей. Переключатели "питание" и "входное напряжение" должны быть в положении "выкл.", "генератор – линия АВ"- в положении "АВ", "контроль" – в положении "АВ". Переключателем "частота" , надо установить рабочую частоту. При

этом работающий генератор должен стоять на резиновом коврике (из соображения безопасности).

Порядок включения генератора:

1. Запустить бензоагрегат или подключить аккумулятор.
2. Включить тумблер "питание". При этом показание амперметра должно быть в диапазоне 40-100 делений, Меньшее отклонение стрелки прибора указывает на недопустимо высокое сопротивление или обрыв линии АВ. В этом случае следует выключить тумблер "питание" и снова включить после устранения неисправности в линии или улучшения заземлений.
3. Переключатель "контроль" установить на максимальный диапазон измерения тока(5 А).
4. Переключатель "генератор- линия АВ" перевести в положение "генератор".
5. Переключатель "входное напряжение" перевести в положение "70" (минимальное напряжение). При этом может загореться индикатор "перегрузка".
6. Нажать кратковременно кнопку "пуск". Индикатор "перегрузка" при этом должен погаснуть. Если ток в цепи меньше 0.1 А, индикатор продолжает гореть. В этом случае надо повысить входное напряжение до следующего значения и снова нажать кнопку "пуск".
7. переводя переключатель "контроль" в соответствующие положения, измерить силу тока I и напряжение U. При этом выходная мощность P=IU не должна превышать 330 Вт.

Стабильный режим работы генератора устанавливается через 10-15 минут после включения.

Перед началом измерений производится калибровка измерителя.

При калибровке проверяется работоспособность измерителя, напряжение источника его питания и устанавливается номинальная чувствительность электронного вольтметра. Для калибровки надо установить переключатель "род работы" в положение "калибровка», переключатель "частота" в положение "10000», переключатель "осреднение" – в положение "2", тумблер "f - 3f "- в положение "f".

Порядок калибровки:

1. Выключить тумблер "питание". Стрелка индикатора при этом должна установиться в правой половине шкалы.
2. Нажать кнопку "аккум.". Показания индикатора при этом должны быть в пределах 70-100 делений.
3. Вращая ручку "устан. 700", убедиться, что стрелка индикатора перекрывает диапазон 70 ± 5 делений. Установить отсчет 70 делений.
4. Нажать "табло U". При этом на цифровом табло должен появиться отсчет 700 ± 1. Если отсчет другой, отсчет 700 устанавливается ручкой "устан.700". Вращение ручки производиться при отпущенной кнопке, которая нажимается только при взятии отсчета.
5. Нажать кнопку "самоконтроль" и не отпуская ее кратковременно нажать кнопку "табло N". Не отпуская кнопки «самоконтроль», дождаться появления на табло, сигнализирующий о готовности схемы к работе, снова нажать

кнопку «табло N» и прочитать появившийся на табло отсчет, который должен быть равен 5632 ± 1. Повторить операцию несколько раз, чтобы убедиться в стабильности отсчета. Этот отсчет должен сохраняться при всех положениях переключателя "осреднение".

6. Повторить описанную в предыдущем пункте процедуру, не нажимая кнопку "самоконтроль". Отсчет при этом должен быть 6000 ± 500.

Приемная линия аналогична линии MN при работе методом дипольного профилирования. Измеритель устанавливается возле одного из заземлений, которое подключается к гнезду "-". Соединительные провода должны иметь длину, соответствующую разносу MN и не образовывать петель, нельзя наматывать провод на электрод. При работе на профиле, по которому разложен провод линии AB, надо следить, чтобы провода питающей и приемной линий не лежали в непосредственной близости один от другого и не пересекались. Это необходимо для предотвращения эффектов взаимоиндукции. Указанием на появление индукционных эффектов в линиях или в земле являются положительные значения $\varphi_{вп}$.

Порядок измерений на точке:

1. Подключить провода линии MN к гнездам "линия", при этом ближнее заземление должно быть подключено к гнезду "-".
2. Установить переключатель "род работы" в положение "линия". Отсчет по стрелочному индикатору при этом должен быть 30-100 делений. Если отсчет меньше 30, значит сопротивление линии MN недопустимо велико и надо улучшить приемные заземления.
3. Установить переключатель "род работы" в положение "измерение".
4. Переключателем "предел" установить отсчет по стрелочному индикатору в пределах 30-100 делений.
5. Нажав кнопку "табло U", взять отсчет по цифровому табло.
6. Нажать кратковременно кнопку "табло N". После появления на табло точки снова нажать кнопку и прочитать отсчет на табло.

Все измерения на точке повторяются не менее трех раз. Если наблюдается разброс отсчетов, надо увеличить осреднение и повторить измерения. В процессе измерений по профилю периодически повторяется калибровка измерителя.

Так как ток в цепи никогда не имеет идеально прямоугольной формы, даже в неполяризующейся среде между гармониками разности потенциалов, снимаемой с приемных заземлений, наблюдается сдвиг по фазе. Чтобы можно было его учесть, измеряют фазовый сдвиг между первой и третьей гармониками тока φ_{AB}. Для этого в питающую линию включается активное сопротивление. Подключив к этому сопротивлению к этому сопротивлению измеритель, производят измерение φ_{AB}. Сопротивление включается в цепь между гнездом B генератора и ближайшим питающим заземлением (см. рис.6.14). Измерение φ_{AB} выполняется так же, как на точках профиля, только в этом случае нет необходимости измерять разность потенциалов.

Если работа производится с генератором АНЧ-3, в качестве активного сопротивления используется калибровочное сопротивление генератора (гнездо "$U_к$").

Вычисление ΔU и $\varphi_{вп}$

Для получения ΔU отчет, снятый с табло, надо умножить на n/1000, если предел n кратен 10 и на n/300, если предел кратен 3.

Фазовый сдвиг $\varphi_{вп}$ вычисляется по формуле

$$\varphi'_{вп} = 0.03(N_{MN} - N_{кал}), \qquad \textbf{(6.7)}$$

где N_{MN}- отчет при измерении в линии MN,

$N_{кал}$ – отчет при калибровке (5632 ± 1).

Так же вычисляется фазовый сдвиг в линии AB φ_{AB}, только вместо N_{MN} в формулу подставляется отсчет N_{AB}, полученный на активном сопротивлении, включенном в питающую линию. Этот фазовый сдвиг вычитается из значения, полученного по формуле (6.7):

$$\varphi_{вп} = \varphi'_{вп} - \varphi_{AB} = 0.03[(N_{MN} - N_{кал}) - (N_{AB} - N_{кал})] = 0.03(N_{MN} - N_{AB)}) \qquad (6.8)$$

В процессе работы выполняются повторные наблюдения (при обратном ходе по профилю). Точность измерений ΔU (p_k) оценивается по относительному расхождению первичных и повторных измерений. Средняя погрешность, как и в других методах сопротивлений, не должна превышать 5%. Точность измерений $\varphi_{вп}$ оценивается по абсолютному расхождению. Средняя погрешность измерений $\varphi_{вп}$ не должна превышать 0.15^0. Так же оценивается точность по контрольным измерениям, которые выполняются другим оператором. Повторные и контрольные наблюдения должны составлять не менее, чем по 10% от общего объема измерений. После окончания наблюдений на профилях измеряется фазовый сдвиг $\varphi_{вп}$ в питающей линии.

Результаты работ методом вызванной поляризации с фазовыми измерениями в виде графиков $\varphi_{вп}$ и $p_к$ и планов изолиний этих величин. Так как $\varphi_{вп}$ всегда отрицателен, а поляризующиеся объекты отмечаются увеличением модуля этой величины, чтобы характер графиков был аналогичен графикам η_k, измеренной в импульсном режиме, принято отрицательные значения $\varphi_{вп}$ откладывать по оси вверх.

Пример результатов фазовых наблюдений по методу вызванной поляризации с установкой срединного градиента размером 1000 м приведен на рис.6.15. Измерения выполнялись на частоте 0,3 Гц. Минимальное значение $p_к$ на профиле составляет около 50 Ом м. При их условиях параметр

$$p = (\frac{AB}{2})^2 \frac{f}{p_k} = 0.5^2 \frac{0.3}{50} 0.0015,$$

т.е. соответствует требованиям. Незначительное влияние индукционных эффектов подтверждается отсутствием положительных и близких к нулю значений $\varphi_{вп}$.

В западной части приведенного на рисунке фрагмента профиля, над дайкой гранитов, наблюдается высокие, 600-800 Ом м, значения $p_к$ и $\varphi_{вп}$ около -1^0. Восточный контакт дайки отмечается между пикетами 17 и 18 резким уменьшением $p_к$ и увеличением модуля $\varphi_{вп}$. Область пониженных значений кажущегося сопротивления протягивается на восток несколько дальше пикета 24. На этом участке $p_к$ составляет 50-100 Ом м, лишь в отдельных точках увеличиваясь до 130-140 Ом м. Посредине между пикетами 24 и 25 $p_к$ возрастает до 200, а затем до 350 Ом м. В области пониженных значений кажущеюся сопротивления наблюдается повышенная поляризуемость горных пород- $|\varphi_{ВП}|$ здесь увеличивается до 2-3,5 градусов. Этот участок профиля сложен графитизированными породами игишской свиты. Область наиболее высокой поляризуемости мощностью около 50 м наблюдается на пикете 19. Здесь же отмечается и относительное понижение кажущегося сопротивления. Очевидно, этот участок сложен наиболее обогащенными графитом породами.

Обращает на себя внимание несовпадение восточной границы области повышенной поляризуемости и пониженного сопротивления. Контакт пород пониженного и высокого сопротивления, как уже указывалось, наблюдается между пикетами 24 и25. Поляризуемость же резко уменьшается сразу же за пикетом 23 и далее до конца профиля $\varphi_{вп}$ нигде не превышает 1%. Не вызывает сомнения, что контакт поляризующихся и слабо поляризующихся пород соответствует контакту графитизированных образований. Зона низкой поляризуемости и пониженного сопротивления мощностью 50 м в районе пикета 24, по-видимому, отмечает тектоническое нарушение, разделяющее игишскую и саитовскую свиты. Заметим, что относительное понижение $p_к$ наблюдается также около пикета 26. Можно предполагать, что им отмечается параллельная зона дробления того же тектонического нарушения.

Задание

1. Сделать питающее заземление, разложить провода и собрать питающую цепь (см. рис.6.14) .
2. Запустить генератор, установить необходимый режим его работы.
3. Выполнить калибровку измерителей.
4. Измерить фазовый сдвиг тока $\varphi_{вп}$ в питающей линии.
5. Выполнить измерения на указанных преподавателем профилях.
6. Оценить по повторным измерениям, а если выполнялись контрольные измерения – и по контрольным наблюдениям погрешность и сопоставить ее с требованиями Инструкции по электрораразведке.

7. Смотать питающую линию, снять заземления, собрать всю аппаратуру и оборудование и сдать их в лабораторию.

8. Построить графики и планы изолиний $\varphi_{вп}$ и $\rho_к$, выполнить их интерпретацию.

9. Составить текстовую часть отчета.

Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)

При вертикальном электрическом зондировании в точке наблюдений изучается изменение удельного сопротивления горных пород с глубиной. Наиболее эффективен метод при изучении разрезов с пологими границами раздела. В этом случае при интерпретации выделяются слои, отличающиеся по удельному сопротивлению, определяются их сопротивления и мощности. Проведя площадные или профильные наблюдения, по этим данным можно построить структурные карты и разрезы. В случае крутопадающих контактов или трехмерных геологических тел по результатам ВЭЗ получается качественная характеристика разреза и появляется возможность разделения аномалий от глубинных объектов и приповерхностных неоднородностей.

Зондирование основано на том, что глубина проникновения электрического тока в землю увеличивается при увеличении расстояния между питающими заземлениями. При малом размере установки, меньшим мощности верхнего слоя, практически весь ток растекается в этом слое и кажущееся сопротивление равно истинному удельному сопротивлению слоя ρ_1. При увеличении разноса питающих электродов электрический ток протекает на все большую глубину. Поэтому на результаты измерения оказывают влияние нижележащие слои.

Результаты электрического зондирования изображаются в виде графика зависимости кажущегося сопротивления от размеров установки. Так как разносы АВ, а не редко $\rho_к$, в процессе одного зондирования изменяются на несколько порядков, кривую строят в логарифмическом масштабе. В этом масштабе все значения откладываются с одинаковой относительной точностью.

При малых разносах кривая ВЭЗ входит на асимптоту $\rho_к=\rho_1$. При достаточно больших размерах установки асимптотой является значение удельного сопротивления нижнего слоя. Если удельное сопротивление нижнего слоя на два порядка и более превышает удельное сопротивление вышележащего слоя, оно может полагаться бесконечно большим. В этом случае конечной асимптотой кривой ВЭЗ является прямая, наклоненная к осям координат под углом 45^0. Промежуточные отражаются в средней части кривой повышениями и понижениями $\rho_к$, соответственно сопротивлениям этих слоев.

Если на ряду с горизонтальными границами раздела на участке есть крутопадающие контакты или локальные тела, результаты ВЭЗ обычно представляют в виде вертикальной карты сопротивлений. Для этого на горизонтальной линии в нужном масштабе отмечают точки ВЭЗ, а по вертикальной оси вниз откладывают вниз размер установки. На полученной таким образом координатной плоскости отмечают точки, соответствующие разносу АВ для каждого ВЭЗ и около этих точек, вписывают

измеренные значения $\rho_к$. Затем проводят линии равных $\rho_к$. На построенной таким образом вертикальной карте изоом наглядно отображаются изменения удельного сопротивления среды как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

В вертикальном электрическом зондировании используется четырехэлектродная установка AMNB, в которой питающие электроды А и В, как и приемные N и M симметричны относительно центра установки (см. рис.1.2). При этом разнос MN должен быть не более AB/3, чтобы не захватывать приемной линией области резко неоднородного поля вблизи питающих заземлений. При очень малом по сравнению с АВ разносом MN измеряемая разность потенциалов мала, что затрудняет ее измерения. Поэтому обычно не делают разнос MN меньше, чем AB/20. В процессе работы разнос питающих электродов увеличивают приблизительно по закону геометрической прогрессии с коэффициентом 1.5.

Питающую линию монтируют из провода ГПСМП, а при малых разносах – из ГПСМПО. Реже для больших разносов АВ используют более тяжелый провод ГПМП, чтобы уменьшить потери напряжения. Для приемной линии обычно используется облегченный провод ГПСМПО. Установку монтируют в виде полулиний, которые сматываются на разные катушки. На проводах заранее устанавливают метки, соответствующие принятым разносом. Провода приемной линии, если их длина не велика (до десятков метров), на катушки не сматывают, а разбрасывают около пикетов виде петли, которую в процессе зондирования вытягивают по мере необходимости.

Так как при малых разносах АВ размер приемной линии приходится изменять достаточно часто, удобно смонтировать провода для нескольких приемных линий в виде косы и сразу подключить все приемные заземления. Тогда оператор сам устанавливает нужный ему размер приемной линии путем подключения соответствующих проводов.

Перед началом зондирования катушки с проводами питающей линии устанавливает по разные стороны от точки зондирования. Провода разматывают до первой метки, по которой устанавливают заземления для первого разноса АВ, так чтобы его средина совпала с пикетом. Таким же образом раскладывают около пикета измерительный прибор и источник тока. Выполнив измерения разности потенциалов ΔU и силы тока I в питающей линии, рассчитывают кажущееся сопротивление. Так как коэффициент установки меняется при каждом изменении разносов электродов, целесообразно коэффициенты установки для всех разносов рассчитать заранее. При работе методом ВЭЗ коэффициент симметричной установки наиболее удобно записать в виде

$$K = \pi \frac{(\frac{AB}{2})^2 - (\frac{MN}{2})^2}{MN} \qquad \textbf{(6.9)}$$

Выполнив замер, оператор или вычислитель командуют рабочим на заземлениях А и Б установить следующий разнос. Рабочие разземляют линию и взяв концы проводов разматывают провода до следующего разноса и снова забивают в землю

электроды и подключают к ним провода .Положение заземлений устанавливает рабочий на центре, наблюдающий за размоткой проводов и останавливающий их на очередной метке .

Затем снова проводятся измерение ρк, устанавливается следующий разнос и т.д.

Когда разнос питающих элементов АВ достигает 20MN, разнос приемных электродов увеличивают до одной трети разноса АВ. Чтобы можно было учесть возможное изменение

ρ_k^{MN} при изменении разноса приемной линии, производят измерения с обоими разносами MN при одном разносе АВ.Измерения с двумя разносами приемных электродов производят и при следующем разносе питающих заземлений , что позволяет контролировать качество измерений и более увереннно учитывать изменение ρmn.Так как при обоих разносах АВ размеры приемных линий M1N1 и M2N2 одинаковы , изменение ρmn в обоих случаях также одинаково .Поэтому отношение ρк при разносах M1N1 и M2N2 для обоих разносов питающих заземлений практически одинаково :

$$\rho_к^{m1n1} / \rho_к^{m2n2} \,\big|\, AB=A_1B_1=\rho_к^{m1n1}/\rho_к^{m2n2} \,\big|\, AB=A_2B_2=\rho_{m1n1}/\rho_{m2n2}. \quad (6.10)$$

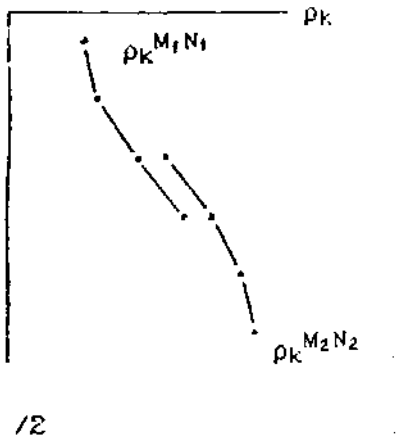


Рис.6.16. Поведение кривой зондирования при изменении разноса MN.

На кривой зондирования построенной в логарифмическом масштабе, отрезки, построенные для разных разносов приемных электродов , параллельны (рис. 6.16)

Степень параллельности перекрывающих отрезков кривой характеризует точность измерений. Чтобы следить за ходом кривой зондирования переход на следующий разнос АВ производится только после того, как точка для предыдущего разноса построена. При появлении на кривой незакономерных искажений измерения немедленно повторяются .При нарушении параллельности перекрытия повторяются все точки перекрытия .При выполнении повторных измерений следует забить глубже питающие электроды или увеличить их количество , чтобы изменить сопротивление заземлений .Точность измерений оценивается по относительному расхождению

результатов первичного и повторного измерений ρк. Это расхождение не должно превышать 5%. Количество повторных измерений должно быть не менее 5% от общего числа измерений.

Повторные измерения выполняются для оперативного контроля за качеством работ. Для более объективной оценки качества производятся контрольные измерения, которые выполняются другим оператором, в другое время и желательно с другим комплектом аппаратуры и оборудования. Оценка точности по контрольным наблюдениям и требования к точности те же, что при повторных измерениях.

Электрические зондирования можно выполнять как на постоянном, так и на переменном токе низкой частоты. При работе на постоянном токе в качестве измерительного прибора можно использовать электроразведочный автокомпенсатор АЭ-72 и ток в питающую линию подавать от батареи гальванических элементов или аккумуляторов или аппаратуру ЭРА-П, в состав которой входит и источник тока. При работе на переменном токе можно использовать аппаратуру низкой частоты АНЧ-3 или ЭРА-ЗНАК. Источник тока входит в комплект этих токов аппаратуры (рабочая частота 4,88 ГЦ)

Схемы соединений аппаратуры и оборудования при проведении ВЭЗ показаны на рис.6.17.

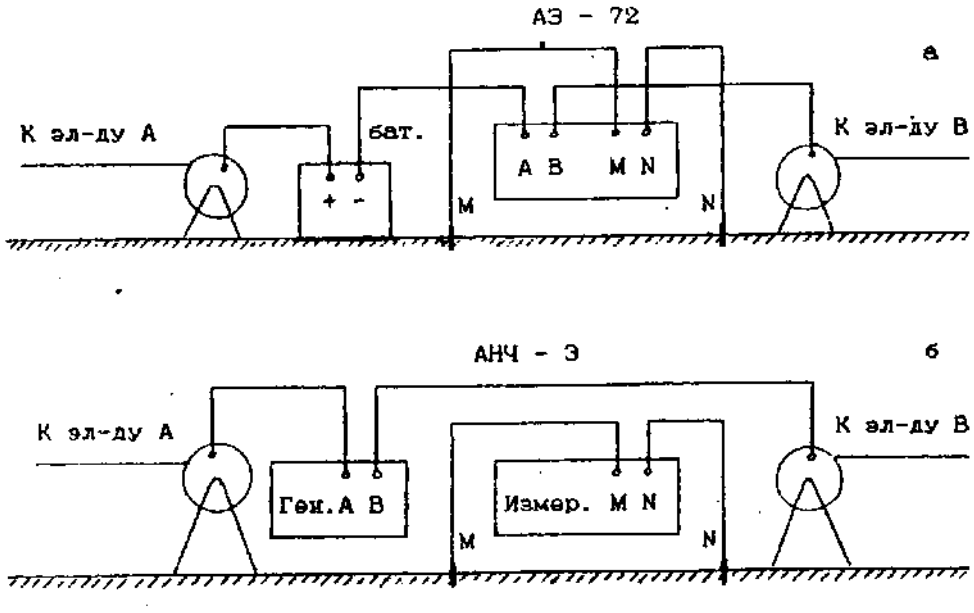


Рис.6.17. Схемы соединений аппаратуры и оборудования при электрическом зондировании: а- при работе на постоянном токе с автокомпенсатором АЭ-72; б- при работе на переменном токе или с аппаратурой ЭРА-П.

Если работы производятся на переменном токе, необходимо чтобы не было заметно влияния индукционных эффектов и электрическое поле практически не отличалось от поля постоянного тока. Мерой влияния индукционных эффектов и, как следствие, степени различия полей переменного и постоянного тока служит параметр

поля , определяемый формулой (6.6). При измерении ρк для выполнения условия идентичности полю постоянного тока необходимо, чтобы выполнялось условие $\rho \leq 0.02$.

На рисунке 6.15 приведена вертикальная карта изоом по данным ВЭЗ на том же профиле, на котором проведены наблюдения по методу вызванной поляризации. Зондирования выполнялись с ориентировкой установки по направлению профиля. Максимальный разнос питающих заземлений был 300м.Точки зондирования располагались на профиле через 50м. (на пикетах).

На вертикальной карте ρк субвертикальными изоомами , отметки которых уменьшаются с запада на восток между пикетами 17 и 18 отмечается восточный контакт дайки гранитов. Положение его хорошо согласуется с выделенным по графику ρк установки срединного градиента и по графику ρк дипольному профилированию. Восточнее дайки гранитов наблюдается область низких значений кажущегося сопротивлений, в пределах которой ρк при сужении разносов АВ почти не меняется. Этот интервал профиля сложен гранитизированными породами. В его пределах субвертикальными изоомами с отметкой 100 выделяются две зоны наиболее низких сопротивлений (на пикетах 18-20 и на пикетах 22), соответствующих, по-видимому, участкам наиболее обогащенным гранитом и наименее окварцованным. К востоку от пикета 24 изоомами с отметками 150и 200 четко фиксируется переход от области низких сопротивлений к высоким значениям ρк. На пикете 26 провалом изоом и распространением значений ρк меньше 150 Ом*м отмечается узкая вертикальная зона низких сопротивлений. Как указывалось выше, здесь, по-видимому, проходит восточная зона дроблений, принадлежащая тектоническому нарушению, разделяющую формации графитизированных пород игишской свиты и гнейсовидных образований саитовской свиты. Западная зона этого тектонического нарушения сливается с низкоомной зоной, связанной с породами игишской свиты и по сопротивлению, не выделяется. Как указывалось при описании результатов метода вызванной поляризации, восточный контакт графитизированных пород четко отмечается по уменьшению поляризуемости между пикетами 23 и 24.

На вертикальной карте изоом хорошо видно, что над гнейсовидными породами саитовской свиты развита достаточно мощная кора выветривания. Это следует из того, что при почти горизонтальном ходе изоом их отметки постепенно возрастают от 50 до 200 и более омметров. В меньшей степени кора выветривания выражена над гранитами. В области развития графитизированных пород кора выветривания на вертикальной карте ρк четко не выделяется.

Более отчетливо изменение сопротивлений пород с глубиной видно на кривых ВЭЗ (рис.6.18). Над гнейсовидными породами (пикет 28) после достаточно высоких значений при самых малых разносах АВ/2 кажущееся сопротивление убывает почти до 30 ОМ*м. Нижняя граница этого слоя , бесспорно соответствующего рыхлым приповерхностным отложениям , по данным интерпретации находится на глубине чуть больше одного метра. Высокие значения ρк при самых малых разносах объясняются аэрацией верхней части рыхлых отложений мощностью 10-20 см. После минимума при

АВ/2≈1.5м. ρк постепенно растет,образуя коленообразный перегиб при средних разносах , по которому выделяется слой коры выветривания мощностью около 20м с удельным сопротивлением порядка100 ом*м. В нижней части кривой ρк быстро возрастает, стремясь к асимптотике, наклоненной под углом близким к 45°, фиксируя таким образом переход к свежим высокоомным породам. Аналогично ведет себя кривая зондирования на пикете 24, расположенной над западной зоной тектонического нарушения. Но у этой кривой соответствующий коре выветривания растянут, так что кривая здесь идет параллельно оси разносов, и удельное сопротивление ниже и равно всего 50 ом*м. После АВ/2 больше 70м наблюдается резкий рост ρк и кривая выходит на асимптоту, наклоненную под углом, близким к 45°. Таким образом, здесь на глубине также отмечается наличие плохо проводящих пород, но область пониженных сопротивлений распространяется до глубины 80м. Очевидно, это связано с развитием вдоль тектонического нарушения линейной коры выветривания.

Совершенно иной характер имеет кривая зондирования над графитизированными породами (пикет 22). Здесь при разносах АВ/2 до 10м кажущееся сопротивление практически не меняется и равно примерно 100 ом*м. После АВ/2=10м ρк убывает до 40-50 ом*м на больших разносах. Некоторое повышение ρк при малых разносах питающих заземлений связано с особенностями графитизированных пород, у которых при выветривании удельное сопротивление повышается (разрушаются связи между зернами графита).

Результаты наблюдений по методам ВЭЗ и ВП обобщены в геоэлектрическом разрезе, приведенном на этом же рис.6-15. Здесь же показан для сопоставления геологический разрез, построенный по геологической карте. На разрезе видно несовпадение восточного контакта дайки гранитов по геофизическим и геологическим данным, упоминавшееся при описании результатов дипольного профилирования. Вторым моментом, уточняющим геологическое строение участка, является сложное строение разделяющего свиты тектонического нарушения. По данным электроразведки общая мощность тектонической зоны на рассматриваемом профиле около 350м, и она состоит по крайней мере из двух зон дробления, разделенных свежих пород. По этим зонам развивается линейная кора выветривания.

Задание

1. Включить комплект аппаратуры и оборудования. Проверить работоспособность аппаратуры и исправить оборудования.

2. Выполнить электрические зондирования на указанных преподаватель точках (ориентированная дневная норма 5 точек при максимальном разносе *AB*/2=150 м). В процессе зондирования выполнить в необходимом количестве повторные измерения. Одновременно с измерениями вычислять pk для каждого разноса и строить кривые зондирования.

3. Оценить по повторным измерениям, а если выполнялось контрольное зондирование – и по контрольным измерениям полученную точность и сопоставить ее с требованиями Инструкции по электроразведке.

4. Проверить исправность аппаратуры и оборудования и сдать их в лабораторию. В случае обнаружения неисправностей выполнить необходимый ремонт.

5. Выполнить количественную интерпретацию полученных кривых зондирования.

6. Построить по отработанной части профиля вертикальную карту сопротивлений и геоэлектрический разрез.

7. Составить текстовую часть отчета.

Отчетность о практике

Отчетность о практике включает индивидуальную, бригадную и групповую части. Индивидуальная отчетность заключается в составлении каждым студентом письменного отчета о практике. Содержание отчета будет приведено ниже. Бригадная отчетность включает в себя оформленные в соответствии с требованиями Инструкции по электроразведке /1/ полевые журналы, графики и планы, построенные по результатам наблюдений, с элементами их интерпретации. Содержание графических материалов указано в задании по каждому методу. Отчеты и бригадные материалы составляются в день проведения работ соответствующим методом и сдаются на проверку на следующий день. Групповые графические материалы составляются в день заключительной камеральной обработки. Они представляют собой сводные графики и планы, построенные по результатам наблюдений всех бригад и результаты их интерпретации. Сводные графические материалы вычерчиваются на ватмане и оформляются, как демонстрационные чертежи.

Текст отчета состоит из введения, отчета о работе каждым из включенных в программу практики электроразведочных методов и заключения.

Во введение указываются место и время прохождения практики, фамилии преподавателей, руководящих практикой. Далее дается краткое геологическое описание участка работ и характеристика электрических свойств горных пород, слагающих участок. На основе этого описания следует сделать выводы о том, какие горные породы могут быть разделены по удельному сопротивлению и поляризуемости, могут ли на участке появиться аномалии естественного поля.

При описании каждого метода указывается его принцип и решаемые им геологические задачи. Затем конкретизируются задачи, которые могут быть решены этим методом в условиях участка. Приводится схема электроразведочной установки, указываются ее параметры, сеть наблюдений и способ их представления. Указывается способ оценки точности работ, и полученная точность сопоставляется с требованиями Инструкции по электроразведке. Описываются полученные результаты и их интерпретация.

В заключении даются совместные описания и интерпретация результатов работ всеми методами по сводным графическим материалам. Здесь же могут быть высказаны впечатления о практике и предложения об улучшении ее организации.

Завершается практика собеседованием о методике и технике электроразведочных работ и о полученных результатах.

Библиографический список

1. Инструкция по электроразведке / М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1984.
2. Матвеев Б.К. Электроразведка: Учебник для вузов. – 2-е издание, переработанное и дополненное – М.: Недра, 1990.
3. Редозубов А.А. Комплект лекций по электроразведке. Ч. 1. – Учебное пособие. – Екатеринбург: Изд. УГГГА, 1994.
4. Якубовский Ю.В., Рениру И.В. Электроразведка: Учебник для вузов – 3-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Недра, 19991.

Глава 7

Магнитометрия

Г. Я. Дементьев

7.1. Задачи

Полюшко, поле,
Полюшко, магнитно поле.
Вспашешь полюшко прибором,
Явит полюшко Алмаз.

В. Филатов, выпускник СГИ 1971 г.

Учебно-методическая практика по магниторазведке является прямым продолжением теоретического курса и практикума по изучению физических основ и материально-технической базы метода. Практика имеет целью выработки у студентов навыков по применению магниторазведки в полевых условиях.

Основной задачей практики является освоение методики полевых работ и способов получения материалов в виде, удобном для решения геологических задач. В соответствии с этим составными элементами практики являются:

−предполевая подготовка аппаратуры;

−проведение полевых работ по методике, применяемой производственных условиях;

−камеральная обработка результатов измерений;

−составление отчетных материалов.

Основной объем работ выполняется с применением современной аппаратуры – протонных магнитометров типа ММП-203.

Область применения магниторазведки очень широка. Магнитные измерения используются в археологии, при решении проблем экологии, при прогнозе землетрясений и т. д. Но основной областью применения магниторазведки является геология. Метод используется при тектоническом и металлогеническом районировании, при геокартировании и поисках, при разведке обнаруженных месторождений многих полезных ископаемых, наконец, при планировании добычных работ на действующих горнодобывающих предприятиях.

Практическая область использования и целевая направленность метода определяются геологическим заданием. С учетом геологического строения района Верхней Сысерти, временем, отводимым на практику, магниторазведочные работы будут проводиться по направлению «Геологическое картирование".

7.2. Физико-геологические предпосылки

Приступая к выполнению полевых магниторазведочных работ, необходимо иметь предварительное представление о том, какие геологические объекты могут быть выявлены и изучены этим методом. Для этого следует помнить основные положения теории метода, которые определяют содержание физических предпосылок к его применению. Одно из таких положений состоит в том, что инструментом, средством изучения геологической среды в магниторазведке является магнитная аномалия. Каждая аномалия создается массивом намагниченных горных пород.

Геологическая среда намагничивается главным магнитным полем планеты. Но по причине различия индивидуальных свойств разные горные породы одним и тем же

полем намагничиваются по-разному. Поэтому создаваемые ими магнитные поля или магнитные аномалии также будут различаться. И в этом случае по распределению магнитных аномалий можно будет судить о расположении различных горных пород на территории исследований. Так, массивы сильномагнитных пород будут отмечаться положительными аномалиями; над массивами слабомагнитных пород будет пониженное аномальное поле или даже отрицательные аномалии. Из сказанного следует, что еще одним важнейшим положением, представляющим необходимое условие для применения магниторазведки, является различие горных пород по намагниченности. Напомним, что достаточно представительной оценкой намагниченности горных пород является такой их параметр, как магнитная восприимчивость.

Помимо физических предпосылок, упомянутых выше, на распределение магнитных аномалий влияет ряд особенностей геологического строения района. Так, например, если магнитный объект (например, дайка диабаза) имеет малую видимую мощность, то и создаваемая магнитная аномалия будет очень узкой в плане и по этой причине легко может быть пропущена при наблюдениях с магнитометром. Из-за малой мощности выявление даже сильно магнитного объекта становится проблематичным.

Важной геологической предпосылкой является глубина залегания геологических тел. Чем глубже залегает намагниченный объект, тем слабее ощущается его аномальное влияние на дневной поверхности. Для объектов небольшой видимой мощности влияние глубины залегания на успех съемки может проявляться еще более резко.

Значение имеет и характер залегания. Так, горизонтально залегающий намагниченный пласт даже при значительных размерах создает очень слабый аномальный эффект. Поэтому применение магниторазведки при изучении горизонтально-слоистых разрезов мало эффективно. Более благоприятно наклонное или вертикальное залегание объектов.

В районе практики магниторазведка используется в помощь геологическому картированию, значит, по магнитным данным должны быть внесены уточнения и коррективы в результаты геологических наблюдений. Это относится к уточнению расположения на территории работ массивов различного состава, к уточнению их размеров и формы в плане. Измерениями магнитного поля вся площадь охватывается равномерно. Это позволяет более детально проследить в плане протяженные контакты пород, отдельные слои или их комплексы и т. д.

Приступая к практике по магниторазведке, каждый студент должен изучить физико-геологические предпосылки для применения метода в данном районе с целью геокартирования и составить соответствующий раздел в своем отчете. Для подробного ознакомления с геологическим строением района необходимо использовать геологическую карту масштаба 1:10000, методические указания по геологии района, материалы геологической экскурсии. Также должны быть использованы данные о магнитных свойствах пород района.

7.2. Аппаратура

Приступая к работе с аппаратурой, необходимо предварительно уточнить ряд основных положений, основываясь на знаниях, полученных в процессе практический занятий в лаборатории магниторазведки. К числу этих положений относится:

- назначение магнитометра;
- принцип действия и основные элементы конструкции магнитометра.

В назначении прибора необходимо отметить суть измеряемого элемента геомагнитного поля и его обозначение символом, принятым в магниторазведке (ΔZ, T и т. д.).

7.3.1. Порядок наблюдений с магнитометром ММП

Перед началом измерений необходимо усвоить и далее неукоснительно выполнять порядок наблюдений с магнитометром ММП-203.

1) Магнито-чувствительный прибор (МЧП) располагается над точкой измерения с соблюдением необходимой ориентировки. Для ММП-203С ориентировка выполняется с помощью черты на МЧП, направляя эту черту на север (глазомерно). Для ММП-203Д операция выполняется путем ориентировки оси цилиндрического корпуса МЧП в широтном направлении (также глазомерно).

2) Кратковременным нажатием на кнопку "Пуск" оператор запускает в работу измерительный цикл; после нажатия кнопки примерно через 2 секунды на табло появляется отсчет – пятизначное число, которое характеризует величину модуля вектора индукции T геомагнитного поля в нТл.

3) Записав отсчет, оператор переходит на следующую точку.

На табло магнитометра помимо отсчета высвечивается сервисная информация в виде символов "С" и "–". Символ "'С" отражает прохождение сигнала прецессии. Быстрое исчезновение (мелькание) этого символа свидетельствует о срыве сигнала. Одной из причин срыва на исправном приборе может быть высокая градиентность поля. В этом случае оператор должен отойти от занимаемой точки на расстояние 5 или 10 м снова взять отсчет, отметив в журнале величину и направление своего смещения от аномальной точки. Если при смене места наблюдения мелькание символа "С" остается, то причина – в нарушении электрических соединений, скорее всего в разрыве контактов штепсельных разъемов. Последнее- есть следствие неаккуратного обращения с прибором.

Символ «–" отражает качество питания. Если после нажатия кнопки "Пуск" символ "–" гаснет, это свидетельствует об израсходованности батарейного питания и необходимости его замены при первой возможности. Повышенный расход питания также может служить причиной срыва сигнала.

7.3.2. Предполевая подготовка магнитометров. На производстве очень серьезное, даже придирчивое внимание уделяется работоспособности измерительной аппаратуры. Перед началом полевых работ все магнитометры в обязательном порядке проходят предполевую подготовку. Ее цель – установить соответствие параметров работы каждого экземпляра прибора тем техническим характеристикам, которые установлены для данного типа аппаратуры, а также, если необходимо, экспериментально определить численные значения отдельных параметров. Кроме предполевой подготовки техническое состояние аппаратуры периодически проверяется и в ходе полевых работ.

В процессе методической практики предполевая подготовка магнитометров также должна быть выполнена, хотя и по несколько сокращенной программе. Предполевая подготовка магнитометра ММП-203 имеет целью, прежде всего, проверку соответствия данного экземпляра прибора тактико-техническим данным, установленным для этого типа измерителей. Из основных характеристик ММП-203 отметим следующие:

- средняя квадратическая погрешность единичного измерения не должна превышать ±1 нТл;
- отклонение МЧП от номинальной ориентировки допускается в пределах ±30°.

Для выполнения работы МЧП магнитометра укрепляется на шесте высотой не менее 1 метра. Крепление МЧП должно обеспечивать неизменность его положения в плане и по высоте. Пульт от МЧП относится на длину соединительного кабеля. Ориентировка МЧП уточняется с помощью компаса (исходная ориентировка).

Для оценки среднеквадратической погрешности при неизменном положении прибора выполняется 20 измерений, результаты которых записываются в нижеследующую таблицу:

Таблица 7.1

Таблица определения среднеквадратической погрешности магнитометра ММП-203 №…

Дата, бригада (№ и состав)

№ п/п	Показания прибора T'	δ	δ^2
1	2	3	4
1			
2			
…			
20			
	$T_{ср}$		$\Sigma\delta^2$

Все 20 отсчетов T' берутся друг за другом без ненужных остановок. Каждый из них характеризует величину поля Т в точке, но одновременно любой из результатов осложнен некоторой случайной погрешностью δ, т. е. отсчет по прибору представляется как $T' = T + \delta$. По 20 определениям находится среднее значение

$$\sum_{1}^{20} \delta^2 \qquad (7.1)$$

Выполняя суммирование полученных данных, имеем Σδ. Учитывая случайный характер величины δ, сумма Σδ→0, а Тср оказывается величиной наиболее вероятно соответствующей отметке поля Т в точке установки МЧП.

Таким образом, с большей степенью надежности

Тср=Т.

Разность Т′- Тср=δ отражает величину погрешности, осложняющую каждый из отсчетов. Далее вычисляется δ2 и находится. Среднеквадратическая погрешность m определяется как:

$$m = \pm\sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n-1}}, \qquad (7,2)$$

где n –число измерений поля; в таблице n=20. Если полученная погрешность $m \le 1нТл$, то это означает, что данный экземпляр прибора находится в удовлетворительном состоянии и может быть использован для измерений. Таблица по определению m представляется в отчете, как бригадное приложение № 1.

Следующая поверка направлена на оценку азимутальной погрешности и связана с тем, что ориентировка МЧП при измерениях выполняется глазомерно. При выполнении операции положение МЧП в плане и по высоте должно оставаться неизменным. Меняется его ориентировка. МЧП необходимо повернуть вокруг вертикальной оси к востоку на 300 (азимут 300). В этом положении измерителя необходимо последовательно взять десять отсчетов и вычислить среднее значение. Обозначим его Т30ср. То же самое необходимо проделать, повернув МЧП на 300 к западу (азимут 330) Т-30ср. Все результаты заносятся в ниже следующую таблицу, которая представляется в отчете как бригадное приложение № 2.

Таблица 7.2

Таблица определения азимутальной погрешности магнитометра ММП-203 №…
Дата, бригада (№ и состав)

№ п/п	Показание прибора *T*, нТл	
	Азимут 30°	Азимут 330°
1 2 10		
	$T_{ср}^{30}$	$T_{ср}^{-30}$

Средние значения Тср30 и Тср-30, полученные при ориентировках в азимутах 30° и 330°, сравниваются с величиной Тср, которая получена при номинальной ориентировке (азимут 00). Если разности (Т ср - Тср30) и (Т ср - Тс-р30) не превышают 1 нТл, это означает, что данный экземпляр прибора удовлетворяет техническим условиям на ориентировку МЧП при полевых измерениях.

В заключение необходимо проверить влияние на показания прибора расстояние между МЧП и пультом. Для этого, не меняя исходной установки МЧП, взять 10 отсчетов, каждый раз меняя на 5-10 см расстояние между МЧП и пультом.

Третья поверка выполняется для выявления аппаратурной погрешности ΔТап. Ее определение становится особенно актуальным в том случае, если магниторазведочные работы на площади исследования проводятся несколькими приборами. Необходимость этой поверки обусловлена следующим: каждый экземпляр прибора смонтирован на реальной элементной базе, ее функционирование протекает в определенных допусках, и поэтому в электронной части разных экземпляров приборов прохождение сигналов отличается некоторым своеобразием.

Для выполнения этой проверки на местности в спокойном магнитном поле разбивается профиль длиной 100 метров, на котором точки наблюдения располагаются с шагом 5 метров (всего 21 точка). Каждая бригада со своим магнитометром проводит измерения по всем точкам, в прямом и обратном направлениях. Затем, для каждой точки по двум измерениям, вычисляется среднее значение поля Т. Эти результаты сравниваются с аналогичными данными, полученными эталонным магнитометром, и для каждой точки вычисляется разность между значениями Т, определенными

испытуемым и эталонным магнитометрами. Из полученных 21 значений таких разностей вычисляется средняя величина, которая и представляет аппаратурную поправку ΔТап к показаниям испытуемого магнитометра по отношению к эталонному магнитометру. В качестве эталонного выбирается тот прибор, для которого в ходе выполнения первой поверки получена наименьшая величина среднеквадратической погрешности. В производственных условиях в качестве эталонного следует выбрать магнитометр, работа которого была сопоставлена с показаниями аппаратуры магнитных обсерваторий.

7.4.Полевые измерения

Выполнив предполевую подготовку аппаратуры, студенты приступают к полевым измерениям. В процессе их выполнения каждый студент должен освоить все элементы методики работ, обеспечивающих качественное измерение магнитного поля по всей территории исследования. Применительно к условиям учебно-методической практики, методика магниторазведочных работ включает следующие элементы.

-наблюдение на рядовых пунктах;
-контрольные измерения;
-измерение вариаций;
-топо-геодезические работы.

7.4.1 Рядовая сеть – это систематизированная совокупность множества точек, измерения поля в которых выполняются для решения поставленной геологической задачи. Рядовая сеть – важнейший элемент методики. Этой сетью равномерно и с необходимой густотой покрывается вся территория исследований. Измерения, выполненные по рядовой сети, позволяют выявить распределение магнитных аномалий, которые затем используются для выявления и изучения геологических объектов. Таким образом, создание рядовой сети напрямую связано с характеристикой геологических объектов, подлежащих изучению.

На местности рядовая сеть представляет систему параллельных профилей с расстоянием между ними Δy. По профилям с равномерным шагом Δx располагаются точки наблюдений. Обе величины Δy и Δx являются параметрами рядовой сети, ее размером.

Профили рядовой сети на местности прокладываются вкрест преобладающего простирания горных пород. Размер рядовой сети непосредственно увязан с размерами изучаемых геологических объектов. В тесной однозначной связи находятся размер рядовой сети и масштаб съемки. Так, если Δy=100 м, то масштаб съемки 1:10000. Справедливо и обратное соотношение; например, для масштаба 1: 50000 Δy=500 м. В магниторазведке действует правило – отношение Δy к Δx не должно превышать 10. Только в этом случае магнитная съемка считается площадной, и ее результаты могут быть использованы для построения карты аномального поля. Если расстояние Δy превышает 10Δx, то съемка считается профильной, а по ее результатам построение карты изодинам не допускается.

Измерения по рядовой сети выполняются по однократной схеме, т.е. в каждой точке измерение поля магнитометром проводится один раз.

7.4.2. Контрольные измерения выполняются с целью определения погрешности рядовых наблюдений. Проводятся выборочно, их объем составляет 3-5% от объема рядовой сети. Контрольные измерения должны выполняться независимо, что означает проведение этих измерений в другое время, другим прибором и другим оператором. Контроль также выполняется по схеме рейса, продолжительность которого такая же, как у рядового

рейса. Наиболее представительным является секущий контроль, когда контрольным рейсом охватываются точки, первичные измерения в которых выполнялись в разных рядовых рейсах.

По результатам контрольных измерений образуется некоторое количество рядовых точек, в каждой из которых имеется по два определения поля – в первичном и контрольном рейсах. Сходимость этих результатов характеризует качество измерений поля по рядовой сети.

7.*4.3. Измерение вариаций* необходимо для устранения их влияния на результаты полевой съемки. Основные источники этих вариаций внешние, связи с геологическим строением они не имеют, но на показания магнитометров влияют непосредственно. При решении геологических задач вариации поля создают мешающее влияние и поэтому из результатов измерений должны быть исключены. Чтобы исключить их надо знать, вследствие чего возникает необходимость измерения вариаций. Для этой цели используются МВС. Магнитовариационная станция (МВС) измеряет магнитное поле во времени, поэтому точка ее установки остается неизменной в течение всех полевых работ. Однако поле вариаций неоднородно, и на больших площадях (многие сотни, тысячи кв. км.) приходится использовать несколько МВС, увязывая их работу между собой.

Точка установки МВС выбирается в малоградиентном поле. Должны быть приняты меры к стабилизации температурного режима станции, защита ее от погодных влияний и от мешающих влияний каких-либо металлических масс. МВС работает в автоматическом режиме, ее показания фиксируются через заданный интервал времени. Так, при съемках средней точности этот интервал составляет 5 минут.

На производстве нередко вместо специальной МВС используется обычный полевой магнитометр ММП-203, М-33, ММ-60, обслуживаемый одним оператором.

МВС включается до начала работы полевых магнитометров и прекращает измерения с окончанием их работы. В обязанность оператора МВС входит построение вариограммы по показаниям МВС за текущий день. Вариограмма строится в виде графика, по оси абсцисс которого откладывается время, а по оси ординат – показания МВС через заданный временной интервал.

7.4.4. Топогеодезические работы заключаются в разбивке на местности рядовой сети, начинается с выноса на местность планового положения магистралей, с которых затем задаются и прокладываются профили рядовой сети. Прокладка ведется по азимуту, заданному в проекте (вкрест геологического простирания) с помощью теодолита, буссоли или вешением. По проложенным профилям с помощью мерной ленты (шнура) производится разбивка пикетажа с заданным шагом Δx.

Топогеодезическое обеспечение охватывает, также, закрепление на местности пунктов рядовой сети, определение их координат, геодезическую привязку всей сети наблюдений, определение фактического положения профилей, вынос их на топооснову.

7.4.5. Микромагнитная съемка – это специфический вариант проведения магнитной съемки, направленной на изучение мельчайших особенностей магнитного поля. Такие особенности обычно связаны с неравномерным распределением ферромагнитных минералов по объему горных пород, что может быть использовано для некоторых геологических построений. Например, изучение трещиноватости, флюидальности и т.д. Наиболее широкое применение эта съемка нашла при детальном картировании пород, покрытых немагнитными породами делювия мощностью 1-10 м. Магнитная съемка проводится по отдельным планшетам с применением густой сети наблюдений. В большинстве случаев форма планшета и форма сетки квадратная.

Размеры планшетов от 10 х 10 до 50 х 50 м. Размер сети 1 х 1, 2 х 2 м. и т. д. Съемка, как правило, выполняется с высокой точностью, погрешность измерений менее ± 5 нТл. Поэтому наблюдения ведутся короткими рейсами с привязкой к КП, который выбирается непосредственно вблизи планшета или в его границах. Отсчет на КП, завершающий очередной рейс, используется как начальный для следующего рейса. Высокая производительность работ с ММП-203 и сокращение продолжительности рейсов создает вполне приемлемые условия для учета даже быстротекущих вариаций. Однако при измерениях с погрешностью менее ± 1 нТл. применение МВС при микромагнитной съемке также становится необходимым.

7.4.6. Задание на выполнение полевых работ. Основной объем работ выполняется на участке "Северный". Площадь участка составляет 1,5 км2; его размеры – 2 км по широте и 0,75 км по меридиану. В пределах участка на местности разбивается 7 профилей с интервалом Δy=125 м. В соответствии с геологическими условиями ориентировка профилей широтная. Их нумерация ведется с юга на север и представляет следующую последовательность: III, IIIa, IV, IVa, V, Va, VI.

Южный профиль III и северный профиль VI проложены по просекам.

Пикетаж на профилях разбит через 50 метров; нумерация пикетов от 0 на западе до 40 на востоке. Указанная схема разбивки используется для выполнения наблюдений на площади различными геофизическими методами.

Магнитная съемка на участке "Северный" выполняется в помощь геологическому картированию масштаба 1:10000. Съемка выполняется протонными магнитометрами ММП-203, качество работ определяется среднеквадратической погрешностью ± 5 нТл. По результатам работ должна быть составлена карта изодинам ΔТ с сечением изолиний 10 нТл.

Общая схема расположения сетей на участке "Северный" показана на рис. 7.1.

Приступая к выполнению полевых измерений, бригада должна провести рекогносцировку на местности с тем, чтобы каждый студент четко представлял расположение в натуре участка, мог уверенно и быстро определять расположении всех съемочных точек. Каждая бригада на участке "Северный" выполняет измерения всех видов.

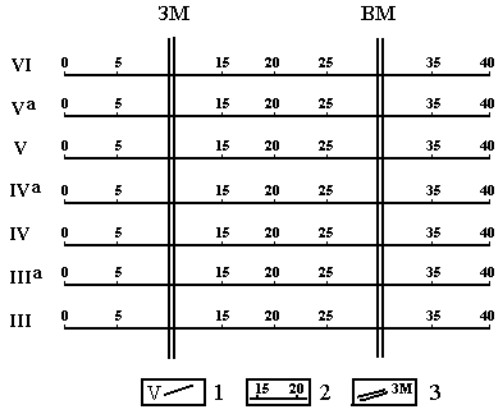


Рис. 7.1. Схема сети наблюдений на участке "Северный".

1 - рядовые профили и их номера; 2 – пикеты и их номера; 3 - магистрали (ЗМ - западная, ВМ - восточная).

Рядовая сеть. Для масштаба 1:10000 минимальное расстояние между точками наблюдения (шаг съемки) составляет 10 м (Δx=10 м.). Измерения с этим шагом будут использованы при построении карты изодинам ΔT масштаба 1:10000. Однако, учитывая сложность строения метаморфических комплексов в районе работ, наблюдения сразу будут проводиться с детализацией. Поэтому на участке “Северный” рядовая съемка будет проводиться с шагом 5 м. Для обозначения точек наблюдения на местности каждая бригада должна использовать мерный шнур длиной 50 метров, предварительно размеченный через 5 м. Шнур растягивается между пикетами профиля. На местности пикеты обозначены колышками с указанием номера профиля (в числителе) и номера пикета (в знаменателе). Например, пикет 18 по профилю V имеет обозначение V/18.

Проложив шнур, бригада ведет измерения с шагом 5 м. При этом в полевом журнале положение точек наблюдения отмечается следующим образом (пример):

V/18; V/18+5м.; V/18+10м.; V/18+15м.…V/18+40м.; V/18+45м.; V/19 и т.д Основной рейс по рядовой сети прокладывается между магистралями и начинается на одной магистрали (например, западной) и заканчивается другой магистрали (например, восточной). Концы профилей – от 30 до 40 пикета и от 10 до 0 пикета – по мере разбивки отрабатываются дополнительными рейсами. Рядовые измерения выполняются по однократной схеме.

На каждой точке записывается номер точки, время наблюдения и показание магнитометра. Конкретное задание на проведение рядовой съемки каждая бригада получает от преподавателя.

Фото 7.2. Наблюдатель Козлов Д. с магнитометром М-27(РФ-99-1)

Детализация. Выполняется для более детального изучения сложной аномальной зоны в восточной части участка “Северный”. Четыре детализационных профиля прокладываются на расстоянии по 50 м. к северу от профилей Va, V, IVa, IV. Протяженность всех детализационных профилей по 400 м (от пикета 32 до пикета 40). На отдельных участках выполняются разновысотные измерения поля.

Контрольные наблюдения так же выполняются рейсами и используются для определения качества измерений поля по рядовой сети. Объем контрольных наблюдений и расположение контрольного рейса для каждой бригады определяется по указанию преподавателя. Контрольные наблюдения, выполненные всеми бригадами, должны в сумме составлять 5% от количества всех рядовых измерений на участке работ.

Запись результатов всех видов измерений с магнитометром ММП-203 производится в полевом журнале. Форма этого журнала представлена в таблице 7.3.

В отчете этот полевой журнал представляется как бригадное приложение 3.

Таблица 7.3

Полевой журнал наблюдений с магнитометром ММП-203

Прибор №… Состав бригады…

№ точки	Время наблюдений	$T_{изм.}$, нТл	δT, нТл	$T_{исп.}$, нТл
1	2	3	4	5

В журнале 5 колонок. Колонки 1-3 заполняются в ходе полевых измерений. В колонках 4-5 ведется последующая камеральная обработка.

Каждый вид работ в журнале отмечается соответствующим заголовком с указанием даты измерений: “Детализация”, “Контрольные измерения”.

Измерение вариации. В процессе всех измерений, выполняемых с магнитометром ММП-203, должны наблюдаться вариации геомагнитного поля. В качестве МВС используется магнитометр ММП-203. С учетом требований, предъявляемых к месту установки, МВС располагается ежедневно в точке V/10. Регистрация вариаций должна начинаться до начала работы полевых магнитометров. В ходе работ оператор МВС должен вести запись вариаций с интервалом 5 минут. По результатам дневных наблюдений оператор МВС строит вариограмму.

Микромагнитная съемка. Этот вид работ завершает программу полевых магниторазведочных наблюдений. Работы ведутся на восточной окраине В.Сысерти в долине реки Сысерть на участке “Футбольное поле”. Съемка проводится на планшетах размером 50х50 м., по сети 2,5 х 2,5; количество точек измерения на планшете 441. Разбивка сети наблюдений осуществляется с помощью мерных шнуров длиной 50 м, предварительно размеченных с интервалом 5 м. Два таких шнура на все время измерений неподвижно закрепляются на западной и восточной границах планшета. Третий шнур располагается широтно и используется для обозначения профиля. После отработки очередного профиля шнур переносится на 2,5 м, параллельно самому себе. Таким образом, обозначается положение следующего профиля, и так далее. Интервалы в 2,5 м между двумя пятиметровыми метками определяются глазомерно.
На каждом планшете нумерация профилей - с юга на север, точек наблюдения –с запада на восток. Так, южный профиль на каждом планшете имеет номер 1, а северный – номер 21. На западном конце каждого профиля точка наблюдения имеет номер 1, а на восточном- номер 21.

Измерения выполняются рейсами; каждый рейс включает два профиля. Взяв в очередной раз отсчет на КП, оператор переходит, например, на профиль 14. В журнале после КП отмечается 14/1, 14/2, 14/3…14/20, 14/21. Не теряя понапрасну время, оператор переходит на соседний профиль, например 15. Измерения продолжаются: 15/21, 15/20,

15/19…15/5, 15/4, 15/3, 15/2, 15/1, КП. Рейс, таким образом, закончен, а заканчивающий этот рейс последний отсчет на КП может стать началом следующего рейса. Если же по окончании очередного рейса оператор делает перерыв, то с возобновлением работы необходимо вновь взять отсчет на КП.

Полигон микромагнитной съемки. На переднем плане Тягунова Я.(РФ-99-1)

7.5. Камеральная обработка результатов измерений

В магниторазведке для изучения геологической среды используются магнитные аномалии. Напомним, что по определению магнитная аномалия ΔТа есть разность между измеренным магнитным полем Т и его нормальным значением Т0:

$$\Delta Ta = T - T0 \qquad (7.3)$$

Инструкцией по магниторазведке для площадей, имеющих сравнительно небольшие размеры, допускается при определении аномалии использовать фоновое значение магнитного поля Тф. Фоновое значение отличается от нормального на некоторую постоянную величину, которая определяется как региональное влияние. Его источником является магнитное поле, создаваемое крупными и очень крупными массами горных пород, которые могут быть расположены даже за пределами площади съемки. В рассматриваемом случае аномалия ΔТа определяется так же, как разность между измеренным значением поля Т и фоновым значением Тф:

$$\Delta Ta = T - Tф \qquad (7.4)$$

Как следует из определения, магнитная аномалия не может быть измерена с помощью какого-либо магнитометра, а может быть только вычислена по результатам полевых измерений. Эти вычисления выполняются в ходе камеральной обработки. Таким образом, основная задача камеральной обработки – это определение магнитных аномалий по материалам полевых измерений. Также в процессе такой обработки в результаты полевых измерений вводятся необходимые поправки, направленные на достижение качества, требуемого при изучении распределения аномального поля на территории участка. Эти поправки определяются особенностями геомагнитного поля и методикой полевых работ.

Основные материалы, используемые для камеральной обработки, включают полевые журналы с записью показаний магнитометров и времени наблюдения на каждой точке, вариограммы МВС, схему отработки участка, материалы контрольных наблюдений. Кроме того, необходимы карта нормального поля Т0 и карта изопор.

7.5.1. Обработка результатов измерений на рядовых пунктах.

В полевом журнале для каждого измерения вносится поправка за вариацию δТ. Поправка для каждого пункта снимается с вариограммы согласно времени наблюдения на пункте и вводится в результат измерения поля с обратным знаком. Таким образом вычисляется исправленное значение поля Тисп :

$$Tисп = Tизм - \delta T, \qquad (7.5)$$

где Тисп- значение поля, исправленное за вариацию; Тизм- измеренное значение поля на пункте;δТ- поправка за вариацию.

В полевом журнале (см. табл. 7.3.) результат измерения поля Тизм записан в колонке 3. Поправка за вариацию δТ, снятая с вариограммы, записывается для каждого пункта в колонке 4. Величина поля, исправленного за вариацию Тисп, отмечается в колонке 5. Далее для обработки используются только исправленные значения поля – цифры из колонки 5.

На листе бумаги формата А4 строится схема каркасной сети участка “Северный”. Чертеж безмасштабный, имеет форму прямоугольника. Следующий шаг – определение нормального магнитного поля. На карте нормального поля Т0 по координатам наносится контур участка работ, и для всех его угловых точек по карте определяются значения нормального поля. Участок “Северный” имеет малые размеры и его положение на мелкомасштабной карте нормального поля может быть обозначено лишь точкой. Ее координаты (как северной окраины пос. В.Сысерть):

500 27' с.ш. и 600 45' в.д.

По этим координатам определяется для участка величина нормального поля Т'0 в эпохе карты. Найденное значение необходимо согласовать с годом проведения работ, для чего вводится поправка за вековой ход ΔТвх. Величина этой поправки определяется как произведение значения векового хода Твх на разность лет между годом проведения работ и эпохой карты нормального поля. Численное значение Твх определяется по карте изопор, для чего на эту карту по координатам также наносится положение участка. Для района В.Сысерти величина Твх составляет ± 12 нТл/год. Знак (+) показывает, что каждый год нормальное магнитное поле в заданном районе увеличивается на 12 нТл. Определив величину и знак влияния вековой вариации, вычисляют значение нормального поля Т0 для участка, приведенное к году выполнения работ:

$$\mathbf{T0 = T0' + \Delta Tвх} \qquad \mathbf{(7.6)}$$

С учетом положений инструкции по магниторазведке дальнейшая обработка проводится по схеме, представленной в формуле (7.4). По материалам ранее проведенных рекогносцировочных работ величина поля в точке VI/10 соответствует уровню фона для участка “Северный”. Таким образом, находим, что согласно формуле (7.4) величина магнитной аномалии в точке VI/10 равна нулю (ΔТ=0), а численное значение Тф для участка равно отметке поля в этой точке.

В отчете обязательно должна быть указано величина ΔТвх и на сколько величина фона Тф, принятая при обработке, отличается от величины нормального поля Т0. Такая информация совершенно необходима для стыковки результатов работ выполненых на соседних площадях, проводимыми разными партиями и в разное время. Подобная цифра может быть определена путем сопоставления ранее найденной величины Т0 с отметкой поля в точке, где его величина соответствует уровню Тф. Такой точкой на участке “Северный” является пункт VI/10. Все бригады измеряли поле в этой точке. Результат каждой бригады, исправленный за вариацию, надо взять с учетом аппаратурной поправки ΔТап (см. поверку 3) и из всех таких определений вычислить среднее значение. Эта цифра будет наиболее верно отражать величину поля в точке VI/10 и, следовательно, величину фона на участке “Северный”. Остается определить разность Тф – Т0 и это число, показывающее отклонение фона от нормального поля, привести в отчете

Таблица 7.4

Журнал камеральной обработки

№ пк	t , час, мин.	$T_{изм}$, нТл	δT, нТл	$T_{исп}$, нТл	ΔTа , нТл
1	2	3	4	5	6
II Ia/30	13,10	5528 7	2	5528 5	100
I V/30	13,14	5526 3	3	5526 0	74
I Va/30	13,16	5529 6	6	5529 0	104
V /30	13,25	5530 1	1	5530 0	113
V a/30	13,31	5526 9	-1	5527 0	82
V I/30	13,40	5519 8	-2	5520 0	10

В таблице 7. 4. представлен фрагмент полевого журнала с разграфкой на 6 колонок. В примере приведен рейс по восточной магистрали участка “Северный”, опирающийся на пункты IIIa/30 в начале рейса и VI/30 в конце рейса. Целью измерений является определение величины магнитного поля в четырех точках внутри рейса. Первые три колонки заполнялись в ходе полевых измерений. Так, в колонке 3 приведено измеренное значение поля Тизм, полученное в каждой точке как среднее из трех последовательных отсчетов на табло прибора. Продолжительность рейса, как это следует из записей в колонке 2, составила 30 минут.

Камеральная обработка начинается с введения поправки за вариацию δТ в результаты измерений во всех точках рейса (в данном примере 6 точек).Величина поправки δТ определяется по вариограмме и записывается в колонке 4. Пример определения величины поправки показан на рис.7.2.,представляющий фрагмент вариограммы за тот день, когда выполнялся рассматриваемый рейс.

На рис. 7.2 криволинейный график изображает вариационные изменения поля Т по показаниям МВС. На графике жечками с номером показаны точки на вариограмме, соответствующие времени измерения на всех шести пунктах рейса. Так, например, точка 3 соответствует времени наблюдения на третьем пункте рейса, которым в данном примере является пункт IVa/30. В этот момент времени отклонение между вариационной кривой и базовой линией (Т мвс - Т нмвс) составило 6 нТл, поэтому величина вариационной поправки для пункта IVa/30 составила δТ3 = 6 нТл.

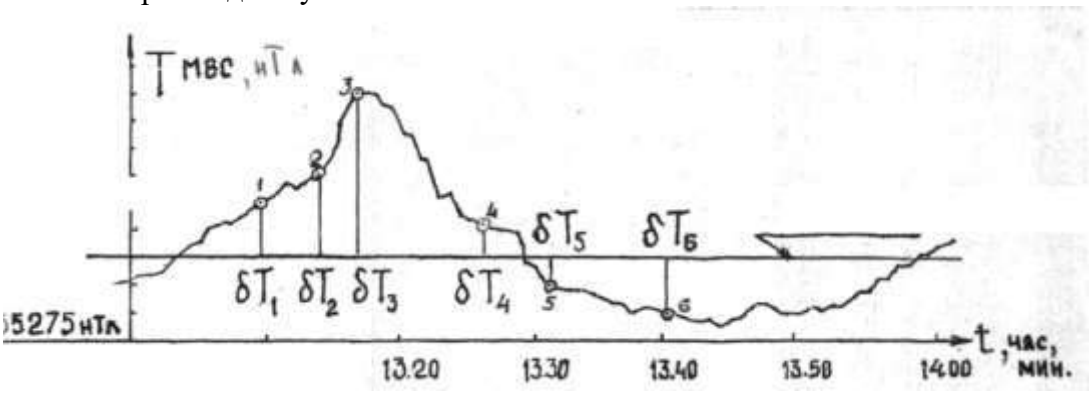


Рис. 7.2. Определение поправки за вариацию δТ.

В конце рейса (точка 6 на графике рис.7.2) отклонение между вариационной кривой и базовой линией зафиксировано в отрицательной области и числено равно 2нТл. Поэтому вариационная поправка для шестой точки рейса (а это пункт IV/30) составила δТ6 = -2 нТл. Величина вариационных поправок для всех точек рейса указана в колонке 4.

Отклонение между вариационной кривой и базовой линией может отмечаться как в положительной (точки 1-4), так и в отрицательной области (точки 5 и 6 на рис. 7.2). Отклонение в положительной области указывает на то, что вариационные колебания поля увеличивали все отсчеты, которые наблюдались в это время. Следовательно, значение поля, свободное от влияния вариации можем получить, вычитая величину вариационной поправки из результата показаний магнитометра. Если же отклонения фиксируются в отрицательной области, то это означает, что все отсчеты, полученные в это время, оказались заниженными за счет влияния вариаций. Поэтому значение поля, свободное от величины вариаций должно быть выше, чем отсчет на табло магнитометра. Следовательно, для таких моментов времени (точки 5,6 на рис. 7.2) величины вариационной поправки (соответственно δТ5 и δТ6) должны добавляться к результату измерения. Из этого примера следует, что поправка за вариацию, определенная по вариограмме, должна вводится с обратным знаком. После введения поправки получаем исправленное значение поля Тисп (формула 7.5). Результат записывается в колонку 5.

Для продолжения камеральной обработки рейса необходимо вычислить величину аномального поля

$$\Delta T_а = T_{исп} - Tф.$$

7.5.2. Обработка результатов контрольных наблюдений также выполняется по ранее описанной схеме обработки рейса.

7.*5.3. Оценка качества измерений по рядовой сети*.

Данные контрольных наблюдений позволяют получить по ряду точек рядовой сети по два значения поля. Одно из них получено в ходе первичного рейса, а второе – в ходе рейса контрольного. По этим материалам составляется ведомость контрольных наблюдений (табл. 7.5). Ведомость составляется бригадой по материалам контрольного рейса, выполненного этой бригадой. В колонке 1 ведомости записываются номера точек, в которых выполнялись контрольные измерения.

Таблица 7.5

Ведомость контрольных наблюдений на участке “Северный”.
Бригада…

№ ПК	$\Delta T_п$, нТл	$\Delta T_к$, нТл	d	d^2
1	2	3	4	5
n			Σd^2	

Поле в этих точках, полученное в контрольном рейсе (ΔТк) записывается к колонке 3. А в колонке 2 записываются значения поля, полученные в первичном рейсе (ΔТп). Затем для каждой точки определяется разность этих значений

$$\mathbf{d = \Delta Тп - \Delta Тк}$$

и результат записывается в колонку 4. В колонке 5 определяются квадраты разностей d2. Вычисляется сумма квадратов по всем точкам (по всей колонке 5). Результат Σd2 записывается снизу колонки.

В колонке 1 подсчитывается количество n проконтролированных точек; результат также подписывается снизу колонки 1. По этим данным вычисляется среднеквадратическая погрешность измерений поля на точках рядовой сети mpc в контрольном рейсе:

$$m_{pc} = \pm\sqrt{\frac{\sum d^2}{2n}} \quad \textbf{. (7.7.)}$$

Для получения наиболее полной информации необходимо учесть материалы контрольных наблюдений, выполненных всеми бригадами. Поэтому каждая бригада к своим данным добавляет данные Σd2 и n от других бригад и вычисляет ΣΣd2 и Σn. Подставляя эти цифры в формулу (7.7), вычисляют среднеквадратическую погрешность измерений поля по рядовой сети в целом по участку работ “Северный”.

Все вычисления общей mpc и mc выполняются на нижнем поле листа, где представлена бригадная ведомость контрольных наблюдений. Этот лист представляется в отчете как бригадное приложение 10.

7.5.4. Обработка результатов микромагнитной съемки выполняется по той же схеме обработки рейса, но с некоторым упрощением. По причинам, изложенным ранее, учебные наблюдения на планшете микромагнитной съемки проводятся без МВС. Поэтому при обработке вычисления Δ Та ведутся непосредственно по Тизм.

Аналогично описанному выше для рядовой сети, ведется вычисление погрешности измерений при микромагнитной съемке. Величина погрешности определяется по формуле (7.7). Ведомость контрольных наблюдений микромагнитной съемки представляется как бригадное приложение 5.

7.6. Оформление результатов измерений

Результаты всех полевых измерений после их камеральной обработки должны быть представлены так, чтобы отчетливо и наглядно отобразить распределение аномального магнитного поля на участке работ. Только в этом случае возможно использование магниторазведочных данных для изучения геологической среды, для решения геологических задач. Практикой выработаны две формы представления результатов. Они взаимно дополняют друг друга и являются средством наиболее выразительного изображения картины распределения аномального магнитного поля на исследуемой площади. Это карта изодинам и карта графиков магнитных аномалий. Оба эти документа являются основными отчетными материалами по результатам полевых измерений. Они отражают картину поля по всей площади работ и составляются с использованием материалов всех исполнителей, всех бригад.

Все это в полной мере относится к работам на участке “Северный”. Поэтому и карта изодинам ΔТ, и карта графиков ΔТа по этой территории представляются как групповые приложения. Рассмотрим подготовку отчетных материалов по участку “Северный”.

7.6.1. Построение карты изодинам ΔТа. На производстве масштаб карты и масштаб съемки должны быть одинаковы. Для учебных целей это требование не совсем удобно. Отсутствие необходимого опыта у исполнителей по составлению таких серьезных документов заставляет еще более отклониться от практики составления карт, которая принята на производстве. Для участка “Северный” карта строится в более крупном масштабе, и работа начинается с создания черновика карты на миллиметровой бумаге. В масштабе 1:2000 по данным топопривязки строится схема профилей, отвечающая их реальному расположению на местности. На практике это называется нанесением фактического положения профилей на топооснову. Отдельными условными знаками отмечается с обоих концов профилей указываются их номера. На каждом профиле через некоторый постоянный интервал нумеруются пикеты; например, 5, 10, 15 и т. д. Все номера точек подписываются под линией профиля аккуратным мелким, но хорошо различимым шрифтом. Линии съемочной сети, вся цифровая информация наносится тушью или тонкой шариковой ручкой, но ни в коем случае не карандашом.

Ранее отмечалось, что для построения карты по участку точки наблюдения должны располагаться на расстоянии не менее 10 м. Поэтому на всех профилях точки наблюдения отмечаются через интервал 5 мм.

После подготовки основы каждая бригада выносит свои данные – это значения ΔТа из колонки 9 журнала (табл. 7.3 и 7.4). На карту из журнала выносятся цифры через одну (Δх = 10 м). В каждой точке карты цифры подписываются над профилем; направление надписей – перпендикулярно профилю. Надписи аккуратным мелким шрифтом (карандаш не использовать!). Работу удобно выполнять вдвоем – один диктует, другой пишет значения на карте ΔТа. На длинных профилях особенно важно постоянно контролировать ход работы. Например, считывая в журнале отметку поля на пикете с определенным номером, убедиться, что на карте эта отметка наносится именно на данном пикете. После вынесения всей цифровой информации можно приступать к выполнению основной части работы – проведен ию изолиний. В магниторазведке изолинии магнитного поля называются изодинамы. Сечение изодинам берется 3 m c.

По определению изолиния – это линия, соединяющая точки с одинаковых значений поляΔТа. Данное теоретическое положения могло быть рабочим правилом, если бы во всех точках значения поля были бы определены абсолютно точно. На практике абсолютно точных измерений не бывает. Поэтому проведение изолиний, согласно их теоретическому определению, представляется весьма жестким правилом, не учитывающим реальное положение дел. А реальность в том, что любое измерение выполняется с некоторой погрешностью. Так, на участке “Северный” определения аномального поля на точках рядовой сети выполнены с погрешностью ± m c (см. формулу 7.7). А это означает, что в любой точке рядовой сети, где в ходе работ определено значение поля ΔТ, истинное значение поля с большой степенью вероятности заключено в интервале

$$(\Delta T - m\,c) \le \Delta T \le (\Delta T + m\,c)\text{, нТл} \qquad (7.8)$$

Например, по результатам всех работ точность определений поля составила m c = ± 10 нТл. Пусть в некоторой точке величина аномалии определена как ΔТа = 93 нТл. С учетом формулы (7.8) истинное значение заключено в интервале от 93 до 103 нТл.

Следовательно, через эту точку с достаточным основанием можно провести изодинаму с отметкой 100 нТл. Из примера и из формулы (7.8) следует, что каждая изодинама проводится в полосе значений от - m c до + m c . Ширина полосы, таким образом, составляет 2 m c - две погрешности съемки и тем уже, чем выше точность измерений. С учетом сказанного выше для практической работы может оказаться более целесообразным рассматривать изодинаму как границу, отделяющую область с одним уровнем значений от области с другим уровнем значения поля. Немалую помощь в проведении изодинам может оказать обращение к карте графиков поля.

На участке “Северный” измерения выполнялись по прямоугольной сети ($\Delta y > \Delta x$). Выбор формы сети определяется тем, что геологические объекты в районе в подавляющем большинстве своем имеют вытянутость в субмеридианальном направлении. Если принять, что распределение аномального магнитного поля отражает распределение геологических тел, то субмеридианальная вытянутость аномалий должна быть преобладающей. Из этого очевидного утверждения вытекают два важных для практики положения. Одно из них касается спорных участков, где густота сети оказывается недостаточной для уверенной ориентировки изолиний – по отметкам поля в имеющихся точках возможны разные варианты ориентировки изодинам. В этих спорных случаях как более оправданный принимается вариант ориентировки согласно простиранию.

Другое положение также касается ориентировки изодинам на карте. Особенно оно актуально для прямоугольных сетей. Суть его в следующем. Если изодинама (или изодинамы) вытягивается вдоль какого-либо профиля, то к геологии это отношения не имеет, а является результатом грубых ошибок. Именно так на практике подходят к оценке подобной картины, и в подавляющем большинстве случаев такая оценка оказывается справедливой. Убедиться в отсутствии ошибок в записи чисел. Затем следует просмотреть полевой материал и убедиться в соблюдении необходимых требований при выполнении соответствующего рейса. Убедительные доказательства справедливости странной картины поля могут быть получены лишь по результатам контроля в секущем рейсе.
Работа по построению изодинам ведется под руководством преподавателя,и составление черновика карты изодинам считается законченным, когда сняты все спорные вопросы или неясные вопросы. После этого карта копируется на лист формата А1. Копируется все содержание черновика за исключением массива отметок поля. Вположительных полях изображаются сплошными линиями, а в отрицательных – пунктиром. Изодинама с нулевой отметкой показывается штрих пунктиром.

Далее выполняется раскраска карты и ее зарамочное оформление. Положительные аномалии закрашиваются синим цветом, отрицательные – красным цветом. В обоих случаях интенсивность окраски усиливается с увеличением отметок изодинам. Для этого составляются интервалы тональности, которые затем обозначаются в шкале раскраски. Поле в интервале от первой отрицательной изодинамы до первой положительной окрашивается в желтый цвет. Лучший способ раскраски - отмывка карты анилиновыми, акварельными красителями или гуашью. Раскраску можно выполнить и карандашом; для этого грифель измельчить в тонкий порошок, а раскраску вести ватным тампоном. Чтобы карта смотрелась достаточно хорошо, раскраску следует вести в пастельных тонах. Над рамкой карты указывается ее название, масштаб, год и составитель:

Карта графиков ΔTa
участок “Северный”
м-б 1:2000

1см – 20 нТл
2000 год гр. РФ-97- 3

На нижнем поле показывается линейный масштаб и шкала раскраски. Остальное место отводится для условных обозначений. Пример карты изодинам ΔТа приведенных на рис.7.3.

7.*6.2.Построение карты графиков* ΔТа. Как и при построении карты, прежде всего, подготавливается топооснова с расположением всех профилей и остальных элементов сети. Основа также строится на листе миллиметровой бумаги в том же масштабе 1:2000. Учитывая детализационный характер измерений по профилям “Северного” участка, бригады выносят свои данные на профили с шагом 5 м (2.5 мм в масштабе чертежа). Масштаб по оси ординат 1см – 20 нТл. С учетом этого масштаба каждый результат из колонки 6 журнала откладывается соответствующим отрезком и обозначается точкой. Точки соединяются ломаной линией, представляющей график по профилю. Для очень больших значений ΔТа график поля может выходить за пределы листа. В этом месте график следует прервать и в месте разрыва графика цифрой указать величину поля.

Пример карты графиков ΔТа приведен на рис.7.4.

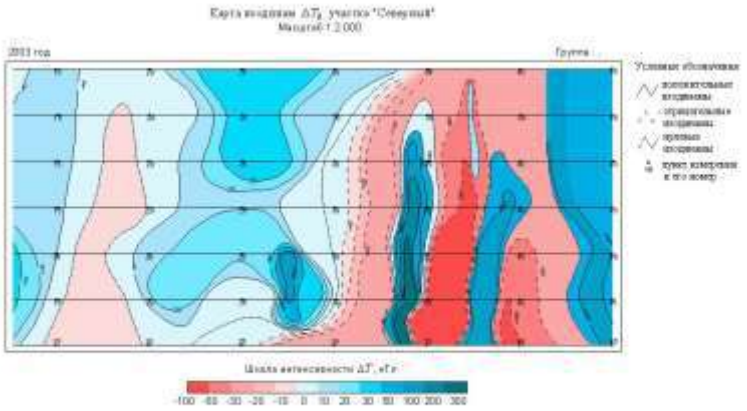


Рис. 7.4 Пример карты графиков ΔТа приведен

Результаты микромагнитной съемки каждой бригадой представляются в виде карты изодинам ΔТ по планшету микромагнитной съемки. Чертеж выполняется на миллиметровой бумаге в масштабе 1:250. В этом случае точки наблюдения располагаются по сетке 1х1 см. Во всем остальном работа аналогична составлению карты изодинам ΔТа по участку “Северный”. Название чертежа:

Карта изодинам ΔТа
Планшет микромагнитной съемки №
м-б 1:250
ММП-203 №

Данный чертеж является бригадным приложением 6. Пример карты графиков ΔТа приведен на рис.7.5.

7.7. Отчетность

Каждый студент самостоятельно составляет письменный отчет по итогам практики по методу. Такой отчет – это, прежде всего, технический текст. Для подобных работ основными свойствами должны являться целенаправленность, доказательность, лаконичность. Составление отчетной технической документации, напомним еще раз, является элементом учебы и наравне с другими разделами входит в программу учебно-методической практики.

В отчете студент представляет свое понимание всей системы организации работ, направленных на получение кондиционной картины распределения аномального магнитного поля, как основного средства изучения геологической среды с помощью магниторазведки. В отчете по учебной практике необходимо указать суть, а также дать обоснование необходимости той или иной операции, того или иного технологического приема. В тексте обязательны ссылки на графические приложения. Обращение к графике, органичное ее включение в текст позволяет заметно сократить объем отчета, повысить доказательность.

7.7.1.Содержание отчета. Отчет по магниторазведке включает пять разделов, введение и заключение.

Введение: указываются цели и задачи практики, временные рамки, целевая направленность измерений магнитного поля.

Физико-геологические предпосылки к применению магниторазведки.

2.Аппаратура.

2.1. Магнитометр ММП-203.

а - назначение магнитометра, принцип действия и главные элементы устройства;

б - порядок наблюдения на точке;

в - предполевая подготовка; основные операции, их смысл и назначение, техника выполнения.

3. Методика полевых работ.

3.1. Составные элементы методики.

3.2. Рядовая сеть; определение, назначение, выбор параметров, разбивка на местности, методика измерений.

3.3. Детализация восточной аномальной зоны.

3.4. Контрольные измерения; назначение, организация измерений.

3.5. Измерение вариаций : суть, назначение, организация измерений, оформление и использование результатов.

3.6. Топогеодезические работы: суть, содержание, техника выполнения.

4. Камеральная обработка результатов измерений.

4.1. Задачи камеральной обработки.

4.2. Камеральная обработка наблюдений по рядовой сети и контрольных наблюдений.

4.3. Определение погрешности выполненных наблюдений.

5. Оформление результатов измерений. Виды основных отчетных документов, правила и техника их составления и оформления.

В заключение указывается краткая характеристика полученных результатов, их геологическая отдача; выводы по итогам учебно-методической практики по магниторазведке.

К отчету прилагаются графические приложения, единые для всей бригады (бригадные приложения). Кроме того, по результатам работ всех бригад прилагаются групповые приложения.

7.7.2.Бригадные приложения к отчету:

Приложение 1. Таблица определения среднеквадратической погрешности магнитометра ММП-203.

Приложение 2. Таблица определения азимутальной погрешности магнитометра ММП-203.

Приложение 3. Полевой журнал наблюдений с ММП-203.

Приложение 4. Ведомость контрольных наблюдений на участке “Северный” (здесь же указывается и общая величина погрешности по материалам всех бригад).

Приложение 5. Ведомость контрольных наблюдений по микромагнитной съемке.

Приложение 6. Карта изодинам ΔTa . Планшет микромагнитной съемки.

7.7.3.Групповые приложения:

Приложение 1Г. Вариограммы.

Приложение 2Г. Карта графиков ΔTa по профилям участка “Северный”. Масштаб 1:2000, в 1 см – 20 нТл..

Приложение 3Г. Карта изодинам ΔTa участка “Северный”. Масштаб 1:2000.

Все бригадные графические приложения помещаются в конверт и вместе с текстами отчетов всех членов бригады сдаются преподавателю для проверки. После возможных исправлений и дополнений бригада сдает зачет по методу. До этого должны быть выполнены все групповые приложения.

Учебно-методическая практика за отведенное короткое время позволяет ознакомиться лишь с главными элементами организации магниторазведочных работ. Реальная практика преподносит массу нюансов, выдвигает много разномасштабных проблем. Овладеть всеми тонкостями работы можно только по мере накопления опыта практического выполнения этой работы в реальных полевых условиях. Классными специалистами не рождаются, ими становятся.

Библиографический список

1.Гринкевич Г.И. Магниторазведка: Учебник для техникумов. - М.: Недра, 1987. –248с.

2.Дементьев Г.Я. Протонные магнитометры: Учебное пособие. –Екатеринбург. Изд-во УГГГА, 1992. – 80 с.

3.Дементьев Г.Я. Магниторазведка: Курс лекций. Ч.1. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1996.- 32 с.

Глава 8

Гравиметрия

доц. В. В. Суворов, проф. В. В. Филатов

Мы пойдем с тобой в гравиразведку,

Хоть и давит на нас "дельта же".

Ю. Сконечный, выпускник СГИ 1962 г.

8.1. Задачи практики

Учебно-методическая практика по гравиметрии имеет своей целью ознакомление студентов с техникой и методикой производства гравиметрической съемки путем ее самостоятельного выполнения под руководством преподавателей. Программа практики включает в себя:

изучение вопросов подготовки гравиметра к полевым работам, заключающихся в определении точности наводки, регулировки уровней, определении характера смещения нуль пункта и цены деления;

проведение площадной гравиметрической съемки и определении высот пунктов измерения силы тяжести;

выполнение камеральной обработки результатов гравиметрической съемки, построении карты изоаномал силы тяжести в редукции Буге, написании и защите отчета.

В организационном отношении все вида работ, предусмотренных программой практики, выполняются гравиметрическими бригадами, на которые делится академическая группа. Состав бригад 4-5 человек. Топогеодезические работы по определению высот пунктов измерения силы тяжести осуществляются отдельной топобригадой, в которую каждая гравиметрическая бригада кооптирует по одному человеку. Поэтому результаты нивелировки являются общими для всех гравиметрических бригад. Все гравиметрические бригады независимо друг от друга проводят площадную съемку на одном и том же полигоне, профили которого разбиты на улицах п. Верхняя Сысерть. Каждая бригада составляет свою карту изоаномал. Результаты всех работ являются общими для членов бригады, но отчет по практике пишет каждый студент. Защита отчетов производится побригадно путем собеседования преподавателя с членами бригады. Оценка работы бригада является индивидуальной оценкой каждого ее члена.

8.2. Подготовка гравиметров к полевым работам

Устройство гравиметров, сравнительная характеристика их различных модификаций" порядок работы на точке описаны и здесь не рассматриваются.

Подготовка приборов начинается с осмотра и устранения механических неисправностей. Подъемные винты должны иметь целую резьбу и плавный ход, микрометренный винт должен иметь также свободный плавный ход.

Регулировка четкости изображения индекса маятника и освещенности шкалы микроскопа осуществляется перемещением по высоте и поворотом патрона лампочки осветителя.

Перестройка диапазона измерений производится с помощью специального ключа (для гравиметров типа ГАК-7Т и "Дельта"), или отвертки (для гравиметров ГР/К 2). Предварительно микрометренным винтом устанавливается нужны отсчет, например, около 7,0, если на участке съемки положительные и отрицательны приращения силы тяжести могут иметь примерно одинаковую величину. Вынув пробку на верхней панели гравиметра, в отверстие вставляется ключ и поворотом внешнего стержня ключа против часовой стрелки откручивается контргайка. Если индекс маятника не виден, то небольшим наклоном прибора в ту и другую сторону и легким постукиванием подушечеками пальцев по корпусу прибора определяется положение индекса – в левой или правой стороне. Если индекс маятника ушел вправо (в сторону уменьшения силы тяжести), то внутренний стержень ключа нужно плавно поворачивать против часовой стрелки и одновременно внешний по часовой стрелке. Так вращать до выхода индекса на средину шкалы. В случае смещения индекса маятника влево поворот стержней ключа осуществляется в противоположные стороны. После регулировки в обоих случаях внешний стержень поворачивается по часовой стрелке до упора. В гравиметрах типа ГР/К 2 винт поворачивается по часовой стрелке, если индекс ушел вправо. Перестройка диапазона выполняется перед началом учебной практики преподавателем.

8.2.1. Определение точности наводки

Определение точности наводки индекса осуществляется с целью получения навыков взятия отсчета и определения качества прибора. Для этого гравиметр приводится в рабочее положение и, не меняя его, берется подряд одним студентом серия отсчетов (не менее 15), совмещая каждый раз индекс с нулем шкалы и сбивая полученный отсчет поворотом микрометренного винта. Эта операция должна выполнятся по возможности быстрее, чтобы на результаты меньше сказывалось влияние смещения нуль пункта. По результатам таких наблюдений каждый студент вычисляет точность наводки по своей серии отсчетов

8.2.2. Определение цены деления.

Цена деления гравиметра может быть определена двумя способами:

1) на пунктах с известными значениями силы тяжести;

2) методом наклона.

Программой практики предусмотрено определение цены деления только первым способом. Для этого выполняются многократные измерения по цикловой схеме между двумя пунктами с известным изменением поля силы тяжести между ними.

8.2.3. Определение смещения нуль пункта

Определение смещения нуль пункта выполняется в течение 3 часов на одной точке с иммитацией перехода, т.е. прибор на точке приводится в рабочее положение, снимается отсчет и время, оператор с прибором проходит примерно 50 м, снова возвращается на ту же точку, берется отсчет и время и т.д. По результатам наблюдений строится график. Здесь,где S0-

начальный отсчет, Si - отсчет в момент ti. По графику (рис.8.1), исходя из заданной точности, определяется эф-максимально допустимое время рейса, соответственно для съемки по опорной и рядовой сети. В рассмотренном примере (рис.8.1.) при точности опорной сети оп =0,04 мГал допустимая погрешность оп =2,5 = 0,10 мГал, смещение нуль пункта может считаться линейным в течение 2 часов. Для рядовой съемки =О.О8 мГал =2,5=0,20 мГал иэф.ряд.=3 часам.

Исследование смещения нуль пункта должно выполняться в течение 8-10 часов, но из-за недостатка времени в учебных цепях ограничено тремя часами.

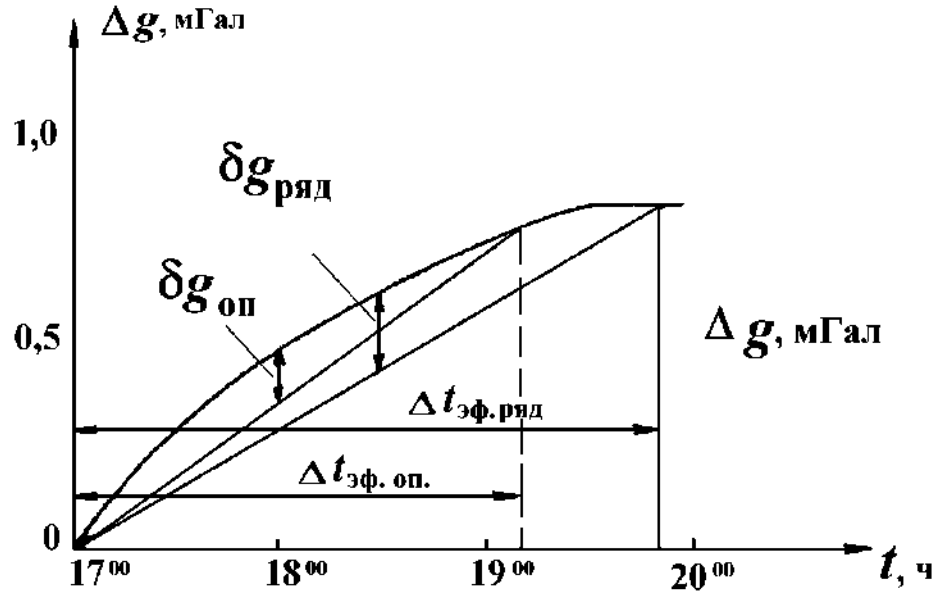


Рис.8.1. Пример графика смещения нуль-пункта.

8.2.4. Регулировка уровней на минимум чувствительности к углу наклона

Эта регулировка заключается в том, чтобы придать горизонтальное положение плоскости, в которой должны лежать ось вращения и центр тяжести рычага чувствительной системы гравиметра при его горизонтальном (по уровням) положении. На рис. 8.2 показано взаимное расположение рычага чувствительной системы, оси его вращения, продольного и поперечного уровней, подъемных винтов гравиметра, а также изображение окулярной шкалы и подвижного индекса. При горизонтальном положении плоскости и гравиметра момент силы тяжести достигает максимальной величины, т.е. в этом случае измеряемое значение силы тяжести жести близко к истинному. Момент силы тяжести и угол наклона в общем случае связаны косинусоидальной зависимостью, которая при малых углах наклона хорошо аппроксимируется параболой, а положение ее вершины соответствует горизонтальному положению рычага.

Регулировка уровней осуществляется следующим образом:

Гравиметр устанавливается на прочное неподвижное основание в тени и в удалении от качающихся деревьев и работающих двигателей и горизонтируется по уровням с помощью подъемных винтов.

Поворачивая ручку микрометренного винта, совмещают индекс рычага с нулевым штрихом на окулярной шкале и снимают отсчет (S0)с микрометрических шкал.

3) Отмечают на головке подъемного винта 6 (рис. 8.2) карандашом какую-либо риску и записывают в журнал измерений ее номер (n0) рядом с отсчетом S0.

Поворачивают головку винта 6 на одно деление вправо (или влево). В этом случае индекс рычага смещается в сторону от нулевого штриха. С помощью микрометрического винта индекс возвращают в исходное положение (совмещают с нулевым штрихом окулярной шкалы) и
опять записывают два числа: отсчет S1 по микрометрическим шкалам и номер риски на головке подъемного винта 6. Эта процедура повторяется 4-5 раз. По результатам измерений строится правая (или левая) ветвь параболы (рис. 8.3).

Поворачивая последовательно головку винта 6 на одно деление, гравиметр наклоняют в противоположную сторону и по парам чисел S+i и n+i строят вторую ветвь параболы (рис. 8.3).

6) Если отсчеты по микрометрическим шкалам при одинаковых наклонах гравиметра вправо и влево относительно исходного положения подъемного винта 6 (n0) различаются, то это означает, что рычаг отклонен от горизонтальной плоскости и необходима регулировка уровней на минимум чувствительности.

7)Регулировка уровней производится следующим образом. С помощью микрометрического винта на шкалах устанавливается минимальный отсчет Smin, соответствующей вершине параболы. Затем, наклоняя гравиметр поворотом головки подъемного винта 6, совмещают индекс рычага с нулевым штрихом на окулярной шкале. Пузырек поперечного уровня 7 при этом сместится. Поворачивая шпилькой юстировочные винты этого уровня, его выводят на середину. На этом заканчивается регулировка уровней на минимум чувствительности к наклону.

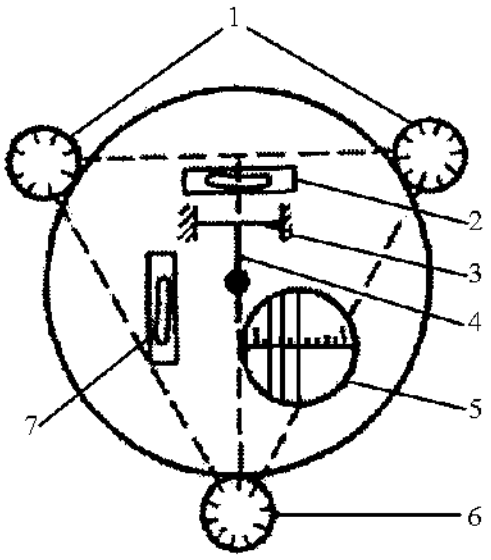


Рис.8.2. Схема расположения некоторых элементов гравиметра: 1-подъемные винты; 2-поперечный уровень; 3-ось вращения рычага; 4- рычаг; 6-подъемный винт в плоскости вращения рычага; 7-продольный уровень.

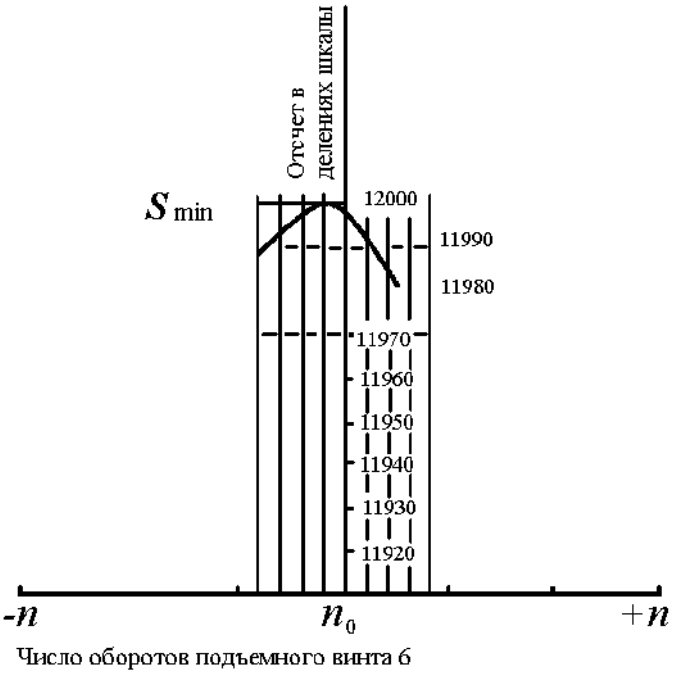


Рис.8.3. Зависимость показаний гравиметра от угла его наклона

8.2.5. Правила хранения и обращения с гравиметром

Прибор в нерабочее время хранится в специальном помещении при температуре близкой к температуре воздуха в рабочее время с тем, чтобы во время работы изменение температуры внутри прибора имело один знак, например, температура только повышалась или только понижалась. Резкое изменение температуры и особенно знакопеременное приводит к трудноучитываемым ошибкам за счет нелинейного смещения нуль-пункта. Гравиметр должен храниться в отнивелированном по уровням положении, индекс маятника должен быть выведен на нуль.

На время работы прибор получается студентом у ответственного за хранение лица и сразу же проверяется его исправность, главное внимание обращается на целость, кварцевой системы. После работы гравиметр сдается преподавателю и тот тоже проверяет исправность прибора. Самостоятельно студенту брать прибор и ставить его обратно на место хранения запрещается.

Категорически запрещается: оставлять прибор без присмотра даже на малое время, оставлять прибор в студенческом общежитии, ставить прибор на стул, подобные неустойчивые предметы. При переноске прибора и установке его на землю необходимо исключить возможность удара о землю, деревья и т.п.

8.3. Методика площадной гравиметровой съемки

В начале полевых работ подготавливается сеть наблюдений. Площадная съемка выполняется по улицам пос. Верхняя Сысерть, в связи с этим расстояние между профилями не соответствует общепринятому и равно 120-150 м. Расстояние между пикетами, которые на профилях 11-14 совмещены со столбами линии электропередачи, составляет 40-50 м.

Подготовка сети наблюдений выполняется согласно действующей инструкции по топоработам и заключается в следующем: с помощью теодолита и мерной ленты разбивается профиль I с шагом 50 м по северной окраине поселка; промеряется расстояние между пикетами по профилям II-1У; увязываются со всеми профилями крайние магистрали; выполняется нивелирование сети наблюдений.

Сеть наблюдений гравиметровой съемки соответствует масштабу 1:10000. Согласно "Инструкции по гравиразведке", средняя квадратическая погрешность определения аномалии в редукции Буге = 0,08 мГал. Взяв из той же таблицы значение средней квадратической погрешности наблюденных значений,студенты должны расчитать погрешность рядовой и опорной сети по формулам:

Зная и, по графику смещения нуль пункта определяется предельное время рядового рейса и рейса по опорным точкам.Опорная сеть, как известно, служит для приведения результатов измерений к абсолютному или некоторому относительному уровню силы тяжести, а также для учета смещения нуль-пункта в рядовых рейсах. Опорная сеть на полигоне "Верхняя Сысертъ" создается по центральной системе. Все опорные пункты (ОП) связываются с центральным опорным пунктом (ЦОП) цикловой схемой наблюдения. Рядовая съемка выполняется рейсами, опирающимися на опорные точки. Контроль выполняется диагональными ходами, причем каждый рядовой рейс должен быть проконтролирован минимум двумя точками, желательно в средней части рейса. Результаты наблюдений заносятся в полевой гравиметровый журнал.

Таблица 8.1.

Полевой гравиметровый журнал

Дата 8.06.82 Исходная точка 11/0
Рейс рядовой Опорные точки 11/0,11/12
Профиль 11 Цена деления -6,34 мГал/дел.
Гравиметр ГАК № 545

Номера точек	11/0	1	2	…
S	7	7		
B_1	635	648		
B_2	643	653		
B_3	640	655		
B_4	643			
B_5	645			
$B_{ср}$	641	652		
Время	8,24	8,29		

Оператор_____

При выполнении измерений на ЦОП и ОП берется минимум 5 отсчетов, величины которых должны различаться не более чем на 0,01 оборота микрометрического винта. Отсчеты различающиеся по величине, более чем на 0,01 оборота микрометрического винта, бракуются, а измерения продолжаются до тех пор пока не будет выполнено вышеприведенное условие. На каждой рядовой точке берется как минимум 3 отсчета. Время измерений записывается после взятия последнего отсчета. При измерениях недопустима смена оператора (наблюдателя) на внутренних точках рейса.

8.3. Камеральная обработка результатов измерений

8.3.1. Обработка результатов измерений на опорных пунктах. Камеральная обработка результатов измерений на опорных пунктах заключается в определении приращений силы тяжести между двумя опорными точкам и поформуле

Здесь S1' и S1"-средние отчеты в начале и в конце цикла на первой опорной точке, S2-средний отчет на второй опорной точке.

Затем вычерчивается схема расположения ОП полигона "Верхняя Сысерть", на которую выносятся значения изменений силы тяжести между ОП и ЦОП, полученными всеми гравиметрическими бригадами. Стрелками на схеме показываются направления изменения силы тяжести. Расхождения между изменениями силы тяжести на каждой связи между ОП и ЦОП не должны превышать утроенной проектной среднеквадратической погрешности (3). Если на какой-либо связи эти расхождения превышают 3, то измерения силы тяжести на этой связи необходимо повторить. По измеренным изменениям силы тяжести для каждой связи вычисляются их средние значения. Абсолютная величина силы тяжести на ЦОП принимается равной нулю. Тогда твердые значения силы тяжести на каждом ОП будут равны средним, значениям изменения силы тяжести между ЦОП и соответствующими ОП. Полученные, таким образом, значения силы тяжести (твердые значения) на ОП, являются общими для всех гравиметрических бригад академической группы при построении каждой бригадой карты изоаномал силы тяжести в редукции Буге.

8.3.2.Обработка результатов измерений на рядовых точках

Рядовые наблюдения выполняются рейсами, опирающимися на ОП. Камеральная обработка результатов измерений на рядовых точках выполняется в "Журнале обработки рейсов" (табл.8.2.). Каждый рейс обрабатывается отдельно. В графы "№ точек", "Время" и "Отсчет(S)" переносятся данные из Журнала полевых наблюдений. Вычисляются и записываются со своим знаком в графу "" приращения отсчетов на каждой точке относительно начальной точки рейса. Аналогично вычисляется в минутах. По формуле

приращение отсчетов переводятся в мГал и записываются в графу "". Смещение нуль пункта определяется следующим образом. В графе "" по твердым значениям силы тяжести на опорных точках рейса определяется приращение силы тяжести на конечной точке рейса и это значение записывается в графу " исправленное за смещение нуль пункта" против конечной точки рейса. Коэффициент смещения нуль пункта определяется по формуле

В нашем примере для первого рейса K=

Журнал обработки рядового рейса

Дата наблюдений_____

Рейс_____

Полевой гравиметровый журнал №_____

Исходный пункт_____

Опорные точки_____

Гравиметр № 370_____

Коэффициент смещения нуль-пункта K=0,022 мГал/мин.

Таблица 8.2

Номера точек	Время (t), ч, мин.	Отсчет (S)	ΔS	$\Delta g'' = c \cdot \Delta S$, мГал	Δt, мин.	$k \cdot \Delta t$, мГал	$\Delta g'_{испр}$ за смещение нуль пункта, мГал	Δg, мГал
I/0	10,17	6,540	0	0	0	0	0	0
II/0	10,23	6,365	1,19	1,19	6	0,12	1,31	1,31
III/0	10,28	6,090	3,06	3,06	11	0,22	3,28	3,28
IV/0	10,34	5,802	5,02	5,02	17	0,38	5,40	5,40
K=-0,013								
IV/0	10,34	5,802	0	0	0	0	0	5,40
III/0	10,40	6,112	0,310	-2,11	6	-0,08	-2,19	3,21
II/0	10,47	6,384	0,582	-3,96	13	-0,17	-4,13	1,27
I/0	10,52	6,563	0,761	-5,17	18	-0,23	-5,40	0

Вычислил _____

Проверил _____

Смещение нуль-пункта на каждой точке вычисляется по формуле , где - приращение времени на соответствующей точке. Вычисляются для каждой точки приращения силы тяжести, исправленные за смещение нуль-пункта, как алгебраическая сумма и поправки за смещение нуль-пункта . Вычисляются и записываются в графе против каждой точки рейса

наблюденные значения силы тяжести, приведенные к уровню исходной опорной точки, как алгебраическая сумма на начальной точке рейса и в данной точке.

По результатам обработки измерений на опорных пунктах составляется "Ведомость опорной сети".

Таблица 8.3

Номера точек	Δg_1	Δg_2	Δg_3	Δg_4	$\Delta g_{ср}$	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4				
						в ед. 10^{-2} мГал				в ед. 10^{-4} мГал			
I/0	0	0											
II/0	1,13	1,27			1,29				4				
III/0	3,28	3,21			3,24				16				
IV/0	5,40												
									Σ_1			^{2}	

$$\sum \delta^2 = \sum_1 + \sum_2 + \dots$$

Число колонок в "Ведомости" соответствует максимальному числу измеренных приращений на ОП. На каждой точке вычисляются и - отклонения от среднего. Если число измеренных приращений на точке больше трех и одно из приращений отличается от среднего на величину, превышающую утроенную проектную точность опорной сети, то это приращение бракуется. Если число приращений на точке равно двум (трем) и максимальное расхождение превышает выполняются два (одно) дополнительных наблюдения и отбраковку осуществляют в соответствии с вышеуказанным требованием. Отбраковка производится непосредственно в "Ведомости", перечеркиванием отбракованных значений и значения для них не вычисляются.

8.*3.3. Камеральная обработка результатов контрольных измерений* выполняется также, как и результатов рядовых измерений в таком же журнале. Наблюденные значения силы тяжести на точках контрольного рейса и на соответствующих им точках рядовых рейсов вносятся в "Ведомость контрольных наблюдений".

Таблица 8.4.

Ведомость контрольных наблюдений

Номера точек	Номер рейса и дата первичного наблюдения	Номер рейса и дата контрольного наблюдения	Δg ,мГал		$\Delta g_{ср}$	d	Примечание
			первичные	контрольные			

Вычислил_____ Проверил _____

Рейс признается доброкачественным, если отклонения рядового и контрольного наблюдений от их среднего не превышает утроенную величину проектной ошибки. В противном случае контролируются измерения на смежных с проконтролированными точками рядового рейса. Рейс бракируется, если контролем выявлено недопустимое расхождение наблюденных значений на трех и более точках этого рейса.

Оценка качества рядовой съемки выполняется по формуле двойных

наблюдений

8.3.4. Вычисление аномалий силы тяжести

После получения твердых значений на всех точках съемки вычисляются аномалии силы тяжести в редукции Буге. Предварительно по результатам нивелирования определяются абсолютные высоты Н, всех точек наблюдения и по этим высотам определяется поправка Буге

Поскольку участок съемки небольшой, то можно предварительно вычислить изменение нормального значения силы тяжести с изменением широты точки наблюдения - в мГал/м. Для широты пос.В.Сысерть (=56030') изменение с изменением широты на 1' составляет 1,4 мГал; радиус Земли в средних широтах можно принять равным среднему радиусу Земля, т.е. R3 = 6371200 м; примем равным 1' или 0,000292 радиан.

Профили на участке съемки располагаются широтно, поэтому для самого южного профиля 1V можно принять=0, а для остальных профилей вычислять, мГал

Здесь х- расстояние от профиля 1У по меридиану до соответствующего профиля. Значения Н, , вносятся в "Каталог рядовых пунктов".

Таблица 8.5

Каталог рядовых пунктов.

Координаты		Высота пункта	Наблю-денное значение силы тяжести	Поправка			Аномалия	
x	*y*			за нормальное значение силы тяжести	Фая	Буге	Фая	Буге

Рельеф местности на участке съемки сравнительно спокойный и представляет собой монотонный склон, поэтому специальные работы по определению топопоправки не проводятся, а влияние рельефа при интерпретации может быть учтено совместно с региональным фоном.

По результатам съемки строится каждой бригадой план изоаномал силы тяжести в редукции Буге с сечением изоаномал, кратным 2,5. Изоаномалы проводятся путем линейной интерполяции, при чем, вначале выполняется строгая интерполяция между точками наблюдений, а затем изолинии сглаживаются в пределах фактической среднеквадратической погрешности аномалий. Замкнутые изоаномалы проводятся не менее, чем по трем точкам. Каждая пятая изоаномала должна утолщаться. Изоаномалы, проведенные неуверенно, вычерчиваются пунктиром. На план наносится геологическая ситуация(рис.8.4).

Выполняется качественная интерпретация плана изоаномал. Учитывая геологическое строение района и плотностную характеристику пород, выявляется источник регионального фона, выделяются и объясняются локальные аномалии.

8.4. Содержание и оформление отчета

8.4.1. Текст отчета пишется каждым студентом самостоятельно в ученической тетради. Во введении отмечается место проведения практики, ее задачи, общие сведения о районе работ, расчет проектной точности. Краткий геологический очерк.

В разделе "Физико-геологические предпосылки" определяются возможности гравиразведки для картирования различных комплексов горных пород. Используя сведения о физических свойствах, полученные группой при прохождении практики по петрофизике и по образцам, отобранным во время практики по гравиразведке, составляется таблица плотностей горных пород. Выполняется анализ этой таблицы и с учетом сведений о геологическом строении района делается вывод, какие породы могут отразится в гравитационном поле. В разделе "Подготовка гравиметра к полевым работам" последовательно описываются все операции подготовки с приведением фактических данных из личных наблюдений с прибором

или данных бригады. В разделе "Методика и техника полевых работ" описывается методика создания опорной сети, рядовых и контрольных наблюдений в целом для подгруппы и выделяется конкретный объем собственных работ. Описывается техника наблюдений с гравиметром. В разделе "Камеральная обработка " перечисляются последовательно операции обработки опорной сети, рядовых и контрольных наблюдений, приводятся формулы для вычисления аномалии силы тяжести и формулы для оценки точности, приводятся конкретные данные по точности собственных наблюдений. Выполняется анализ плана изоаномал силы тяжести и графиков маршрутной съемки и делаются выводы о возможностях гравиразведки в данном районе.

8.4.2. Приложения к отчету

1. Графики регулировки уровней.

2. График смещения нуль пункта.

3. Полевой журнал.

4. Журнал обработки рейсов.

5. Ведомость опорной сети.

6. Ведомость контрольных наблюдений.

7. Каталог рядовых пунктов.

8. План изоаномал силы тяжести.

8.4.3. Требования к оформлению графики

Графика вычерчивается тушью на миллиметровой бумаге, план изоаномал сили тяжести - на ватмане согласно существующих требований (название, условные обозначения и т.п.). Кроме того, в зарамочном оформлении Плана изоаномал указывается группа, номер подгруппы и ее состав. Приложения должны быть пронумерованы, а в тексте обязательны ссылки на соответствующий номер приложения. Все приложения отчеты подгруппы складываются в один конверт.

Отчеты и приложения проверяются преподавателем, после доработки отчета в соответствии с полученными замечаниями каждый студент сдает зачет.

Библиографический список

I. Веселов К.Е. Гравиметрическая съемка. - М.:Недра, I986.-3I2 с.

2. Инструкция по гравиразведке.- М.,1980.-80 с.

3. Филатов В.В., Виноградов В.Б. Практикум по гравиразведке: Учебное пособие. - Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001.-80 с.

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

Н. В. Блинкова, К. В. Вандышева

ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА)

Методические рекомендации
по производственной практике,
по составлению отчета для студентов специальности
21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций
«Геофизические методы исследования скважин (ГИС)» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)»

Екатеринбург
2020

Б69

Рецензенты: *Писецкий В. Б.,* д-р геол.-мин. наук, профессор кафедры геоинформатики Уральского государственного горного университета;
Иголкина Г. В., д-р геол.- мин. наук, профессор кафедры геофизики Уральского государственного горного университета.

Блинкова Н. В., Вандышева К. В.

Б69 ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА): методические рекомендации по производственной практике, по составлению отчета для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций «Геофизические методы исследования скважин» (ГИС) и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)». 2-е издание, дополненное / *Н. В. Блинкова, К. В. Вандышева*; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 24с.

Методические рекомендации содержат цели и задачи производственной практики, включающих в себя выработку навыков производственного труда, знакомства с техникой, геофизической аппаратурой, методикой работ. Даются необходимые рекомендации по руководству и организации практики от университета и от предприятия.

Для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки специализаций «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» и «Геофизические методы исследования скважин»

© Блинкова Н. В.,
Вандышева К. В., 2010, 2018
© Уральский государственный
горный университет, 2010, 2018

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
Факультета геологии и геофизики УГГУ
_____2018 г.
Председатель комиссии
_____проф. Бондарев В. И.

Н. В. Блинкова, К. В. Вандышева

ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА)

Методические рекомендации
по производственной практике,
по составлению отчета для студентов направления
21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций
«Геофизические методы исследования скважин (ГИС)» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)»

2-е издание, дополненное

Издание УГГУ Екатеринбург, 2018

Оглавление

Введение…… 4
1. Организация и руководство практикой……. 5
1.1. Организация практики……. 5
1.2. Руководство практикой…… 6
1.2.1. Руководство практикой от университета…….. 6
1.2.2. Руководство практикой от предприятия……... 6
2. Обязанности и права студентов…….. 10
2.1. Обязанности студента…….. 10
2.2. Права студентов…… 12
3. Цели и задачи практики……... 14
3.1. Цель практики……... 14
3.2. Задачи практики…… 14
4. Структура и содержание отчёта……. 15
5. Основные требования к оформлению отчета…… 19
6. Перечень документов, необходимых
при отъезде на практику…….. 21
7. Содержание практики…….……. 21
Рекомендуемая литература……. 23

ВВЕДЕНИЕ

Производственная практика является ответственным этапом в подготовке горных инженеров-геофизиков. Данная программа предусматривает выработку у студентов навыков производственного труда и преобретения профессии, необходимой для инженерной деятельности, закрепления знаний по общеинженерным и специальным дисциплинам и является неотъемлемой частью всего учебного процесса.

Цели, задачи, содержание, объем практик и их название определяются требованиями федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) по направлениям подготовки ВО, программами практик, разработанных с учетом специфики подготовки обучающихся. Цель практики заключается в формировании профессиональных навыков через закрепление, расширение, углубление и систематизацию знаний, полученных студентами в процессе теоретического обучения, проверке профессиональной готовности будущего специалиста к самостоятельной трудовой деятельности и приобретение профессионального опыта. Задачи практики определяются в рабочих программах практик и индивидуальных заданиях, разработанных кафедрами университета ответственными за проведение практики (с учетом специфики и уровня подготовки специалиста).

1. ОРГАНИЗАЦИЯ И РУКОВОДСТВО ПРАКТИКОЙ

1.1. Организация практики

Производственная практика студентов четвёртого курса проводится в геологоразведочных организациях (партиях, экспедициях и частных компаниях), а также научно-исследовательских и проектных организациях геолого-разведочного профиля.

Для успешного проведения производственной практики студентам необходимо знать определённые разделы из цикла предшествующих дисциплин. Из дисциплины «Геофизические методы исследования скважин», оборудование для выполнения спуско-подъёмных операций, геофизические цифровые станции для регистрации данных каротажа, технику и методику работ при выполнении определённых геофизических методов, теорию этих методов. Из дисциплины «Аппаратура геофизических исследований скважин», «Электронные измерительные устройства» необходимо студентам знать устройство скважинных приборов, устройство регистраторов и станций на уровне блок-схем. Из курса «Физика горных пород» – основные физические и физико-механические характеристики горных пород, классификацию горных пород, рудных и нерудных минералов по их способу образования, а так же классификации по буримости.

Из курса «Разведочная геофизика» основные методы разведки и их практической применение.

Из курса наземных методов разведки указываются предпосылки проведения работ, последовательность выполнения разными ме-

тодами, и их взаимодействие, типовой и рациональный комплекс геофизических работ. Определение масштаба съемки, обоснование сети наблюдения, точности и способа ее определения, выбор аппаратуры. Описание последовательности обработки, методики интерпретации результатов наблюдений каждым методом и способ представления полученных данных.

1.2. Руководство практикой

1.2.1. Руководство практикой от университета

Руководитель практики студентов от университета:

– обеспечивает проведение всех организационных мероприятий перед выездом студентов на практику (проводят собрание студентов и инструктаж по вопросам проведения практики, проверяют обеспеченность студентов программами, дневниками, а так же индивидуальным заданиями);

– проводят общий инструктаж по вопросам техники безопасности на практике и дисциплины в пути следования на место практики и обратно;

– обеспечивает высокое качество прохождения практики студентами в соответствии с программой практики, контролирует обеспечение студентов рабочими местами.

1.2.2. Руководство практикой от предприятий

Ответственность за прохождение практики на предприятии возлагается на руководителя предприятия. Непосредственное руководство практикой студентов в структурных подразделения пред-

приятий возлагается приходом руководителя предприятия на высококвалифицированных специалистов.

Предприятие обязано обеспечить студентов во время прохождения производственной практики оплачиваемыми рабочими местами в соответствии с программой практики, создать необходимые условия для усвоения студентами знаний о новой технике, новой аппаратуре, новых методах, передовой технологии, современных вопросов экономики и передовых методов организации труда.

Руководители практики организуют проведение обязательных инструктажей по охране труда и технике безопасности (вводного и на рабочем месте) с оформлением соответствующей документации. Безопасные условия труда и обучения проводятся в соответствии с «Порядком обучения по охране труда и проверке знаний требований охраны труда работников организаций», утвержденные Министерством образования Российской Федерации и Министерством труда и социального развития от 13.01.2003 №1/29 «Об утверждение порядка обучения по охране труда и проверке знаний требований по охране труда работников организаций».

Руководители практики обязаны обеспечить студентов (учащихся) на время прохождения практики спецодеждой, спецобувью и предохранительными приспособлениями в соответствии с трудовым кодексом Российской Федерации и постановлением Министерства труда Российской Федерации от 01.06.2009 № 290 н (в редакции от 12.01.2015) «об утверждений правил обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами инди-

видуальной защиты», девствующей в части, непротиворечащей трудовому кодексу Российской Федерации.

Предприятие несёт полную ответственность за несчастный случай, происшедший со студентами во время прохождения ими практики.

Руководители предприятий могут выносить в случае необходимости в приказном порядке, взыскания студентам-практикантам, нарушающим правила внутреннего распорядка, и сообщать об этом в университет.

Руководители практики должны создать необходимые условия для выполнения студентами (учащимися) программы производственной практики. Не допускать использования студентов на работах, не предусмотренных программой прохождения практики и не имеющих отношения к профессии (специальности) студентов.

Руководитель от предприятия, осуществляющий общее руководство практикой:

– знакомит студентов с организационной структурой предприятия и основными направлениями его работ;

– совместно с руководителем практики от университета организует и контролирует проведение практики в соответствии с программой и согласованным календарным графиком прохождения практики;

– организует экскурсии по предприятию и на другие объекты (скважины);

– вовлекает студентов в научно-исследовательскую и рационализаторскую работу.

Руководители обязаны предоставить студентам возможность пользования лабораториями, мастерскими, кабинетами (библиотекой), технической и другой документацией в подразделениях предприятия для успешного освоения студентами программы производственной практики и выполнения индивидуальных занятий.

Руководители от предприятия должны обеспечить иногородних студентов койко-местом в общежитии в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями на время прохождения производственной практики с оплатой по установленным нормам.

Руководители должны осуществлять контроль за соблюдением студентами мер пожарной безопасности.

Руководители практики должны обеспечить табельный учёт выхода на работу студентов, дать характеристику о работе каждого студента и заключение о качестве подготовленного ими отчёта.

Руководители практики должны производить оплату и стимулирование труда студентов, зачисленных на вакантные рабочие места (должности), в период прохождения производственной практики по выполняемой работе в соответствии с трудовым кодексом Российской Федерации, локальными нормативными актами, действующими в обществе, и договорами образовательных учреждений на проведение производственной практики, заключаемых с обществом.

Руководители структурных подразделений в праве отстранять студентов от дальнейшего прохождения практики и досрочно отправить студента в расположение образовательного учреждения в случае грубого нарушения ими требований, правил, предписаний и инструкций по охране труда и технике безопасности, предусмотренных

трудовым кодексом Российской Федерации и иными нормативно трудовыми актами, действующими в части не противоречащими трудовому кодексу Российской Федерации.

Во время проведения производственной практики руководители практики должны предоставлять работникам, зачисленным на вакантные рабочие мечта (должности) гарантии компенсации, предусмотренные трудовым законодательством Российской Федерации.

Кроме того руководители практики должны знакомить студента с организацией работ на конкретном рабочем месте; помогать студентам правильно выполнять все задания, овладевать навыками производственной работы и рабочими профессиями, получать необходимые материалы для составления отчётов по практике; контролировать ведение дневников, подготовку отчётов по практике, составлять производственные характеристики об отношении студентов к работе, их деловые качества, а так же их участие в общественной жизни предприятия.

2. ОБЯЗАННОСТИ И ПРАВА СТУДЕНТОВ

2.1. Обязанности студентов

До отъезда на практику, студент должен знать какая кафедра и кто из её преподавателей руководит практикой, знать место и адрес прохождения практики; получить на кафедре, осуществляющей руководство практикой, путёвку-удостоверение, программу практики и пройти общий инструктаж по вопросам техники безопасности; изучить программу практики и маршрут следования к месту практики, сдать книги в библиотеку и своё место в общежитии, оформить об-

ходной лист и сдать его на кафедру; студентам, обучающимся платно оплатить обучение и оформить это в бухгалтерии.

Своевременно, но не позднее, чем за день до начала практики выехать на предприятие-базу практики имея при себе, кроме документов необходимых для прохождения практики, студенческий билет, трудовую книжку (если она имеется) и фотографии для пропуска. Желательно руководителю предприятия сообщить по телефону о своём выезде, вид транспорта, время прибытия.

По прибытию на место студент обязан явиться к руководителю предприятия и получить указания по прохождению практикой, договориться о времени и месте получения консультаций.

До начала работы на штатной должности студент должен пройти производственный инструктаж, организуемый предприятием, с обязательным изучением правил техники безопасности и охраны труда, правила работ с радиоактивными источниками и взрывными веществами (при работе на радиоактивных методах каротажа и перфорации скважин), а также действующих на предприятии правил эксплуатации оборудования.

В период прохождения практики студенты обязаны:

– полностью выполнять задание, предусмотренное программой практики, строго соблюдая сроки прохождения практики;

– подчиняться действующим на предприятии правилам внутреннего трудового распорядка;

– нести ответственность за выполненную работу и её результаты наравне с работниками предприятия;

– овладеть навыками производственной работы, сдать квалификационный экзамен по профилю выполненной работы;

– регулярно вести дневник, отражающий ежедневную работу, составить отчёт;

– чётко выполнять рекомендации и указания руководителей от университета и предприятия.

По окончании практики студентам необходимо сдать пропуск, техническую и художественную литературу, спецодежду, место в общежитии, предварительно отметив на предприятии, взять с собой отчёт по практике, путёвку-удостоверение, характеристику, удостоверение о получении квалификации, трудовую книжку и прибыть в университет в установленный срок (путёвка и характеристика подписываются руководителем предприятия и скрепляются печатью, отчёт по практике подписывается руководителем практики).

По возвращении путевка, отчёт и характеристика сдаются студентом на кафедру для проверки.

2.2. Права студентов

В соответствии с программой практики, предприятие обеспечивает их оплачиваемыми рабочими местами.

После зачисления студентов на оплачиваемые рабочие места и должности, на них распространяется трудовое законодательство Российской Федерации, правила охраны труда и внутреннего распорядка, действующего на данном предприятии, выплачивается компенсация за очередной отпуск по нормам, установленным, для данной профессии (должности).

Во время прохождения практики за студентами независимо от получаемой заработной платы, сохраняется право на получение стипендии, если студент её ранее получал.

На студентов, не имеющих стажа работы, заводится трудовая книжка, в которой делается соответствующая запись.

Студентам, зачисленным на платные должности в геологических партиях и экспедициях, получающим заработную плату и полевое довольствие или бесплатное питание, выплата суточных денег не производится.

Проезд студентов к месту практики и обратно средствами городского, пригородного и местного транспорта, независимо от места практики, оплачивается студентами за свой счёт.

Студенты за время прохождения практики пользоваться бесплатно защитной одеждой, спец обувью, и индивидуальными средствами защиты по нормам, установленными для соответствующих работников данного предприятия.

Предприятие обеспечивает студентов общежитиями на условиях, предоставляемых постоянным работникам.

Студенты имеют право пользоваться на предприятиях по месту прохождения практики литературой, инструкциями, получать консультации специалистов по программе практики и помощь в подборе материалов для отчётов о практике, курсовых и дипломных проектов.

3. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРАКТИКИ

3.1. Цель практики

Целью практики является реализация на производстве и закрепление теоретических знаний, получаемых студентом в процессе обучения; практическая работа по специальности и овладение профессией, отбор и накопление материала, необходимого для выполнения дипломного проекта или дипломной работы; изучение и приобретение опыта руководства структурным подразделением; активное ознакомление с технологией производственного процесса, знакомство с новыми методиками и техническими средствами, а также проверка деловых качеств студентов в производственных условиях.

3.2. Задачи практики

В задачи практики входит:

– формирование профессиональных навыков путём активного участия в производственном процессе;

– приобретение практических навыков самостоятельной работы в должности рабочего;

– закрепление профессиональных знаний и их повышение при прохождении практики;

– приобретение опыта эксплуатации и ремонта оборудования, используемого в партиях и экспедициях;

– изучение конкретных производственных заданий и технико-экономических показателей их выполнения;

– освоение способов интерпретации результатов наблюдений;

– изучение организации труда.

Студент должен постоянно фиксировать свои достижения в специальном дневнике. В дальнейшем все собранные материалы и наблюдения должны быть изложены в отчёте по производственной практике.

Перечень дисциплин с указание разделов, усвоение которых необходимо для прохождения практики.

Для успешного прохождения производственной практики студентам необходимо знать определённые разделы цикла предшествующих дисциплин в соответствии с учебным планом. Из дисциплины « Геофизические методы исследования скважин » теорию методов электрического каротажа, радиоактивного каротажа и методов контроля за техническим состоянием скважин.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Важнейшим этапом прохождения производственной практики является составление отчёта. По отчёту оценивается качество выполнения программы практики. Все собранные материалы являются основой дипломного проекта или дипломной работы.

Любые методические материалы должны быть подкреплены рисунками, таблицами, картами физических полей, блок-схемами, диаграммами.

Студент должен подготовить список используемой литературы, отчётов, инструкций. В отчёте должны быть ссылки на фондовые материалы.

Составление дипломного проекта или дипломной работы является заключительным этапом обучения студентов в УГГУ, дипломный проект является квалификационной работой, подготовка и успешная защита которой в ГЭК (Государственная аттестационной комиссией) служит основанием для присвоения выпускнику университета звания горного инженера – геофизика. Поэтому сбор материалов на практике должен соответствовать следующему перечню разделов:

– для специализации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ»:

Введение

1. Общие сведения о районе работ (приложением должна быть выкопировка из географической карты, с указанием места работ)
2. Геологическое строение района и участка работ
3. Физические и геологические предпосылки для постановки геофизических работ
4. Построение физико-геологической модели (обобщенную ФГМ можно представлять в виде совокупности частных моделей: геологической, петрофизической и физических полей в профильном, плоскостном или объемном варианте)
5. Анализ геофизических работ, проведенных в районе
6. Методика и техника проектируемых работ
7. Обеспечение безопасности жизнедеятельности и охрана окружающей среды
8. Перечень, объём и условие производства проектируемых работ

Заключение

Список использованной литературы;

– для специализации «Геофизические методы исследования скважин»:

Введение

1. Общие сведения о районе работ (приложением должна быть выкопировка из географической карты, с указанием места работ)
2. Геологическое строение района и участка работ
3. Физические и геологические предпосылки для постановки геофизических работ
4. Анализ геофизических работ, проведенных в районе
5. Особенности бурения, конструкция скважины
6. Методика и техника проектируемых работ
7. Обеспечение безопасности жизнедеятельности и охрана окружающей среды
8. Перечень, объём и условие производства проектируемых работ

Заключение

Список используемой литературы.

Студенту необходимо приложить к отчёту каротажные диаграммы, геологическую карту и разрез, чертежи, схемы, графики, таблицы, карты геофизических полей.

Тема должна быть выбрана студентом под руководством квалифицированного специалиста от предприятия или с помощью преподавателя кафедры.

Возможные темы:

– для специализации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ»:

– «Проект геофизических работ с целью поисков золото-сульфидных месторождений в конкретном районе (регионе)»;

– «Проект геофизических работ в помощь геологическому картированию масштаба 1:50 000 при доизучении конкретной площади (участке работ)»;

– «Проект инженерно-геофизических исследований для геологического обеспечения проектирования строительства объекта (указать какого)».

– для специализации «Геофизические методы исследования скважин»:

– «Определение профиля притока и приемистости»;

– «Определение фильтрационно-ёмкостных свойств пластов - коллекторов»;

– «Оценка технического состояния скважины»;

– «Оценка нефтенасыщенности коллекторов»;

– «Новые технические средства для ГИС»;

– «Методы исследования горизонтальных скважин».

Руководитель практики, выделенный производственной организацией, должен постоянно консультировать студента, следить за качеством собранного материала.

В дальнейшем эту роль берёт на себя руководитель дипломного проектирования.

На написание отчёта даётся две недели от начала учебных занятий в осеннем семестре.

5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должна оформляться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к техническим рукописям. Текст располагает на одной стороне листа белой бумаги формата А4. Рекомендуется шрифт 14 Times New Roman расстоянием между строками 1,5 интервала. Поля сверху, снизу и справа не менее 20 мм, слева – не менее 30 мм. Отступ абзаца 10 мм.

Страницы нумеруют подряд, включая рисунки и таблицы. Отсчет страниц начинают с титульного листа, но номер в первый раз проставляет на первой странице введения.

Нумерация рисунков, таблиц, формул сквозная, арабскими цифрами. Их помещают после первого упоминания на той же или на следующей странице. Подрисуночную подпись помещают ниже рисунка. Она включает номер рисунка (например, «Рис. 3») и далее его название. С новой строки помещают необходимые пояснения. Название рисунка набирают шрифтом меньшим, чем шрифт основного текста. Рисунок и подрисуночную подпись сверху и снизу отделяют от текста интервалами. Ссылки на рисунки делают в круглых скобках (например, (рис. 3)), при повторных ссылках добавляет сокращенное слово «смотри» (например, (см. рис. 3)).

Содержание таблиц также набирает более мелким шрифтом. Над таблицей помещают ее название, а над названием справа – слово "Таблица" и ее номер (знак «№» не пишут). Ссылки на таблицы делают так же, как на рисунки.

Слова в тексте пишут полностью, допускаются только общепринятые в технической литературе сокращения. Следует использовать термины и обозначения различных величин принятые в технической литературе. При первом использовании какого-либо обозначения следует пояснить его значение. Греческие буквы набирают прямым шрифтом, латинские – курсивом, за исключением математических (sin, ln и т .п.) и химических символов, которые набирают прямым шрифтом.

Заголовки разделов пишут заглавными буквами жирным шрифтом и располагают посредине листа. Разделы нумеруют арабскими цифрами (слово «глава» обычно не пишется). Подразделы нумеруют двумя цифрами через точку, указывающими номер раздела и номер подраздела в нем.

В конце текстовой части приводят список литературы. Список составляют в алфавитном порядке. Сначала указывают печатные источники, затем фондовые. Описание литературных источников делают в соответствии с установленными правилами. Ссылки на литературу в тексте делают путем указания номера источника по списку в квадратных скобках (например [7]). При использовании заимствованных рисунков, таблиц ссылка на источник или автора обязательна.

Графические приложения выполняют на стандартных листах формата А1. При необходимости можно использовать листы других стандартных форматов.

6. ПЕРЕЧЕНЬ ДОКУМЕНТОВ НЕОБХОДИМЫЙ ПРИ ОТЪЕЗДЕ НА ПРАКТИКУ

1. Паспорт.
2. Военный билет или приписное свидетельство.
3. Страховой полис.
4. Страховое свидетельство.
5. ИНН (идентификационный номер налога плательщика).
6. Трудовая книжка, если она есть.
7. Медицинская справка.
8. Путёвка от кафедры.
9. Справка первого отдела.
10. Два фото размером 3×4 см.

Перед получением путёвки студент на кафедру должен сдать обходной лист.

7. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИКИ

Производственную практику на предприятиях занимающихся ГИС, проходят студенты специализации «Геофизические методы исследования скважин», избравшие для курсового и дипломного проектирования тематику разнообразных методов, методик, технологии исследования скважин.

На практику в геологоразведочные организации отправляются студенты специализации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ», избравшие для курсового и дипломного проектирования

тематику разнообразных методов, методик, технологии проведения геофизических методов разведки.

Производственная практика позволит студенту проявить свои деловые и профессиональные качества и обеспечить место для дальнейшей работы после окончания университета.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Возженников Г. С., Белышев Ю. В*. Радиометрия и ядерная геофизика: Учеб. пос. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. – 406 с.

2. *Геофизические методы разведки рудных месторождений:* справочник / под ред. В. В. Бродового. – М.: Недра, 1990. – 296 с.

3. *Горбачев Ю. И.* Геофизические исследования скважин: учебник для вузов / под. ред. Е. В. Каруса. – М.: Недра, 1990. – 398 с.

4. *Гравиразведка: справочник геофизика* / под ред. Е. А. Мудрцовой и К. Е. Веселова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 607 с.

5. *Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Резванов В. А. и др.* Промысловая геофизика: учебник для вузов / под. ред. В. М. Добрынина. – М.: Недра, 1986. – 342 с.

6. *Дьяконов Д. И., Леонтьев Е. И., Кузнецов Г. С.* Общий курс геофизических исследований скважин: учебник для вузов. 2-е изд. перераб. – М.: Недра, 1984. – 432 с.

7. *Инструкции по гравиметрической разведке*. – М.: Недра, 1975. – 88 с.

8. *Инструкции по магниторазведке:* наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка / под ред. Ю. С. Глебовского и В. Е. Никитского. – Л.: Недра, 1981.

9. *Инструкции по сейсморазведке*. М.: Недра, 1985.

10. *Инструкции по электроразведке:* наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, морская электроразведка / М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.

11. *Кузнецов Г. С., Леонтьев Е. И., Резванов Р. А.* Геофизические методы контроля разработки нефтяных и газовых месторождений: учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 223 с.

12. *Кассин Г. Г.* Геофизические методы на региональном этапе геологоразведочного процесса. – Екатеринбург: УГГА, 1996. – 104 с.

13. *Магниторазведка:* справочник геофизика / под. ред. В. Е. Никитского и Ю. С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 470 с.

14. *Молчанов А. А., Лукьянов Э. Е., Рапин В. А.* Геофизические исследования горизонтальных нефтегазовых скважин: учебное пособие. – Спб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ), 2001. – 298 с.

15. *Рудные месторождения СССР* / под ред. В. И. Смирнова. Том 3. – М.: Недра, 1974. – 392 с.

16. *Сапожников В. М.* Комплексирование геофизических методов: учебное пособие / Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 76 с.

17. *Сковородников И. Г.* Геофизические исследования скважин: Учеб. пос. для вузов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. – 456 с.

18. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых*: справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 456 с.

19. *Электроразведка:* Справочник геофизика. В двух книгах / под. ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 438 и 278 с.

Учебное издание

БЛИНКОВА НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА
ВАНДЫШЕВА КСЕНИЯ ВАСИЛЬЕВНА

ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА)

Методические рекомендации
по производственной практике, по составлению отчета
для студентов направления
21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций «Геофизические методы исследования скважин (ГИС)» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)»

2-е издание, дополненное

Редактор В. В. Баклаева
Компьютерная верстка К. В. Вандышевой

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60×811/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. Уч. – изд. л. Тираж 100. Заказ 1,25

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Уральский государственный горный университет»

И. В. Назаров, Е. В. Шипилова

Методические указания
к геодезической практике для студентов всех специальностей и направлений

Екатеринбург – 2020

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Уральский государственный горный университет»

И. В. Назаров, Е. В. Шипилова

Методические указания
к геодезической практике для студентов всех специальностей и направлений

Издание УГГУ Екатеринбург, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 5
1. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИХ РАБОЧИЕ ПОВЕРКИ 6
1.1. Рабочие поверки теодолита Т-30 (2Т-30) 6
1.2. Рабочие поверки нивелира Н-3 10
2. ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЕ СЪЁМОЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ 13
2.1. Рекогносцировка местности и закрепление пунктов съёмочного обоснования 13
2.2. Измерение горизонтальных и вертикальных углов в тахеометрическом ходе 14
2.3. Измерение длин сторон тахеометрического хода 17
2.4. Привязка хода к пунктам опорной геодезической сети 18
3. ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЕ СЪЁМОЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ. КАМЕРАЛЬНЫЕ РАБОТЫ 20
3.1. Вычисление привязки 20
3.2. Вычисление горизонтальных проложений длин линий 22
3.3. Вычисление отметок пунктов съемочного обоснования методом тригонометрического нивелирования 23
3.4. Вычисление координат пунктов съемочного обоснования 26
3.4.1. Вычисление угловой невязки хода 26
3.4.2. Вычисление дирекционных углов сторон хода 28
3.4.3. Вычисление приращений координат, их невязок и координат пунктов съемочного обоснования 29
4. ТАХЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА 31
4.1. Работа на станции 31
4.2. Ведение журнала тахеометрической съемки 32
4.3. Составление абриса 34
5. СОСТАВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ПЛАНА 36
5.1. Вычерчивание координатной сетки 36
5.1.1. Построение пунктов съемочного обоснования по координатам 36
5.2. Нанесение ситуации и рельефа местности на план 37

5.3. Оформление топографического плана 37
6. ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ ПО ОСИ ТРАССЫ 39
6.1. Рекогносцировка трассы....39
6.2. Разбивка пикетажа по трассе и поперечных профилей 39
6.3. Нивелирование по оси трассы и по поперечным профилям 40
6.4. Работа на станции при нивелировании 41
6.5. Камеральная обработка результатов нивелирования....45
6.5.1. Обработка нивелирного журнала 45
6.5.2. Построение профиля трассы 47
6.5.3. Проектирование по профилю....49
7. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ 52
7.1. Элементы геодезических разбивочных работ....52
7.1.1. Вынос в натуру проектного горизонтального угла 52
7.1.2. Вынос в натуру проектного расстояния 53
7.2. Вынос в натуру точки с заданными координатами (полярным способом)....53
7.3. Вынос в натуру точки с заданной отметкой 56
7.4. Вынос в натуру линии с проектным уклоном....57
8. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА ПО ПРАКТИКЕ....59
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 60
ПРИЛОЖЕНИЯ 62
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Стандартный шрифт 62
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Вычислительный шрифт 63

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Задачей учебной геодезической практики является закрепление теоретических знаний студентов и приобретение ими практических навыков при решении различных инженерно-геодезических задач.

Все виды работ, предусмотренные программой, выполняются студентами самостоятельно бригадами в составе 6 человек, Продолжительность учебной геодезической практики – 2 недели.

Студенты допускаются к производству геодезических работ на практике лишь после изучения правил по охране труда и технике безопасности.

В период прохождения геодезической практики студенты обязаны выполнять установленный распорядок дня, бережно относиться к полученным приборам и инструментам и поддерживать дисциплину и порядок на полигоне и территории базы.

Руководитель практики систематически контролирует в течение всего периода практики се виды полевых и камеральных работ и принимает законченные работы.

Зачет по практики преподаватель принимает по пятибалльной системе от каждого студента в присутствии всех членов бригады.

Студенты, пропускающие дни практики, опаздывающие или уходящие с работы раньше срока по неуважительной причине, к зачету по практике не допускаются.

1. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИХ РАБОЧИЕ ПОВЕРКИ

Для измерения углов на учебно-геодезической практике используются теодолиты Т-30, 2Т-30.

Основные части теодолита (2Т-30) показаны на рис. 1.1, отсчетные устройства приборов – на рис. 1.2, сетка нитей – на рис. 1.3.

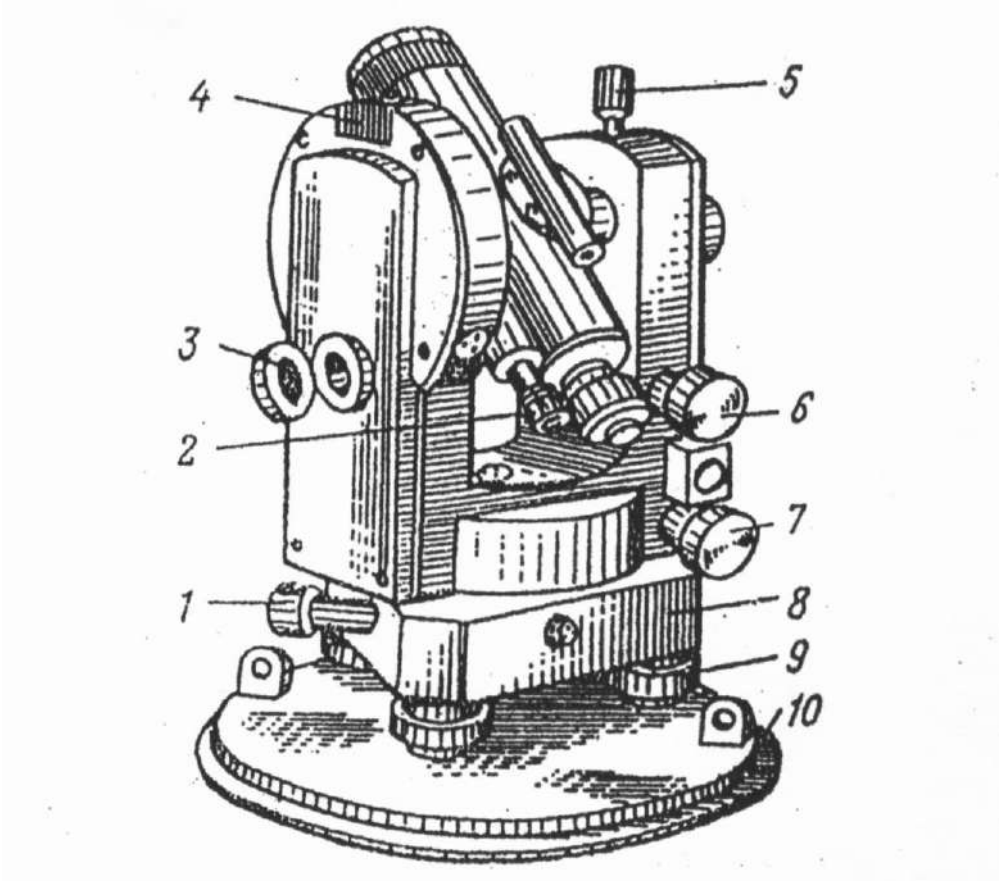


Рис. 1.1. Устройство теодолита 2Т30:
1 – наводящий винт лимба; 2 – микроскоп; 3 – зеркало для освещения шкал микроскопа;
4 – гнездо для крепления буссоли; 5 – закрепительный винт трубы;
6 – наводящий винт трубы; 7 – наводящий винт алидады;
8 – подставка; 9 – подъемные винты; 10 – основание

1.1. Рабочие поверки теодолита Т-30 (2Т-30)

Поверка 1. Ось цилиндрического уровня при алидаде горизонтального круга должна быть перпендикулярна вертикальной оси вращения прибора.

Уровень горизонтального круга устанавливают по направлению двух подъемных винтов, приводят или пузырек на середину, Затем поворачивают, алидаду на 180°. При отклонении пузырька от средины более чем на 2 деления производят юстировку – на половину дуги отклонения пузырька уровня перемещают юстировочными винтами уровня. Затем поверку повторяют.

Поверка 2. Визирная ось зрительной трубы должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси вращения трубы.

Выбирают на местности удаленную точку. Наводят теодолит на удаленную точку и берут отсчёты по горизонтальному кругу при двух положениях вертикального круга $КЛ_1$ и $КП_1$. Открепив становым винтом штатива подставку теодолита, поворачивают прибор примерно на 180° и повторяют то же самое, получая отчеты при $КЛ_2$ и $КП_2$. Получают значение коллимационной ошибки *C* по формуле:

$$C = \frac{(КЛ1 - КП1 \pm 180°) + (КЛ2 - КП2 \pm 180°)}{4}.$$

Если величина *C* превышает 2′, то вычисляют исправленный отсчет КП – С и устанавливают его на горизонтальном круге микрометренным винтом алидады. При этом центр сетки нитей сместится с точки наведения. Для исправления данного положения вращают горизонтальные исправленные винты сетки нитей до совмещения ее центра с точкой наведения.

Пример: отсчеты по горизонтальному кругу

	КЛ	КП
Наведение 1	40°22′	220°20′
Наведение 2	200°10′	20°10′

$$C = \frac{(40\,°22\,' - 220°\,20\,' + 180°00\,') + (200°\,10\,' - 20°10\,' - 180°00\,')}{4};$$

$$C = \frac{4'}{4} = 1'.$$

В штриховом микроскопе теодолита Т30 в середине поля зрения виден штрих, относительно которого осуществляется отсчет по лимбу (рис. 1.2, *а*). Перед отсчетом по лимбу необходимо определить цену деления лимба. В теодолите Т30 цена деления лимба составляет 10 угловых минут, т. к. градус разделен на шесть частей. Число минут оценивается на глаз в десятых долях цены деления лимба. Точность отсчета составляет 1′.

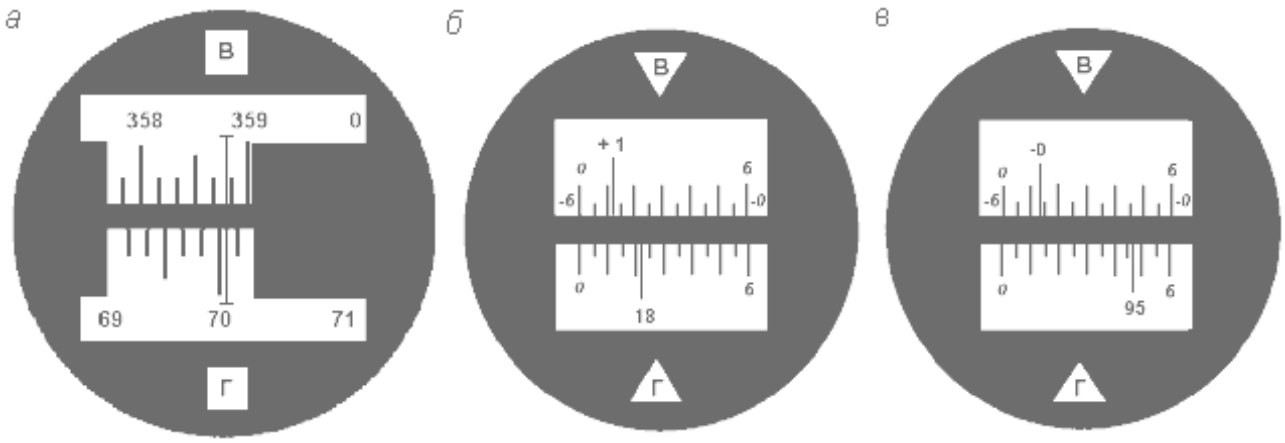


Рис. 1.2. Поле зрения отсчетных устройств: штрихового микроскопа с отсчетами по вертикальному кругу – 358° 48′, по горизонтальному – 70° 03′ (*а*); шкалового микроскопа с отсчетами: по вертикальному кругу – 1° 11′, по горизонтальному – 18°22′ (*б*); по вертикальному кругу – -0°47′, по горизонтальному – 95° 47′ (*в*)

В шкаловом микроскопе теодолита 2Т30 в поле зрения видна шкала, размер которой соответствует цене деления лимба (рис. 1.2, *б*, *в*). Для теодолита технической точности размер шкалы и цена деления лимба равны 60′. Шкала разделена на двенадцать частей, и цена ее деления составляет 5 угловых минут. Если перед числом градусов знака минус нет, отсчет производится по шкале от 0 до 6 в направлении слева направо (рис. 1.2, *б*). Если перед числом градусов стоит знак минус, в этом случае минуты отсчитываются по шкале вертикального круга, где перед цифрами от 0 до 6 стоит знак минус в направлении справа налево (рис. 1.2, *в*). Десятые доли цены деления шкалы берутся на глаз с точностью до 30″.

Поверка 3. Горизонтальная ось вращения зрительной трубы должна быть перпендикулярна оси вращения теодолита.

Устанавливают теодолит недалеко от стены здания. Центр сетки нитей зрительной трубы наводят на высоко расположенную точку и, закрепив алидаду, наклоняют трубу примерно до горизонтального положения. Отмечают карандашом на стене проекцию центра сетки нитей. Переводят трубу через зенит, снова повторяют все действия. Если наблюдаемое в зрительной трубе горизонтальное расстояние между двумя проекциями центра сетки нитей не превышает тройную ширину биссектора сетки, то условие поверки считается выполненным (рис. 1.3). В противном случае прибор подлежит исправлению на заводе.

Рис. 1.3. Сетка нитей

Поверка 4. Определение и исправление места нуля (МО) вертикального круга.

При двух положениях круга наводят центр сетки нитей на хорошо видимый предмет и берут отсчёты по вертикальному кругу КЛ и КП. Значение МО вычисляют по формуле:

Для 2Т-30

$$\text{МО} = \frac{\text{КЛ} + \text{КП}}{2}.$$

Для Т-30

$$\text{МО} = \frac{\text{КЛ} + \text{КП} - 180°}{2}.$$

Пример:

Отсчёты КЛ $7^\circ 20'$ $\text{МО} = \frac{7°20' + 172°44' - 180°}{2} = 2',$

для Т-30 КП $172^\circ 44'$.

Отсчёты КЛ $7^\circ 20'$ $\text{МО} = \frac{7°20' - 7°24'}{2} = -2',$

для 2Т-30 КП $-7^\circ 24'$.

Место нуля определяют дважды. Среднее значение недолжно превышать 1-3′.

В противном случае микрометренным винтом вертикального круга устанавливают на вертикальном круге отсчет, равный КП-МО. При этом центр сетки нитей сместится с наблюдаемой точки. Для исправления МО его совмещают с точкой наведения, вращая вертикальные исправительные винты сетки нитей.

Для контроля поверку повторяют. При выполнении этой поверки следят, чтобы пузырёк уровня горизонтального круга находился в нуль-пункте.

1.2. Рабочие поверки нивелира Н-3

Нивелир Н-3 предназначен для определения превышения между смежными точками местности. Основные части нивелира приведены на рис. 1.4.

Поверка 1. Ось круглого уровня должна быть параллельно оси вращения нивелира.

Вращением подъемных винтов приводят пузырек круглого уровня на середину. Поворачивают нивелир на 180°. Если пузырек не сместится с средины то условие выполнено. В противном случае юстировочными винтами уровня перемещают его к нуль-пункту на половину дуги отклонения. Затем поверку повторяют.

Поверка 2. Визирная ось зрительной трубы, должна быть параллельна оси цилиндрического уровня.

Поверку выполняют двойным нивелированием одной и той же линии длиной 50-75 м (рис. 1.5).

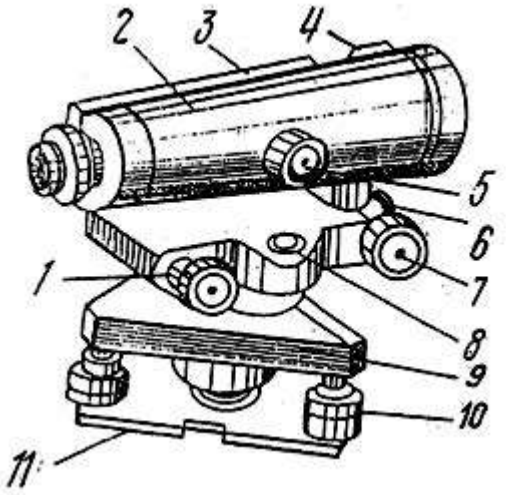
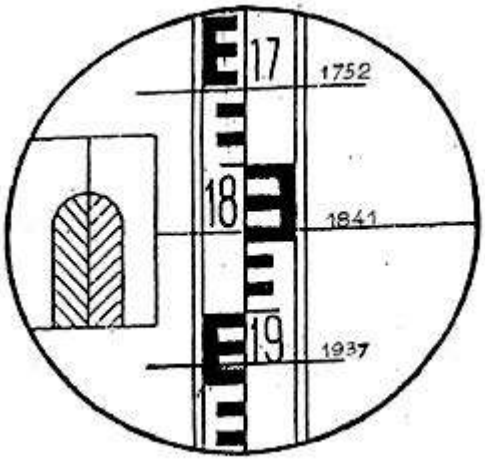


Рис. 1.4. Устройство нивелира:
1 – элевационный винт;
2 – зрительная труба;
3 – цилиндрический уровень;
4 – визир;
5 – винт фокусировки;
6 – закрепительный винт;
7 – наводящий винт;
8 – круглый уровень;
9 – подставка;
10 – подъемные винты;
11 – основание.



Отсчёты по рейке:
1752 мм - верхняя нить
1841 мм - средняя нить
1937 мм - нижняя нить

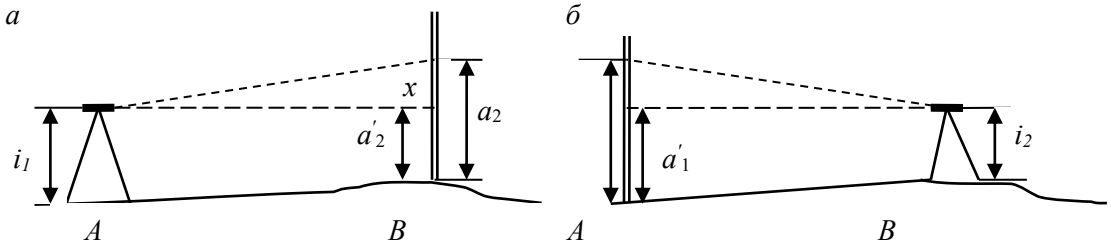


Рис. 1.5. Схема поверки главного геометрического условия

Устанавливают нивелир в точке. А, а рейку в точке В. Измеряют высоту инструмента i_1, в точке А и берут отсчёт по рейке a_1 в точке В. Затем нивелир и рейку меняют местами и снова измеряют высоту инструмента i_2 и берут отсчёт по рейке a_2. Если визирная ось не параллельна оси уровня и составляет с ним некоторый угол v, то отсчёты по рейке будут содержать некоторую погрешность X. Величину этой погрешности определяют по формуле:

$$X = \frac{a_1 + a_2}{2} - \frac{i_1 + i_2}{2}, \text{ мм.}$$

Пример: $i_1 = 1420$ мм $\qquad i_2 = 1540$ мм

$a_1 = 1180$ мм $\qquad a_2 = 1786$ мм

$$X = \frac{1180 + 1786}{2} - \frac{1420 + 1540}{2} = 3 \text{ мм.}$$

Если величина $X > 4$ мм, то не параллельность осей исправляют. Для этого вычисляют исправленный отсчет $a_2 = a_2 - X$ (рис. 1.5) и, действуя элевационным винтом, устанавливают его на рейке по средине нити сетки. Затем, действуя вертикальными юстировочными винтами цилиндрического уровня, совмещают изображение концов пузырька уровня. Для контроля поверку повторяют.

Поверка 3. Сетка нитей должна быть расположена правильно, т. е. вертикальная нить должна быть вертикальна, а горизонтальная – горизонтальна.

На расстояние 15-20 м вывешивают отвес, наводят трубу нивелира на нить отвеса. Если вертикальная нить сетки нитей параллельна нити отвеса, то условие выполнено. В противном случае исправление делают поворотом всей оправы сетки нитей до правильного положения, предварительно ослабив винты оправы.

2. ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЕ СЪЁМОЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ. ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

Для производства топографо-геодезических работ на местности необходимо иметь сеть пунктов съемочного обоснования.

На практике каждая бригада студентов на своем участке создает планово-высотную съемочную сеть в виде замкнутого тахеометрического хода с общим числом вершин 6-7, в котором измеряют горизонтальные и вертикальные углы и длины сторон, а также осуществляют привязку тахеометрического хода к пунктам опорной геодезической сети.

2.1. Рекогносцировка местности и закрепление пунктов съёмочного обоснования

Инструменты и принадлежности для выполнения работы: штыри, две вешки, молоток, тетрадь, две ручки.

Бригада студентов вместе с преподавателем обходит участок, выбирает места для точек съемочного обоснования и закрепляет их. При этом необходимо соблюдать ряд условий:

- Удобство установки теодолита для работы на станции;
- Взаимная видимость на соседние пункты;
- Максимальный обзор местности и полнота съемки;
- Расстояния между пунктами от 40 до 100 м.

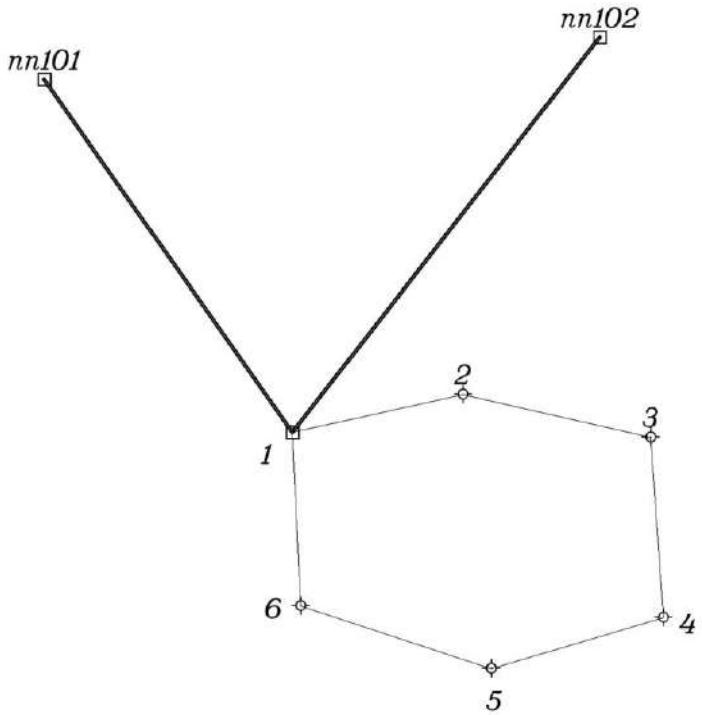


Рис. 2.1. Схема расположения пунктов съемочного обоснования

Закрепление пунктов съемочного обоснования производят металлическими штырями, которые забивают до уровня земной поверхности, вокруг штыря делают окопку, каждому из них присваивается порядковый номер. При рекогносцировке составляют общую схему расположения точек съемочного обоснования (рис. 2.1).

2.2. Измерение горизонтальных и вертикальных углов в тахеометрическом ходе

Инструменты и принадлежности для выполнения работы: теодолит, две вешки, одна рейка, полевой журнал для измерения углов, карандаш, тетрадь.

На каждом пункте планово-высотного хода измеряют горизонтальный угол, вертикальные углы и наклонные длины линий. Углы измеряют теодолитами Т-30 или 2Т-30 одним полным приемом, длины сторон хода – нитяным дальномером. Результаты измерений записывают в журнал измерения углов и длин линий простым карандашом (таблица 1).

Порядок работы:

1) Теодолит центрируют над пунктом по отвесу с точностью 5 мм и горизонтируют с помощью цилиндрического уровня при горизонтальном круге.

2) На две смежные точки выставляют визирные вехи, на которых отмечают ярким шнурком высоты инструмента на данной точке стояния.

3) Измерение горизонтального угла начинают при положении зрительной трубы КЛ. Открепив закрепительный винт алидады, наводят на низ вехи (во избежание ошибок из-за наклона вехи). Берут отсчет по горизонтальному кругу, записывают его в полевой журнал (1) (таблица 1, действие (1). В скобках показана последовательность действий при измерениях и записи в журнале). Затем открепляют закрепительный винт алидады, пересечение основных штрихов сетки наводят на низ правой вехи, берут отсчет по горизонтальному кругу, записывают в журнал (2). Вычитая из отсчёта (2) отсчёт (1), получают значение угла (3), измеренное одним полуприёмом.

4) Переводят трубу через зенит. Повторяя действия, описанные в пункте 3, измеряют горизонтальный угол вторым полуприемом при положении зрительной трубы КП. По отсчетам (4) и (5) вычисляют значение угла (6), полученного из второго полуприема.

5) Сравнивают значения углов (3) и (6), полученные из двух полуприемов. Их разность не должна быть больше $2t$, т. е. 1’, где t = 30” – точность теодолита. Вычисляют среднее значение горизонтального угла (7) по формуле:

$$\frac{(3)-(6)}{2}=(7).$$

Таблица 1

ЖУРНАЛ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛОВ И ДЛИН ЛИНИЙ

$$МО = \frac{КЛ + КП}{2}$$

Дата Исполнитель $\nu = КЛ - МО$

Точка стояния	Круг	Точки визирован.	Горизонтальный круг			Точки		Круг	Вертикальный круг			Длины линий измеренные
			Отсчёт ° '	Измеренный угол ° '	Средний угол ° '	Стояния	Визиров.		Отсчёт	Место нуля	Угол наклона	Горизонт. проложение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	КЛ	2	196°15' (1)	244°24' (3)	244°24,5' (7)	1	2	КЛ	-2°01' (8)	-0°0'30" (12)	-2° 00' 30" (13)	57,1 (14)
		6	80°39' (2)					КП	2°00' (10)			
	КП	2	16°17' (4)	244°25' (6)		1	6	КЛ	8°35' (9)	0°	8°35'	116,5 (15)
		6	260°42' (5)					КП	-8°35' (11)			
2	КЛ	3	146°55'	59°46'	59°46'	2	1	КЛ	-8°36'	0°	-8°36'	116,5 (16)
		1	206°41'					КП	8°36'			
	КП	3	326°59'	59°46'		2	3	КЛ	-2°20'	-0°2'	-2°18'	82,5
		1	26°45'					КП	2°18'			

6) Измерение вертикального угла начинают при положении зрительной трубы КЛ. Зрительную трубу наводят на веху, установленную на смежной точке. Основной (средний) горизонтальный штрих сетки совмещают с отметкой высоты инструмента на вехе (шнурок). После чего берут отсчет по вертикальному кругу (8). Затем наводятся на веху, установленную второй точке, и записывают значения по вертикальному кругу (9).

7) Переводят зрительную трубу через зенит, повторяют действия, описанные в пункте 6, при положении зрительной трубы КП. Берут отсчет по вертикальному кругу и записывают в журнал (10), (11).

8) Вычисляют МО вертикального круга (12).

9) Вычисляют угол наклона (13) по формуле:

$$\nu = \text{КЛ} - \text{МО}.$$

Контроль:

- При измерении вертикальных углов на станции колебание МО для разных вертикальных углов не должно превышать ± 2′.
- Значения углов наклона, измеренных в прямом и обратном направлениях, не должны отличаться более, чем на ± 3′.

Запрещается! В полевом журнале стирать резинкой результаты измерений, писать цифру на цифре, переписывать полевой журнал. Ошибочные измерения зачеркиваются одной чертой, затем записи продолжаются дальше. Все записи должны вестись четко и аккуратно с использованием шрифтов (см. прил. 1, 2).

2.3. Измерение длин сторон тахеометрического хода

В процессе проложения тахеометрического хода в поле измеряют длины сторон хода. Для этого на смежные точки ставят нивелирную рейку (нулем вниз), наводят зрительную трубу на рейку, совмещая верхний дальномерный штрих сетки нитей с каким-нибудь целым делением рейки (обычно с отсчетом 1000). Подсчитывают длину отрезка “l” в см между верхним и нижним дальномерными штрихами. Доли сантиметровых делений оценивают на глаз.

Длина измеренной стороны определяется по формуле

$$S_{\text{изм}} = K \times l_{\text{см}},$$

где K – коэффициент нитяного дальномера (K = 100), l – длина отрезка в см между верхней и нижней дальномерными нитями.

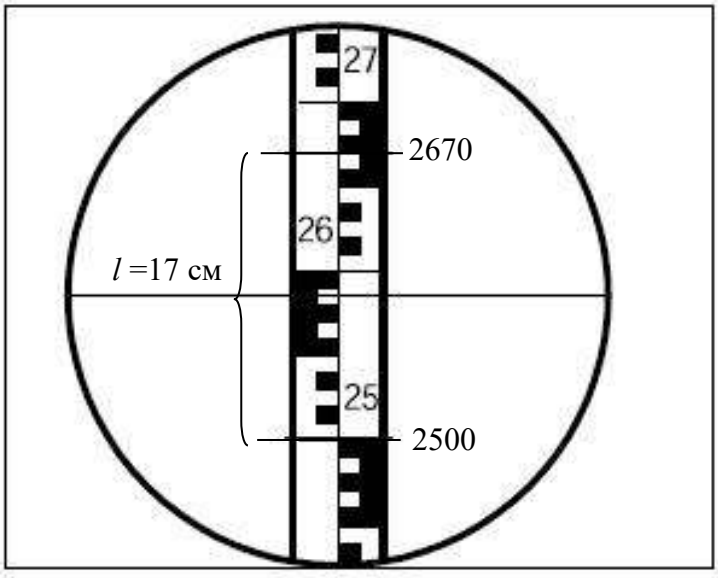


Рис. 2.2. Определение расстояний нитяным дальномером

Пример: на рис. 2.2 отчет по верхней нити 2670, отчет по нижней нити 2500, l = 2670 – 2500 = 170 мм = 17 см, $S_{изм}$ =17 см × 100 = 1700 см = 17,0 м.

На станции длину каждой стороны хода измеряют дважды по черной и по красной сторонам рейки, или по одной стороне, но по разным делениям рейки. Разность результатов измерений должна быть не более 0,3 м на 100 метров длины. Среднее значение длины стороны хода записывают в полевой журнал (14) с округлением до 0,1 м.

Длины сторон хода обязательно измеряют в обратном направлении. Разность между результатами измерений ”прямо” (15) и “обратно” (16) не должна превышать 1:200-1:400 (0,3-0,5 м на 100 м длины).

2.4. Привязка хода к пунктам опорной геодезической сети

Привязку тахеометрического хода выполняют для определения дирекционного угла начальной стороны хода. Одна из вершин тахеометрического хода является пунктом опорной геодезической сети (рис. 3.1). С него есть видимость на два других геодезических пункта (пп101, пп102). Для привязки хода к опорной геодезической сети производят измерение примычных углов φ_1 и φ_2. Это угол между твердой стороной и первой стороной тахеометрического хода (рис. 3.1). В полевом журнале вычерчивают схему привязки, показывают примычные углы.

Каждый примычный угол φ_1 и φ_2 измеряют двумя приемами с перестановкой лимба между приемами примерно на 90°. Для контроля измеряют угол между исходными сторонами (δ). Контроль производят по формуле:

$$\delta = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Допустимое расхождение $\pm 3'$.

3. ПЛАНОВО-ВЫСОТНОЕ СЪЁМОЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ. КАМЕРАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

После последних измерений производят проверку полевых журналов, правильность записей и вычислений измеренных и средних значений. По значениям измеренных горизонтальных углов и длин линий составляют схему съемочного обоснования и ее привязки (рис. 3.1). На схему выписывают измеренные значения углов и длин. Затем приступают к вычислениям. Вычисления линейных величин ведут с точностью до 0,1 м, а углов – до 30”. Из полевого журнала выписывают измеренные примычные углы φ_1 и φ_2.

3.1. Вычисление привязки

Дирекционный угол начальной стороны хода ($\alpha_{1\text{-}2}$) (рис. 3.1) вычисляют дважды, исходя из значений дирекционных углов исходных сторон опорной геодезической сети ($\alpha_{1\text{-}A}$, $\alpha_{1\text{-}B}$) и измеренных углов (φ_1, φ_2) по формулам:

$$\alpha_{1\text{-}2} = \alpha_{1\text{-}\,пп101} + \varphi_1;$$
$$\alpha_{1\text{-}2} = \alpha_{1\text{-}\,пп102} + \varphi_2.$$

Дирекционные углы исходных сторон вычисляют решая обратные геодезические задачи , по формулам:

$$r_{1\text{-}пп101} = \operatorname{arctg}\frac{Y_{пп101} - Y_1}{X_{пп101} - X_1},\quad r_{1\text{-}пп102} = \operatorname{arctg}\frac{Y_{пп102} - Y_1}{X_{пп102} - X_1}.$$

Расхождение полученных значений $\alpha_{1\text{-}2}$ не должно превышать 2-3′.

После нахождения значения румба необходимо определить координатную четверть, содержащую направление. Координатную четверть определяют по знакам приращений координат (рис. 3.2).

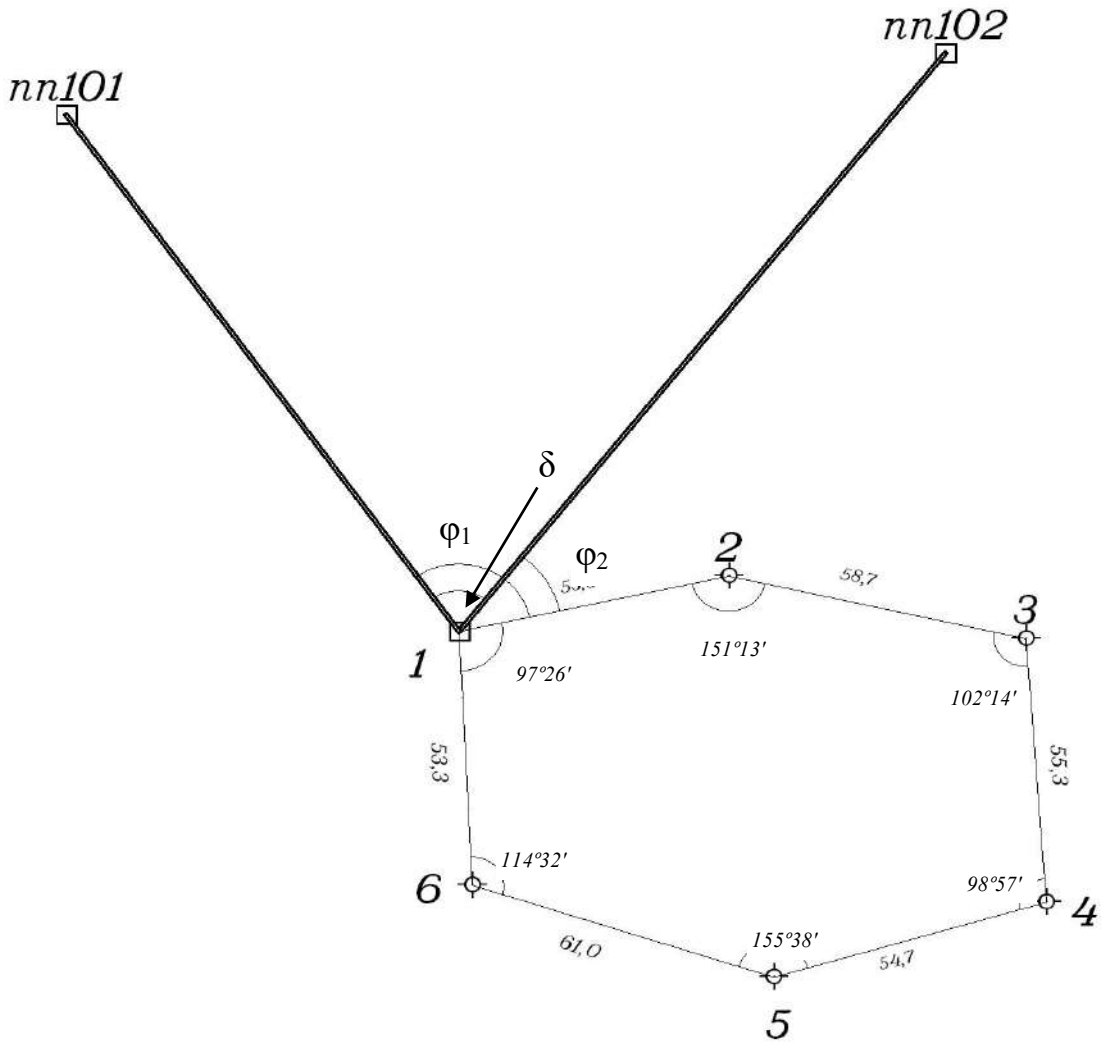


Рис. 3.1. Схема тахеометрического хода и геодезической привязки

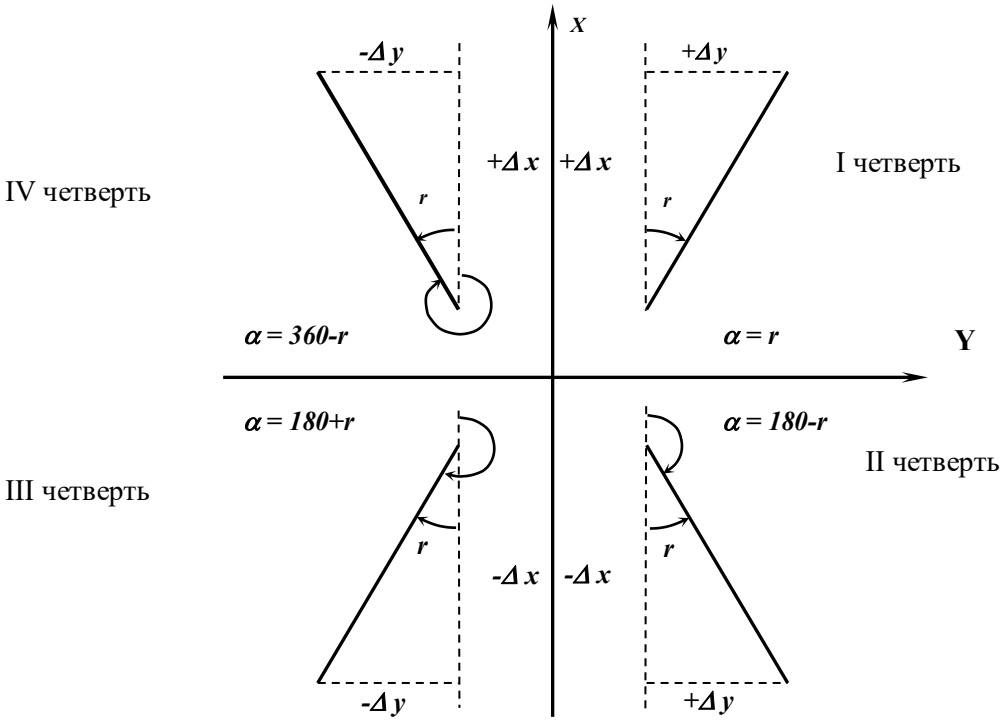


Рис. 3.2. Зависимости между дирекционными углами и румбами

Пример записи и вычислений дирекционных углов приведен ниже.

Таблица 2

Исходные данные

Название пункта	*X*, м	*Y*, м	*H*, м
1	3348,05	2238,25	271,36
пп101	4099,71	1639,28	282,40
пп102	4001,87	2581,51	290,24

$$r_{1\text{-пп}101} = \text{arctg}\frac{Y_{\text{пп}101} - Y_1}{X_{\text{пп}101} - X_1} = \text{arctg}\frac{1639{,}28 - 2238{,}25}{4099{,}71 - 3348{,}05} = \text{arctg}\frac{-598{,}97}{751{,}66} =$$

$= 38{,}54993965° = 38°33'00''$(IV ч.);

$$\alpha_{1\text{-пп}101} = 360° - 38°33'00'' = 321°27'.$$

$$r_{1\text{-пп}102} = \text{arctg}\frac{Y_{\text{пп}102} - Y_1}{X_{\text{пп}102} - X_1} = \text{arctg}\frac{2581{,}51 - 2238{,}25}{4001{,}87 - 3348{,}05} = \text{arctg}\frac{343{,}26}{653{,}82} =$$

$= 27{,}69992196° = 27°42'00''$ (I ч.);

$$\alpha_{1\text{-пп}102} = 27°42'00''.$$

$\varphi_1 = 333°18'00''$;

$$\alpha_{1\text{-}2} = 321°27'00'' + 333°18'00'' = 294°45'00''.$$

$\varphi_2 = 267°05'00''$;

$$\alpha_{1\text{-}2} = 27°42'00'' + 267°05'00'' = 294°47'00''.$$

Средний $\alpha_{1\text{-}2} = 294°46'00''$.

3.2. Вычисление горизонтальных проложений длин линий

Горизонтальные проложения необходимо знать для вычисления координат точек тахеометрического хода.

Вычисление горизонтальных проложений выполняют в ведомости вычисления отметок съемочного обоснования (таблица 3).

Из журнала измерения улов и длин линий выписывают среднее значения длин линий (*S*), полученные по результатам измерений в прямом и обратном направлениях, в графу 4 табл. 3 и углы наклона (*v*), измеренные в прямом и обратном направлениях, в графы 2 и 3 табл. 3. По этим данным вычисляют горизонтальные проложения с точностью до 0,01 м по формуле:

$$D = S \times \cos^2 v,$$

где S – среднее значение измеренной длины линии (графа 4), v – угол наклона линии в прямом направлении (графа 2), D – горизонтальное проложение (графа 5).

3.3. Вычисление отметок пунктов съемочного обоснования методом тригонометрического нивелирования

Вычисление отметок производится с точностью до 0,01 м в ведомости вычисления отметок (таблица 3).

По измеренным расстояниям и углам наклона вычисляют превышения между точками хода в прямом и обратном направлениях по формуле:

$$h = D \times \tan v.$$

Значения превышений с соответствующим знаком записывают в графы 6 и 7.

Расхождения в превышениях, полученных в прямом и обратном направлениях, допускаются не более 4 см на 100 м. Если это условие выполнено, то в графе 8 вычисляют средние превышения, сохраняя перед ними знак превышения из прямого хода. Сумму положительных и отрицательных значений превышений записывают в графе 8 внизу. Далее подсчитывают невязку по превышениям. Она равна сумме превышений замкнутого хода:

$$f_h = \Sigma h_{\text{ср}}.$$

Допустимую высотную невязку вычисляют по формуле:

$$\text{доп. } f_h = \pm 0{,}2 \text{ м} \sqrt{\sum D(\text{км})},$$

где $-\sum D$ сумма горизонтальных проложений ходя (периметр в км).

Полученную невязку f_h распределяют между превышениями с обратным знаком пропорционально длинам линий по формуле:

$$\delta_{hi} = -\frac{f_h}{\sum D} \times D_i.$$

Таблица 3

Вычисления отметок точек съемочного обоснования

№№ точек	Вертикальные углы		Длины сторон, м		Превышение, м				Отметки точек, м	№№ точек
	Прямо ° '	Обратно ° '	Измеренные, *S*	Горизонтальное проложение, *D*	Прямо	Обратно	Среднее	Исправленное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1									230,00	1
	-2°01'	+2°02'	83,0	82,90	-2,92	+2,95	-0,02 -2,94	-2,96		
2									227,04	2
	-5°24'	+5°25'	122,0	120,92	-11,43	11,46	-0,03 -11,45	-11,48		
3									215,56	3
	+2°15'	-2°16'	98,0	97,85	+3,85	-3,88	-0,02 +3,87	+3,85		
4									219,41	4
	+1°56'	-1°57'	120,0	119,86	+4,05	-4,09	-0,03 +4,07	+4,04		
5									223,45	5
	+4°30'	-4°29'	100,5	99,88	+7,86	-7,83	-0,02 +7,85	+7,83		
6									231,28	6
	-0°56'	+0°58'	76,5	76,48	-1,25	+1,29	-0,01 -1,27	-1,28		
1									230,00	1
				ΣD = 597,89 м		$\sum h_{ср}$ (+) = +15,79 $\sum h_{ср}$ (-) = -15,66		Σ = 0		
							f_h = +0,13	Доп. $f_h = \pm 0{,}2\text{м}\sqrt{\sum D(\text{км})}$		
								Доп. $f_h = \pm 0{,}2\text{м}\sqrt{0{,}6} = \pm 0{,}15$		

Вычислил Орлов Проверил Петров

Контроль: $\Sigma\delta = -f_h$

Величины поправок записывают в графе 8 над превышениями. В графу 9 записывают исправленные превышения.

Контроль: если исправленные превышения вычислены правильно, их алгебраическая сумма должна быть равна нулю.

По исправленным превышениям последовательно вычисляют отметки пунктов съемочного обоснования по формуле:

$$H_{n+1} = H_n + h_n,$$

где H_{n+1} – высота последующего пункта (м), H_n – отметка предыдущего пункта (м), h_n – превышение между смежными пунктами (м).

Контролем вычисления отметок является получение отметки исходной точки в конце вычислений.

3.4. Вычисление координат пунктов съемочного обоснования

Вычисление координат производится в ведомости вычисления координат (таблица 4). В графу 1 ведомости выписывают номера вершин хода, в графу 2 – номера точек визирования. В графу 3 выписывают против соответствующих вершин средние значения измеренных горизонтальных углов. Значения горизонтальных проложений линий выписывают в графу 6 из таблицы 3.

3.4.1. Вычисление угловой невязки хода

Угловой невязкой f_β замкнутого тахеометрического хода называется разность между суммой измеренных горизонтальных углов $\Sigma\beta_{изм}$ и теоретической суммой внутренних углов плоского многоугольника $\Sigma\beta_{теор}$ т. е.

$$f_\beta = \Sigma\beta_{изм} - \Sigma\beta_{теор},$$

где $\Sigma\beta_{теор} = 180°\times(n - 2)$, n – число углов многоугольника.

Вычисленные значения $\Sigma\beta_{изм}$ и $\Sigma\beta_{теор}$ подписывают внизу графы 3.

Здесь же вычисляют величину допустимой угловой невязки по формуле:

$$f_{\beta доп} = 2 \times t \ (t = 0°0'30'' \text{ – точность инструмента}),$$
$$f_{\beta доп} = \pm 1' \sqrt{n}\,.$$

Таблица 4

Вычисление координат точек съемочного обоснования

Номера точек		Горизонтальные углы		Дирекционные углы	Горизонтальные проложения, м	Приращения координат, м				Координаты, м	
						Вычисленные		Исправленные			
Стояния	Визиров	Измеренные ° '	Исправленные ° '	° '		ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	X	Y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1						+0,05	+0,08			**3348,05**	**2238,25**
	3			**294°46'**	82,90	+34,73	-75,27	+34,78	-75,19		
2						+0,07	+0,12			3382,83	2162,06
	1	110°59'00"	110°59'	3°47'	120,92	+120,64	+7,98	+120,71	+8,10		
3	4					+0,06	+0,10			3503,54	2171,16
	2	123°09'00"	123°09'	60°38'	97,85	+48,01	+85,32	+48,07	+85,42		
4	5					+0,07	+0,12			3551,61	2256,58
	3	105°15'00"	105°15'	135°23'	119,86	-85,35	+84,21	-85,28	+84,33		
5	6					+0,06	+0,10			3466,33	2340,91
	4	117°58'00"	117°58'	197°25'	99,88	-95,32	-29,90	-95,26	-29,8		
6	1	-0°0'30"				+0,05	+0,08			3371,07	2311,11
	5	124°58'30"	124°58'	252°27'	76,48	-23,07	-72,94	-23,02	-72,86		
1	2	-0°0'30"								**3348,05**	**2238,25**
	6	137°41'30"	137°41'	(294°46')	ΣD = 597,89						
			$\sum\beta_{исп}$ = 720°			fx = -0,36	fy = -0,6				
						fs = 0,85		0	0		

$\Sigma\beta_{изм}$ = 720°01'00"

$\Sigma\beta_{теор}$ = 720°00'00"

f_{β} = +1'

$f_{\beta доп} = \pm 1' \sqrt{n} = \pm 1' \sqrt{6} = \pm 2{,}4'$

$$\frac{1}{\sum D \div f_s} = \frac{1}{703} \langle \frac{1}{300}$$

Вычислил Орлов

Проверил Петров

Если значение угловой невязки не превосходит допустимой величины, то ее распределяют поровну с обратным знаком между измеренными углами, с точностью до 30″, т. е. вычисляют поправки к измеренным горизонтальным углам по формулам:

$$\delta_\beta = -\frac{f_\beta}{n}.$$

Если полученное значение поправки меньше 30″, то угловую невязку вводят в наиболее слабое место тахеометрического хода (короткие стороны хода, горизонтальные углы $\leq 20°$ или $\geq 150°$, точки съемочного обоснования, наиболее удаленные от исходных пунктов сети).

Контроль: $\Sigma\delta_\beta = -f_\beta$.

Поправки в измеренные углы подписывают над их значениями. Вычисляют исправленные горизонтальные углы

$$\beta_{исп} = \beta_{изм} + \delta_\beta.$$

Контроль: $\Sigma\beta_{исп} = 180°\times(n - 2)$.

3.4.2. Вычисление дирекционных углов сторон хода

Вычисление дирекционных углов сторон хода производят по дирекционному углу начальной стороны и исправленным горизонтальным углам. Начальный дирекционный угол стороны 1-2 выписывают из решения привязки (см. раздел 3.1). В нашем примере $\alpha_{1\text{-}2} = 294°46'$. Его записывают в графу 5 между точками 1 и 2. Дирекционные углы остальных сторон хода вычисляют по формулам:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \beta_{лев} - 180° \text{ - для левых углов;}$$
$$\alpha_{n-1} = \alpha_n - \beta_{прав} + 180° \text{ - для правых углов,}$$

где α_{n+1} – дирекционный угол последующей стороны хода, α_n – дирекционный угол предыдущей стороны хода.

Контроль: полученный дирекционный угол первой стороны хода в конце вычислений должен быть равен исходному. С этой целью по дирекционному углу последней стороны и горизонтальному углу при вершине 1, которые ранее в вычислениях не участвовал, получают дирекционный угол начальной стороны ($\alpha_{1\text{-}2} = 294°\ 46'$).

Вычисленные значения дирекционных углов сторон хода записывают в графу 5.

3.4.3. Вычисление приращений координат, их невязок и координат пунктов съемочного обоснования

Приращение координат хода вычисляют по следующим формулам:

$$\Delta X_i = D_i \times \cos\alpha_i,\ \Delta Y_i = D_i \times \sin\alpha_i,$$

где D_i – горизонтальное проложения линий; α_i – дирекционные углы этих линий.

Вычисления производят с точностью до 0,01 м.

Вычисленные приращения координат записывают в графах 7 и 8.

Для замкнутого хода алгебраическая сумма приращений по каждой оси координат должна быть равна нулю:

$$\sum\Delta X = 0,\ \sum\Delta Y = 0.$$

Внизу графы 7 и 8 находят значения невязок f_x и f_y (по осям абсцисс и ординат), по формулам:

$$f_x = \sum\Delta X\ ,\ f_y = \sum\Delta Y.$$

Невязки в приращениях координат обусловлены действием погрешностей измерения углов и сторон хода. Совместное влияние невязок приращений по осям координат характеризуется линейной невязкой в периметре:

$$f_S = \sqrt{fx^2 + fy^2}\,.$$

Допустимую линейную невязку вычисляют по формуле относительной ошибки:

$$\frac{1}{\sum D \div f_S} \le \frac{1}{500},$$

где $\sum D$ – сумма горизонтальных проложений длин сторон хода (периметр).

Периметр ($\sum D$) подсчитывают в графе 6 и выписывают внизу. После проверки допустимости относительной линейной невязки $\frac{1}{\sum D \div f_S}$ распределяют невязки приращений координат f_x и f_y.

Невязки f_x и f_y распределяют с обратным знаком в каждое приращение координат пропорционально длинам сторон, т. е. вычисляют поправки к приращениям координат по формулам:

$$\delta X_i = -\frac{f_x}{\sum D} \times D_i, \qquad \delta Y_i = -\frac{f_y}{\sum D} \times D_i,$$

и подписывают их над приращениями в графах 7 и 8.

В графах 9 и 10 записывают исправленные значения приращений координат:

$$\Delta X_{\text{ИСПР}} = \Delta X_i + \delta X_i, \qquad \Delta Y_{\text{ИСПР}} = \Delta Y_i + \delta Y_i.$$

Контроль: $\sum \Delta X_{\text{ИСПР}} = 0$, $\sum \Delta Y_{\text{ИСПР}} = 0$.

Далее, в графах 11 и 12 последовательно вычисляют координаты точек тахеометрического хода от координат начальной точки 1, используя исправленные приращения координат, по формулам:

$$X_{n+1} = X_n + \Delta X_{\text{ИСПР}}, \qquad Y_{n+1} = Y_n + \Delta Y_{\text{ИСПР}},$$

где X_n, Y_n – координаты предыдущего пункта, X_{n+1} ,Y_{n+1} – координаты последующего пункта.

Контроль: вычисленные координаты начальной точки хода должны быть равны исходным (таблица 4).

4. ТАХЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Инструменты и принадлежности для выполнения работ: теодолит, одна вешка, одна рейка, полевой журнал для тахеометрической съемки, абрисы, два карандаша, тахеометрические таблицы.

Тахеометрическую съемку ситуации и рельефа местности выполняют с пунктов съемочного обоснования в масштабе 1:500. На каждой станции измеряют расстояние, горизонтальный и вертикальные углы до съемочных пикетов, т.е. определяют полярные координаты каждой снимаемой точки (съемочных пикетов).

Все записи результатов измерений ведут в журнале тахеометрической съемки (таблица 5). В процессе съемки составляют абрис (рис. 4.1).

Особо важное значение при съемке имеет правильный выбор съемочных пикетов. При съемке ситуации рейку устанавливают на характерных точках контуров (углы зданий, изгибы дорог, рек, границы угодий, столбы электролиний и т. д.). При съемке рельефа рейку устанавливают на характерных точках и линиях рельефа местности (вершина холма, дно котловины, водораздел, тальвег, перегибы скатов, урезы воды).

Съемочные пикеты должны равномерно покрывать всю территорию съемки. Расстояние от точек съемочного обоснования до съемочных пикетов должно быть не более 80 м.

4.1. Работа на станции

Работу на станции выполняют в следующем порядке:

- теодолит центрируют над точкой с точностью до 1 см с помощью отвеса и горизонтируют с помощью цилиндрического уровня горизонтального круга;

- определяют МО вертикального круга на каждой станции, значение МО записывают в журнал тахеометрической съемки (таблица 5) для данной станции. Устанавливают визирную веху на следующую по ходу точку съемочного обоснования. Направление на эту точку принимают за начальное (например: станция 1, направление на точку 2), ориентируют лимб по начальному направлению. Для этого, вращая алидадой, устанавливают отсчет на горизонтальном круге 0°00’. Затем алидаду закрепляют, открепляют лимб, наводят теодолит на выставленную веху (на пункте 2). Далее лимб закрепляют до конца съемки на этой станции, а алидаду открепляют. Съемка ведется только при положении зрительной трубы круг «лево» (КЛ);

- рейкой измеряют высоту инструмента до 0,01 м, записывают ее значение в журнал и отмечают на рейке ярким шнурком (i = 1,30 м);

- рейку устанавливают на съемочный пикет;

- наводят теодолит на рейку, измеряют нитяным дальномером расстояние до рейки и записывают в журнал (1);

- наводят центр сетки нитей на высоту инструмента (шнурок), берут отсчеты по горизонтальному и вертикальному кругам теодолита и записывают в журнал (2), (3). Если на рейке отметки высоты инструмента не видно, то наводят центр сетки нитей на верх рейки и записывают на этом пикете высоту визирования (v = 3 м) в графу 8 таблицы 5.

4.2. Ведение журнала тахеометрической съемки

В журнале указывают номер станции, начальное направление, МО, высоту инструмента i в метрах, отметку точки H_0 съемочного обоснования в метрах. В соответствующие графы журнала записывают результаты полевых измерений (расстояний, отсчетов по горизонтальному и вертикальному кругам). Затем вычисляют углы наклона на съемочные пикеты по формуле:

$$v = КЛ - МО.$$

Находят горизонтальное проложение D и превышение h’ между точкой съемочного обоснования и съемочным пикетом по углу наклона и расстоянию из тахеометрических таблиц или по формулам, которые приведены в тахеометрических таблицах:

$$D = S \times \cos^2 v;$$
$$h' = D \times tan\ v;$$
$$h = h' + i - \text{v},$$

где D – горизонтальное проложение, S – измеренное нитяным дальномером расстояние, v – угол наклона, i – высота инструмента, v – высота визирования.

Знак превышения соответствует знаку угла наклона.

Отметку съемочного пикета вычисляют по формуле:

$$H = H_0 + h,$$

и записывают в графу 11 (таблица 5).

Таблица 5

ЖУРНАЛ ТАХЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

$$МО = \frac{КЛ + КП - 180°}{2} \quad (Т\text{-}30)$$

Точка стояния *1* $H_0 = 230{,}0$ $i = 1{,}30$ КЛ = 354°35'

Дата 13.07.17. КП = 185°23'

Начальное направление *2* Исполнитель Петров v = КЛ-МО МО = - 0°1'

№№ пикетов	Расстояния по дальномеру, м	Отсчеты по кругам /КЛ/		Углы наклона ° '	Горизонтальн. проложения, м	h', м	Высота визиров v, м	i-v	Превышение $h = h' + i$-v	Отметки пикетов $H = H_0 + h$	Примечание
		Горизонтальн. ° '	Вертикальн. ° '								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		0°00									
1	38,0	23°00'	352°59'	-7°00'	37,44	-4,60	1,30	0	-4,60	225,40	рельеф, дорога
2	35,0	53°30'	355°06'	-4°53'	34,75	-2,97	1,30	0	-2,97	227,03	рельеф, дорога
3	56,0	81°00'	356°06'	-3°53'	55,74	-3,78	1,30	0	-3,78	226,22	дорога
4	86,1	100°00'	356°36'	-3°23'	85,80	-5,07	1,30	0	-5,07	224,93	дорога
5	52,3	112°41'	358°47'	-1°12'	52,28	-1,10	1,30	0	-1,10	228,90	рельеф, луг
6	72,0	116°02'	354°23'	-5°36'	71,31	-6,99	3,00	-1,70	-8,69	221,31	рельеф, луг
7	25,0	137°30'	352°34'	-7°25'	24,58	-3,20	1,30	0	-3,20	226,80	обрыв, 2м
8	46,5	141°00'	355°17'	-4°42'	46,19	-3,80	1,30	0	-3,80	226,20	обрыв, 2м
9	25,8	180°10'	349°39'	-10°20'	24,97	-4,55	1,30	0	-4,55	225,45	обрыв, 2м

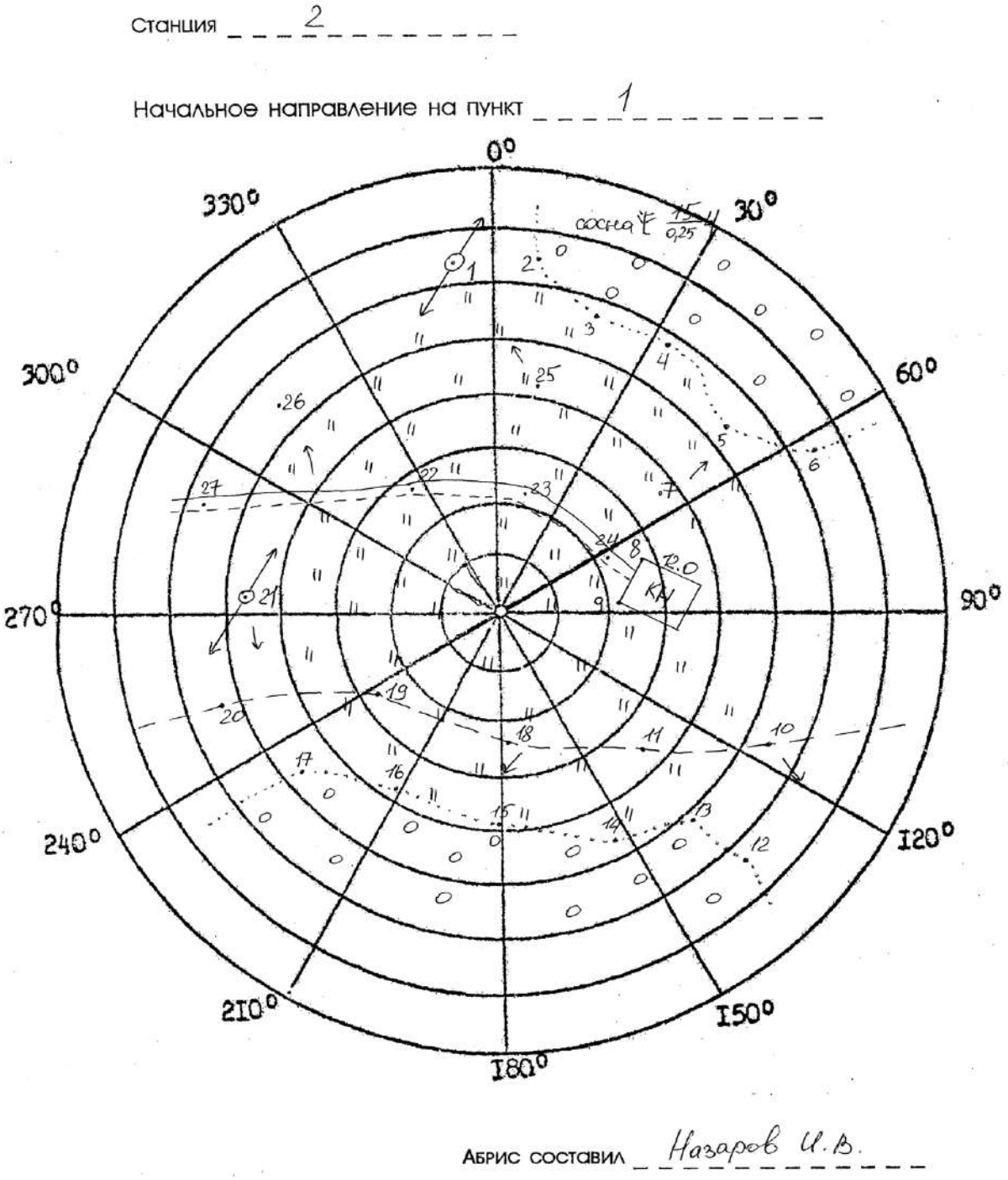
Вычислил

Проверил

4.3. Составление абриса

Абрис – это схематический чертеж участка местности, снимаемого с данной станции. Абрис составляют на каждой станции одновременно с заполнением журнала тахеометрической съемки (рис. 4.1).

При заполнении абриса центр окружности принимают за станцию, с которой выполняют съемку, один из радиусов за начальное направление (0°), расстояния между окружностями принимают равными 10 м. Каждый съемочный пикет намечают на абрисе точкой, рядом надписывают его порядковый номер.



Абрис составил Назаров И.В.

Рис. 4.1. Абрис тахеометрической съемки на п. 1

При съемке следят за тем, чтобы нумерация съемочных пикетов на абрисе соответствовала нумерации этих же пикетов в журнале тахеометрической съемки. На абрис наносят все снятые контуры ситуации, сопровождая их пояснительными надписями и условными знаками. На абрисе стрелками показывают направление скатов.

Составление абрисов является ответственной частью тахеометрической съемки, т.к. он в дальнейшем используется для создания топографического плана. Его надо вести аккуратно, все записи делают четко, отточенным карандашом, прямолинейные контуры вычерчивать по линейке. Четкое ведение абриса способствует качественному составлению топографического плана. Абрис сдается вместе с журналом тахеометрической съемки.

Закончив съемку на станции, по абрису проверяют, все ли элементы ситуации и рельефы засняты, нет ли пропусков, достаточно взято ли съемочных пикетов. Съемочные пикеты должны быть расположены не реже, чем через 3 см в масштабе плана, т. е. через 15 м на местности (в масштабе 1:500), их количество зависит от сложности ситуации и сложности рельефа. Кроме того, проверяют, не сбилась ли во время съемки ориентировка теодолита. Для этого в конце съемки снова визируют зрительную трубу по начальному направлению и проверяют неизменность отсчета по лимбу. Допустимое отклонение должно быть не более 3′. Сделав такой контроль, переходят на следующую станцию.

5. СОСТАВЛЕНИЕ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ПЛАНА

При тахеометрической съемке топографический план создается камеральным путем. Размер рамки для планов масштаба 1:500 принят 50×50 см. План составляют в масштабе 1:500 и оформляют в соответствии с «Условными знаками для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500».

Составление плана выполняют в следующем порядке:

- вычерчивание координатной сетки;
-построение точек по координатам;
-нанесение ситуации и местности на план;
-оформление топографического плана.

5.1. Вычерчивание координатной сетки

Координатную сетку строят на листе чертежной бумаги А1, стороны сетки принимают равными 10×10 см. Координатную сетку получают путем ее переноса со стандартных сеток, изготовленных на картографической пленке, через световой стол.

Правильность построения координатной сетки контролируют путем измерения циркулем-измерителем диагоналей всех квадратов сетки. Ошибки в длинах диагоналей не должно превышать 0,2 – 0,3 мм.

5.1.1. Построение пунктов съемочного обоснования по координатам

Для построения пунктов съемочного обоснования по координатам в масштабе 1:500 сетку координат оцифровывают через 50 м. За начало координат принимают юго-западный угол рамки. От него к северу надписывают абсциссы *X*, к востоку – ординаты *Y*. Координаты юго-западного угла плана выбирают так, чтобы тахеометрический ход разместился примерно в середине листа. Построение каждой точки съемочного обоснования производят с помощью циркуля-измерителя и масштабной линейки. Вначале определяют, в каком квадрате сетки располагается данная точка. Затем значение абсциссы откладывают по обеим сторонам квадрата и соединяют тонкой прямой линией. На этой линии откладывают значение ординаты *Y*. Полученную точку обводят условным знаком (кружочком), рядом надписывают номер пункта планово-высотного хода и его отметку до 0,01 м (справа от пункта).

Построение пунктов съемочного обоснования обязательно контролируют. Для этого значение горизонтального проложения между двумя точками циркулем-измерителем откладывают на масштабной линейке и сравнивают с

расстоянием между соответствующими точками на плане. Допустимое расхождение этих величин не должно быть более ±0,5 мм.

5.2. Нанесение ситуации и рельефа местности на план

Ситуацию наносят на план по данным журнала тахеометрической съемки и абрисов. Съемочные пикеты наносят на план по горизонтальному углу и горизонтальному проложению. Горизонтальные углы откладывают при помощи кругового транспортира от начального направления, а горизонтальные проложения – циркулем-измерителем по линейке. Справа от полученной точки подписывают отметку съемочного пикета до 0,1 м, слева – ее номер. Руководствуясь абрисом и подписями, сделанными в примечаниях тахеометрического журнала, рисуют условными знаками элементы ситуации. Виды угодий пока обозначают надписями. По отметкам точек проводят горизонтали с сечением рельефа через 1 м. Интерполирование горизонталей выполняют по тем направлениям, которые указаны в абрисе.

Окончив составление ситуации и рельефа на станции, приступают к нанесению съемочных пикетов следующей станции.

Составленный план представляют на просмотр преподавателю. После просмотра и проверки по указанию преподавателя план оформляют.

5.3. Оформление топографического плана

Порядок оформления следующий:

1) Пункты опорной геодезической сети, пункты съемочной сети, характерные высотные точки, ориентиры и местные предметы.

2) Гидрографическая сеть, урезы воды, подписи, относящиеся к гидрографии.

3) Населенные пункты.

4) Элементы линейной протяженности (границы контуров, дорожная сеть, электролинии, телефонные линии и др.).

5) Рельеф. При этом выделяют утолщенные горизонтали, расставляют бергштрихи, размещают надписи горизонталей, кратные 5 м, вычерчивают формы рельефа, не выражающиеся горизонталями (обрывы, ямы, скалы и др.).

6) Почвенно-растительный покров (виды угодий, которые ранее подписывались, теперь вычерчивают условными знаками).

7) Рамка и зарамочное оформление.

Во избежание пропусков после оформления план тщательно корректируют. Без разрешения преподавателя не следует стирать с плана

съемочные пикеты. Все оформление выполняется в соответствии с «Условными знаками для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500».

Перечень сдаваемых материалов: журнал тахеометрической съемки, абрисы для каждой станции, топографический план.

6. ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ НИВЕЛИРОВАНИЕ ПО ОСИ ТРАССЫ

Назначение нивелирования по оси трассы – определение отметок точек местности и построение профиля оси будущего инженерного сооружения.

Работы по нивелированию трассы состоят из следующих этапов:

- рекогносцировка трассы;
- разбивка пикетажа и поперечных профилей;
- нивелирование по оси трассы и по поперечным профилям;
- камеральная обработка результатов нивелирования;
- построение профиля;
- проектирование по профилю.

Инструменты и принадлежности для выполнения работы: нивелир Н-3 со штативом, две рейки, мерная лента, шпильки, колья или штыри для закрепления пикетов, молоток, нивелирный журнал, пикетажный журнал, карандаши.

6.1. Рекогносцировка трассы

Трассу выбирают с учетом следующих условий: число поворотов трассы должно быть минимальным, стороны трассы должны проходить на местности по возможности с малыми углами наклона.

В процессе рекогносцировки закрепляют вершины углов поворота (ВУ).

6.2. Разбивка пикетажа по трассе и поперечных профилей

Стороны трассы измеряют стальной лентой (шпагатом), отмечая на трассе штырями или колышками пикеты – точки, отстоящие одна от другой на 100 м. Для трасс, проходящих по участкам со сложным рельефом, пикеты могут разбиваться через 50 м.

Количество пикетов на бригаду – 12, количество поперечников – 2.

Если угол наклона местности больше 2°, то расстояние между пикетами увеличивают на величину поправки за наклон. Около каждого пикета забивают сторожок – кол или штырь с табличкой, на котором пишут номер пикета и номер бригады.

Расстояние до плюсовых точек, намечаемых на перегибах местности и пересечении трассы с дорогами и ЛЭП, измеряют от младшего пикета и отмечают сторожками, например ПК 5 + 65.0 (рис. 6.1).

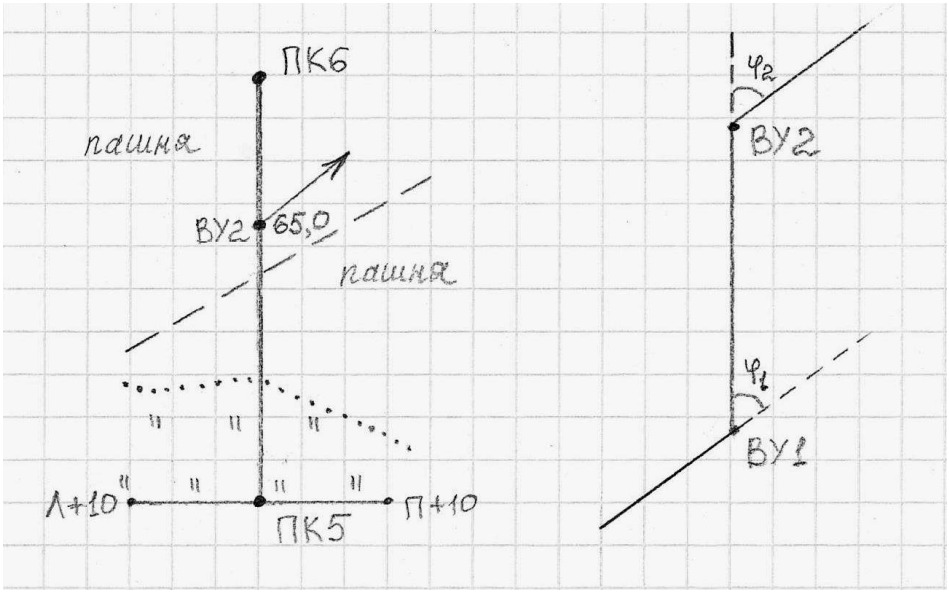


Рис. 6.1. Пикетажный журнал

Разбивают поперечные профили. Для этого перпендикулярно к оси трассы измеряют расстояние от оси трассы влево и вправо до точек перегиба местности. Концы поперечного профиля и точки перегиба отмечают сторожками, на которых надписывают расстояния от оси трассы с добавлением буквы Л (влево) или П (вправо) от оси трассы, например, Л + 10,0 или П + 5,0. Началом поперечного профиля может быть пикет или плюсовая точка. Его длину принимают по указанию преподавателя (10-20 м).

В процессе разбивки пикетажа ведут пикетажный журнал (рис. 6.1), в котором в масштабе 1:1000 показывают ось трассы, пикеты, плюсовые точки, поперечные профили, углы поворота, направление поворота трассы (стрелкой), на глаз зарисовывают контуры местности в полосе шириной по 20 м в обе стороны от оси трассы.

6.3. Нивелирование по оси трассы и по поперечным профилям

После выполнения поверок нивелира, результаты которых записывают на первой странице журнала, приступают к нивелированию по пикетажу. Нивелирование выполняют способом «из середины». Нивелирный ход привязывают к ближайшему реперу. На каждой станции хода две нивелирные точки являются связующими, с их помощью передают высоты по ходу. Остальные точки называются промежуточными. Как правило, связующими точками являются пикеты. Если превышение между пикетами больше длины рейки, то для передачи высот используют дополнительные связующие точки, называемые *Х* точками. *Х* точки закрепляют колышками или штырями. Между смежными пикетами может быть несколько точек *Х*, в зависимости от рельефа.

В качестве *X* точек можно использовать плюсовые точки. Примеры выбора станции и связующих точек показаны на рис. 6.2.

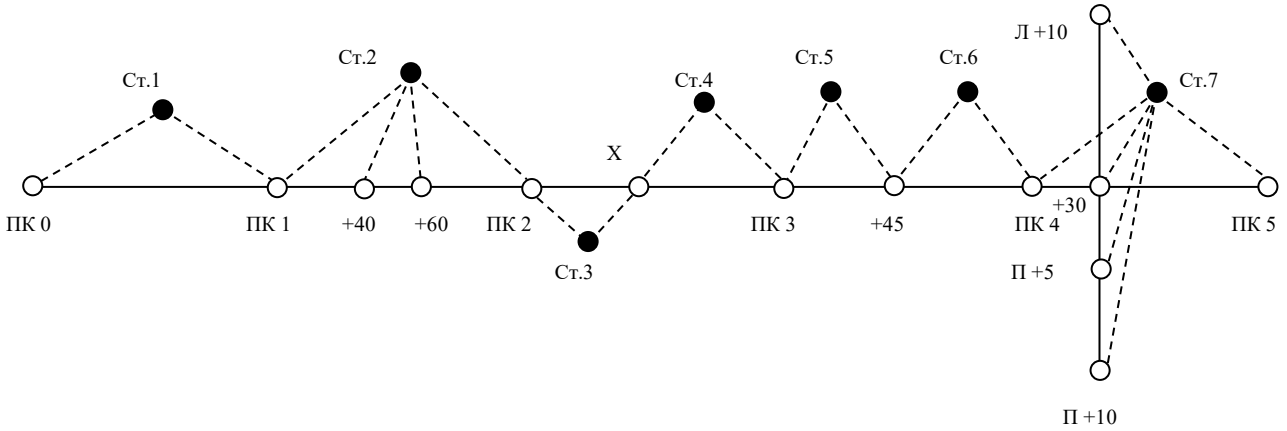


Рис. 6.2. Выбор станций при нивелировании трассы

6.4. Работа на станции при нивелировании

Все записи при нивелировании ведут в полевом журнале карандашом. Работу на станции производят в следующем порядке. Нивелир устанавливают примерно на равном расстоянии от связующих точек. Равенство расстояний определяют на глаз. На связующих точках на колышках устанавливают рейки.

Нивелир горизонтируют с помощью круглого уровня. Наводят трубу нивелира на заднюю рейку, совмещают элевационным винтом концы пузырька цилиндрического уровня и берут отсчет по черной стороне рейки (1). Порядок записей и вычислений показан в таблице 6. Поворачивают рейку, проверяют точность совмещения концов пузырька цилиндрического уровня и берут отсчет по красной стороне (2). Затем нивелир наводят на переднюю рейку, обязательно совмещают элевационным винтом концы пузырька цилиндрического уровня и снова берут отсчеты по черной и по красной сторонам рейки (3), (4).

При нивелировании все отсчеты и превышения записывают в миллиметрах.

Если отсчет по рейке больше 1 м, то рейку необходимо слегка покачивать вперед и назад. При этом в нивелир наблюдают и берут наименьший отсчет. Тут же на станции вычисляют превышения *h* по черной (5) и красной (6) сторонам реек по формуле:

$$h = З - П,$$

где З – отчет по задней рейке; П – отсчет по передней рейке.

Эти превышения не должны отличаться более чем на 5мм. При большем расхождении нивелирование связующих точек повторяют, несколько изменив высоту инструмента.

Если разность превышений, вычисленных на станции, не превосходит допуск, то вычисляют среднее превышение (7) до целых мм и записывают в графе 8 или 9.

ЖУРНАЛ НИВЕЛИРОВАНИЯ

Таблица 6

Прямой ход

Дата 27.07.02

Исполнитель *Орлов*

№№ станции	Номер пикетов и промежут. точек	Отсчет по рейке			Превышения		Среднее превышение		Горизонт инструмента	Отметки точек	Номера пикетов и пром. точек	Примечания
		задний	передний	промежут.	+	-	+	-				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0-1	1861(1)	1363(3)		498(5)							
		6646(2)	6146(4)		500(6)		+2 499(7)			127,115	0	
2	1-2	0430(1)	0656(3)			226(5)			128,046	127,616	1	
		5218(2)	5440(4)			222(6)		+2 224(7)				
	1+40,0			2530(8)						125,516	1+40,0	
	1+60,0			2340(9)						125,706	1+60,0	
3	2-x	2830	420		2410					127,394	2	
		7615	5202		2413		+2 2412					
4	x-3	2131	720		1411							
		6915	5509		1406		+2 1408					
5	3-3+45,0	2752	151		2601					131,218	3	
		7535	4942		2593		+1 2597			133,816	3+45,0	
∑		43933	30549		13832	448	6916	224				
		+13384			+13384		+6692					
					+6692							

Вычислил *Петров*

Проверил *Иванов*

Одновременно с нивелированием связующих точек нивелируют плюсовые точки и точки поперечного профиля. Для этого после вычисления среднего превышения на станции рейку с задней связующей точками и точки поперечного профиля, устанавливают ее на землю у сторожков нулем вниз, берут по одному отсчету только по черной стороне рейки и записывают отсчет в графу 5 (8), (9).

После этого задний реечник переходит на следующую связующую точку, а передний остается на предыдущей связующей точке, наблюдатель переходит и выбирает следующую станцию. Если в районе трассы есть только один репер, к которому будет привязываться трасса, то для контроля нивелирования студенты на практике прокладывают обратный нивелирный ход, начиная нивелирование с последнего пикета. В обратном ходе нивелируют только связующие точки. Если есть возможность привязать последний пикет к реперу, то обратный ход не прокладывают.

Все записи в журнале должны быть выполнены аккуратно, без подчисток и исправлений. Неправильные записи зачеркивают, а в примечаниях пишут причину зачеркивания.

В полевом журнале дают схему привязки (рис. 6.3) и делают полевую привязку. Для этого выполняют нивелирование от репера до ПКО в прямом и обратном направлениях, вычисляют среднее превышение $h_{ср}$.

Решают привязку, т. е. вычисляют отметку ПКО ($H_{пко}$) по формуле:

$$H_{ПКО} = H_{Rp} + h_{ср}$$

$$h_{ср} = \frac{h_{пр} + h_{обр}}{2},$$

если привязка сделана по схеме (*а*).

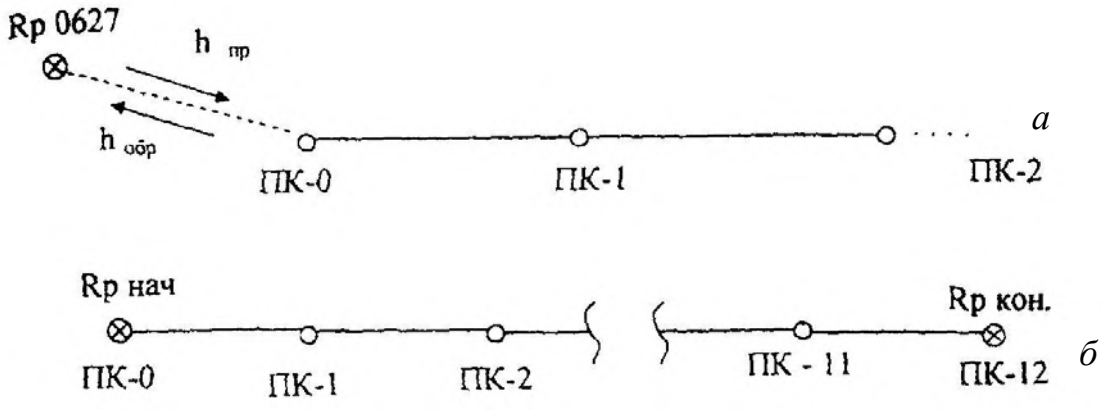


Рис. 6.3. Схемы привязки нивелирного хода:
а – висячий ход, *б* – разомкнутый ход

6.5. Камеральная обработка результатов нивелирования

Камеральную обработку производят в таком порядке:
- обработка нивелирного журнала;
- построение профиля;
- проектирование по профилю.

6.5.1. Обработка нивелирного журнала

Для проверки правильности записей и вычислений в журнале производят постраничный контроль по формуле:

$$\sum З - \sum П = \sum h.$$

Для этого на каждой странице журнала находят: суммы отсчетов ∑3, ∑4 по графам 3, 4; суммы превышений ∑6, ∑7, ∑8, ∑9 по графам 6, 7, 8, 9 (таблица 6). Вычисляют величины:

$$\sum 3 - \sum 4; \quad \sum 6 + \sum 7; \quad \sum 8 + \sum 9.$$

Соблюдение равенств:

$$\sum 3 - \sum 4 = \sum 6 + \sum 7; \quad \frac{\sum 6 + \sum 7}{2} = \sum 8 + \sum 9,$$

показывает, что вычисления на данной странице сделаны верно. Аналогично производят контроль и на следующих страницах журнала. Суммируя величины (∑8 + ∑9) отдельно по прямому и обратным ходам, получают суммарное превышения $\sum h_{прям}$ – прямого и $\sum h_{обр}$ обратного ходов. Сумма величин $\sum h$ прямого и обратных ходов дает невязку f_h:

$$f_h = \sum h_{прям} + \sum h_{обр}.$$

Если ход пройден точками с известными отметками $H_{НАЧ}$ и $H_{КОН}$ (рис. 6.3, *б*), невязку вычисляют по формуле:

$$f_h = \sum h_{ср} - (H_{КОН} - H_{НАЧ}).$$

Допустимое значение невязки вычисляют по формуле:

$$f_{h доп} = \pm\sqrt{L(км)}, \text{ мм},$$

где L – длина хода (в километрах) от начального до конечного пикета. Вычисляют невязку в полевом журнале, на чистой странице.

Если полученная невязка больше допустимой, то нивелирный ход переделывают. Если полученная невязка допустима, то в случае (*а*) половину ее распределяют с обратным знаком поровну в превышения прямого хода, округляя при этом поправки до целых километров. Во втором случае (*б*), вся невязка распределяется поровну с обратным знаком на превышения между связующими точками. Поправки в превышениях δ_h вычисляют по формуле:

$$\delta_h = -\frac{f_h}{n},$$

где n – число превышений.

Записывают поправки над средними превышениями в полевом журнале. Исправленные превышения определяют по формуле:

$$h_1 = h_{\text{ср}} + \delta_{h1}.$$

Из привязки хода к реперу вычисляют отметку нулевого пикета $H_{\text{ПКО}}$ (в нашем примере $H_{\text{ПКО}}$ = 127,115 м). Записывают ее в графе (II) напротив нулевого пикета (0).

Зная эту отметку и исправленные превышения, последовательно вычисляют отметки связующих точек по всему ходу:

$$H_1 = H_0 + h_1, \quad H_2 = H_1 + h_2 \ \ldots$$

Получив отметку последнего пикета $H_{\text{К}}$, проверяют правильность вычислений по формуле:

$$H_{\text{КОН}} - H_{\text{НАЧ}} = \sum h - \frac{f_h}{2} \ (а) \text{ или } H_{\text{КОН}} - H_{\text{НАЧ}} = \sum h - f_h \ (б).$$

Вычисления в журнале заканчивают нахождением отметок промежуточных точек. Их вычисляют через горизонт инструмента ГИ. Горизонтом инструмента называют отметку визирного луча нивелира на данной станции. ГИ вычисляют по формуле:

$$\text{ГИ} = \text{Н} + a,$$

где Н – отметка связующей точки на данной станции; a – отсчет по черной стороне рейки на этой точке.

Пример: Для станции 2 в таблице 6:

$$\text{ГИ} = H_1 + a_1,$$

$H_{\text{ПК1}}$ = 127,616 м, a_1 = 0430 мм – отсчет на ПК1,

ГИ = 128,046 м (записывают в графу 10 напротив станции 2).

Отметки промежуточных точек $Н_{ПРОМ}$ находят вычитанием промежуточных отсчетов по рейке «*с*» из горизонта инструмента:

$$H_{ПРОМ} = ГИ - c.$$

На этой же станции находим:

$H_{ПК1+40.0} = 128{,}046 - 2{,}530 = 125{,}516$ м,

$H_{ПК1+60.0} = 128{,}046 - 2{,}340 = 125{,}706$ м.

6.5.2. Построение профиля трассы

По вычисленным отметкам пикетов, плюсовых точек и точек поперечного профиля на координатной бумаге строят продольный и поперечный профили местности по трассе. Масштабы построения:

- для продольного профиля: горизонтальный 1: 2000, вертикальный 1:200;
- для поперечного профиля: горизонтальный 1: 200, вертикальный 1:200.

Последовательность построения профиля приведена ниже.

Первоначально вычерчивают сетку профиля. Название граф и размеры в миллиметрах показаны на рис. 6.4.

В графе «Расстояния» отмечают положения пикетов и плюсовых точек, выписывают расстояния между плюсовыми точками и пикетами. *X* точки не строят. Ниже этой графы выписывают номера пикетов.

Пользуясь пикетажным журналом, заполняют графу «План трассы», в которой показывают:

а) ось в виде прямой линии красного цвета;

б) ситуацию (по результатам съемки полосы местности) соответствующими условными знаками.

В графу «Фактические отметки» выписывают из журнала нивелирования отметки всех пикетов и плюсовых точек с округлением до 0,01 м.

Выбирают и надписывают отметку условного горизонта, которая должна быт на 5-8 метров меньше самой низкой отметки по трассе.

В системе прямоугольных координат, где линия условного горизонта – ось расстояний, а вертикальная линия, проходящая через нулевой пикет – ось отметок, строят положение всех пикетов и плюсовых точек.

Полученные точки соединяют прямыми линиями и получают продольный профиль местности по оси трассы. Все построения выполняют карандашом.

Над точками продольного профиля, которые служили началом поперечных профилей, строят сетки поперечных профилей (рис. 6.4).

Заполняют графы «Расстояния» и «Фактические отметки» так же, как это делалось при построении продольного профили. Под сеткой надписывают пикетажные обозначения точек поперечного профиля.

Выбрав условный горизонт, строят положение точек поперечного профиля. Соединив полученные точки, получают поперечный профиль местности.

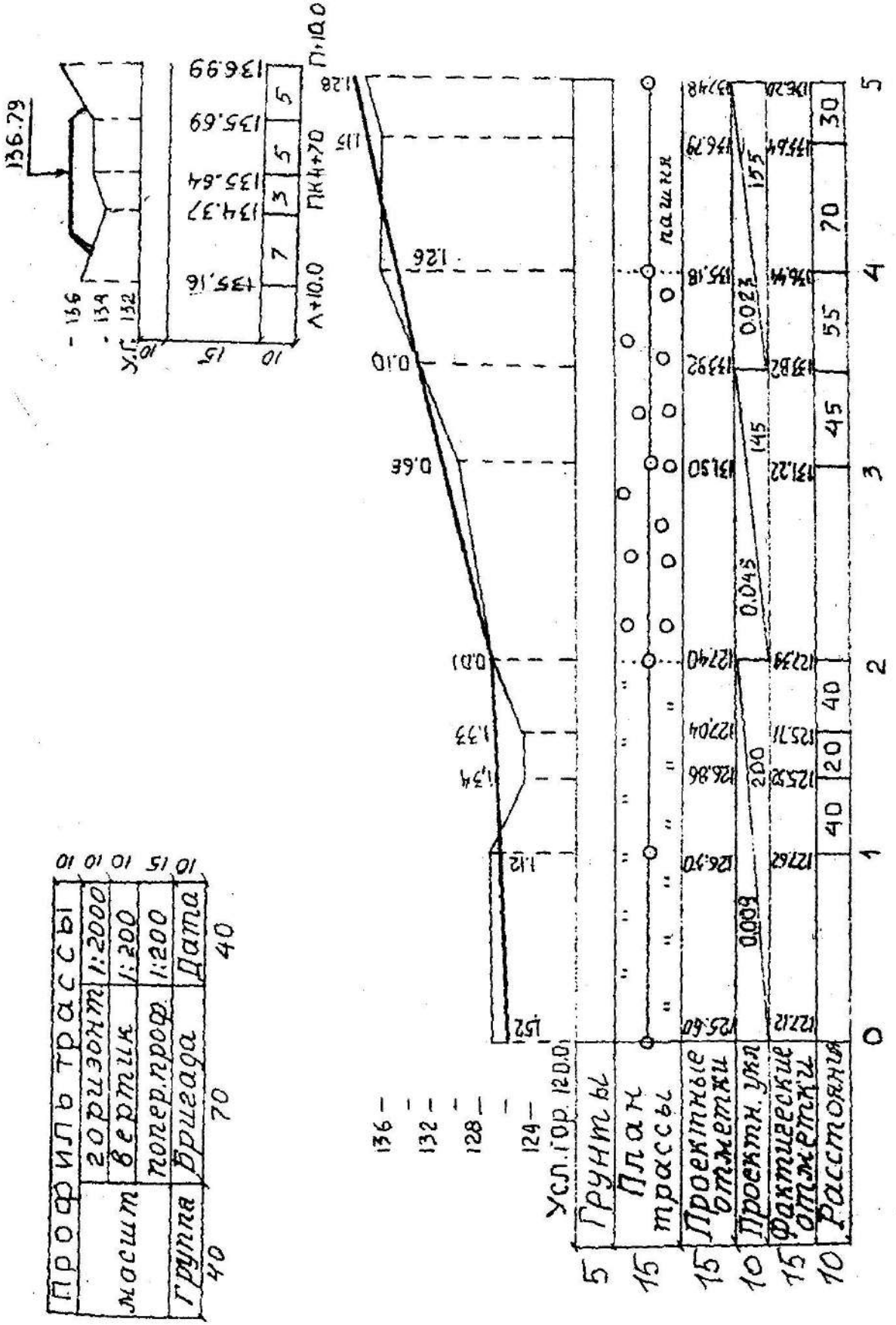


Рис. 6.4. Профиль трассы

Профиль местности – графический документ, позволяющий решать ряд инженерных задач.

6.5.3. Проектирование по профилю

На практике по продольному профилю студенты проводят проектную линию, которая будет являться профилем оси будущего инженерного сооружения (дороги, канала и т. д.). Проектную линию намечают графически с учетом следующих требований:

- уклоны участков проектной линии не должны превышать допустимых значений (предельный уклон задается преподавателем);
- объем земляных работ должны быть минимальным;
- объемы насыпей и выемок должны быть примерно одинаковы, т. е. на профиле должно соблюдаться примерное равенство площадей насыпей и выемок;
- шаг проектирования принимают от 100 до 600 м;
- измерение уклона проектной линии можно производить на пикетах или плюсовых точках.

Проектная отметка ПКО задается преподавателям или принимается равной фактической отметке этого пикета.

На рис. 6.4 проектная отметка ПКО H_0 = 125,60 м участков проектной линии с разными уклонами намечено три: длиной 200, 145 и 155 м; измерение уклона проектной линии предусмотрено в двух точках: на ПК2 и на плюсовой точке ПК3+45,0 расчет и вычерчивание проектной линии производится в следующем порядке:

По профилю определяют приближенно (с точностью 0,1 мм в вертикальном масштабе профиля) проектные отметки точек перелома и конца проектной линии:

$$H_2 = 127{,}4\text{м}; \quad H_{3+45.0} = 133{,}8\text{ м}; \quad H_5 = 137{,}4\text{ м}.$$

Вычисляют превышения по участкам проектной линии:

$$h_1 = H_2 - H_0 = +1{,}8\text{ м};$$
$$h_2 = H_{3\text{-}45.0} - H_2 = +6{,}4\text{ м};$$
$$h_3 = H_5 - H_{3+45.0} = +3{,}6\text{ м}.$$

вычисляют уклоны i – отношения превышений h к горизонтальным проложениям участков проектной линии d:

$$i = \frac{h}{d}..$$

$$i_1 = \frac{1{,}8}{200} = +0{,}009;$$

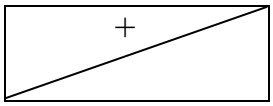
$$i_2 = \frac{6,4}{145} = +0,045;$$

$$i_3 = \frac{3,6}{155} = +0,023.$$

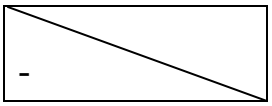
Полученные уклоны округляют до 0,001 и выписывают в графу «Проектные уклоны» продольного профиля.

Все данные проектирования наносят на профиль красным цветом.

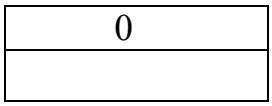
Под выписанными уклонами проводят линии (с подъемом (*а*), спуском (*б*) или горизонтальные (*с*) – в зависимости от знака уклона). Под линиями выписывают длины участков проектной линии.



(*а*)



(*б*)



(*с*)

По значениям округленных уклонов вычисляют и выписывают в соответствующую графу продольного профиля проектные отметки концов участков проектной линии по формуле:

$$H_{n\text{-}1} = H_n + i \times d.$$

Для нашего примера:

$$H_2 = 125,60 + 0,009 \times 200 = 125,60 + 1,80 = 127.40 \text{ м};$$

$$H_{3\text{-}45} = 127,40 + 0,45 \times 145 = 127,40 + 6,52 = 133,92 \text{ м};$$

$$H_5 = 133,92 + 0,023 \times 155 = 133,92 + 3,56 = 137,46 \text{ м}.$$

На профиле уточняют по вычисленным отметкам положение точек перелома и конца проектной линии, соединяют полученные отрезки линиями и получают проектный профиль оси будущего инженерного сооружения.

Вычисляют и выписывают проектные отметки всех остальных пикетов и плюсовых точек трассы по той же формуле (здесь «*d*» – это расстояние между пикетами, или расстояние от пикета до плюсовой точки). $H_1 = H_0 + i \times 100 = 126,50$ м, $H_{1\text{-}40} = H_1 + i \times 40 = 126,86$ м. Контролем вычислений служат выписанные проектные отметки конца участков проектной линии.

Вычисляют рабочие отметки как разности проектных и фактических отметок соответствующих точек профиля. Рабочие отметки выписывают около проектной линии: положительные (высота насыпи) – выше, а отрицательные (глубина выемки) – ниже проектной линии.

В заключении по вычисленной отметке точки оси поперечного профиля наносят положение проектной линии на поперечном профиле. Над проектной линией выписывают ее отметку. Проектную линию наносят горизонтально, по 10м влево и вправо от оси трассы. Показывают кюветы (если линия идет в выемке) и откосы (если линия идет по насыпи). Уклон откосов и бортов канав

45°, ширина дна кювета – 0,6 м. Над продольным профилем вычерчивают штамп.

Перечень сдаваемых материалов: отчет по нивелированию (раздел в общем отчете по практике), пикетажный журнал, журнал нивелирования, профиль местности по оси трассы.

7. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

На геодезической практике студенты выполняют следующие инженерно-геодезические задачи:

- вынос в натуру точки с заданными координатами;
- вынос на местность точки с заданной отметкой;
- вынос в натуру линии с заданным уклоном.

Проектные данные для выполнения этих задач (отметки, длины линий, уклон, координаты) задает преподаватель.

Подготовительные работы для решения инженерно-геодезических задач выполняются по топографическому плану масштаба 1:500, составленному студентами по результатам тахеометрической съемки.

Вынос проекта в натуру (геодезические разбивочные работы) осуществляются от имеющихся на участке пунктов геодезической сети с использованием следующих геодезических приборов: теодолита Т-30, нивелира Н-3 или Н-10, мерной ленты, рулетки.

7.1. Элементы геодезических разбивочных работ

Разбивочные работы можно представить как совокупность отдельных простых операций. Рассмотрим основные из них.

7.1.1. Вынос в натуру проектного горизонтального угла

Над вершиной угла O устанавливают теодолит и ориентируют его лимб вдоль заданного направления OA. Вращением алидады откладывают проектный угол β и по направлению визирной оси трубы забивают колышек C_1. Для исключения влияния коллимационной ошибки проводят трубу через зенит и откладывают величину угла β при другом положении вертикального круга, забивают колышек в точке C_2. Расстояние C_1-C_2 делят пополам, полученный угол AOC и будет проектным углом. После построения проектного угла производят контрольные измерения этого угла (см. рис. 7.1).

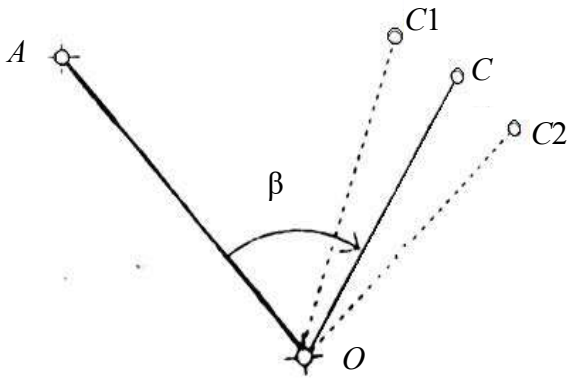


Рис. 7.1. Построение на местности проектного горизонтального угла

7.1.2. Вынос в натуру проектного расстояния

Для выноса проектного расстояния по заданному направлению мерной лентой откладывают наклонную длину, конец линии закрепляют колышком. Для контроля длину линии измеряют второй раз – обратно. Наклонное проектное расстояние находят по формуле:

$$L = \sqrt{D^2 + h^2} \ ,$$

где D – горизонтальное проложение линии, м; h – превышение между точками концами линии, м.

D и h определяют по топографическому плану.

7.2. Вынос в натуру точки с заданными координатами (полярным способом)

На топографическом плане запроектирована буровая скважина (C), которую необходимо вынести в натуру от ближайших пунктов геодезической сети (в примере пункты 1 и 2 на рис. 7.2).

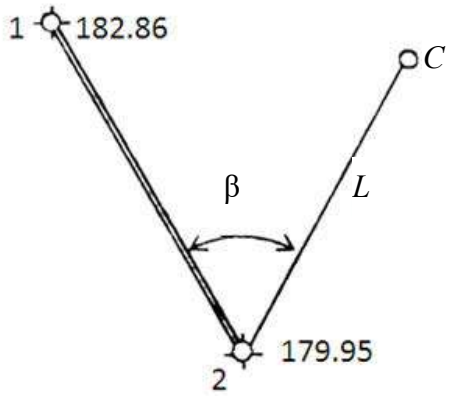


Рис. 7.2. Схема выноса в натуру запроектированной точки

Прямоугольные координаты и отметки пунктов геодезической сети 1 и 2 выписывают из ведомостей вычисления координат и высот точек съемочного обоснования, а координаты и отметку точки *C* студенты определяют графически с топографического плана (таблица 7).

Таблица 7

Исходные данные

	X	*У*	*H*
1	3833,62	2950,42	182,86
2	3771,20	2838,80	179,95
C	3764,42	2858,20	184,50

Для переноса запроектированной точки в натуру применим способ полярных координат.

Вначале выполняют геодезическую подготовку проекта. Для этого необходимо вычислить разбивочные элементы, т. е. полярный угол β и полярное расстояние *L* по формулам:

$$\beta = \alpha_{2\text{-}C} - \alpha_{2\text{-}1},$$

$$r(\alpha_{2-C}) = \operatorname{arctg}\frac{Y_C - Y_2}{X_C - X_2},$$

$$r(\alpha_{2-1}) = \operatorname{arctg}\frac{Y_1 - Y_2}{X1 - X_2},$$

$$L = \sqrt{D^2 + h^2}, \quad D_{2-C} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}, \; h = H_C - H_2,$$

где X_1, X_2, Y_1, Y_2 – прямоугольные координаты исходных пунктов; X_C, Y_C – прямоугольные координаты запроектированной точки *C*; H_2, H_C – отметки точек 2 и *C*; $D_{2\text{-}C}$ – горизонтальное проложение линии 2 – *C*; *L* – наклонное проектное

расстояние от пункта 2 до точки *C*; $\alpha_{2\text{-}C}$, $\alpha_{2\text{-}1}$ – дирекционные углы линий 2-*C* и 2-1.

В нашем примере:

$$r(\alpha_{2-1}) = \text{arctg}\frac{2950{,}42 - 2838{,}80}{3833{,}62 - 3771{,}20} = \text{arctg}\frac{+111{,}62}{+62{,}42} = 1{,}78821 \ (1-\text{ячетверть}),$$

$$r(\alpha_{2-1}) = \alpha_{2-1} = 60°47'07''.$$

$$r(\alpha_{2-C}) = \text{arctg}\frac{2858{,}20 - 2838{,}80}{3764{,}42 - 3771{,}20} = \text{arctg}\frac{+19{,}40}{-6{,}78} = 2{,}86136 \ (2-\text{ячетверть}),$$

$$r_{2-C} = 70°44'10''.$$

$$\alpha_{2-C} = 180° - 70°44'10'' = 109°15'50'',$$

$$\beta = 109°15'50'' - 60°47'07'' = 48°28'43'',$$

$$D_{2-C} = \sqrt{19{,}40^2 + 6{,}78^2} = 20{,}55, \text{ м},$$

h = 184,50 м – 179,95 м = 4,55 м,

$$L = \sqrt{20{,}55^2 + 4{,}55^2} = 21{,}05, \text{ м}.$$

Затем составляют разбивочный чертеж в масштабе топографического плана, на котором запроектирован объект (рис. 7.3).

На разбивочный чертеж наносят: пункты геодезической сети (1, 2); величины углов и линий, которые необходимо отложить на местности от исходных пунктов до проектированной точки.

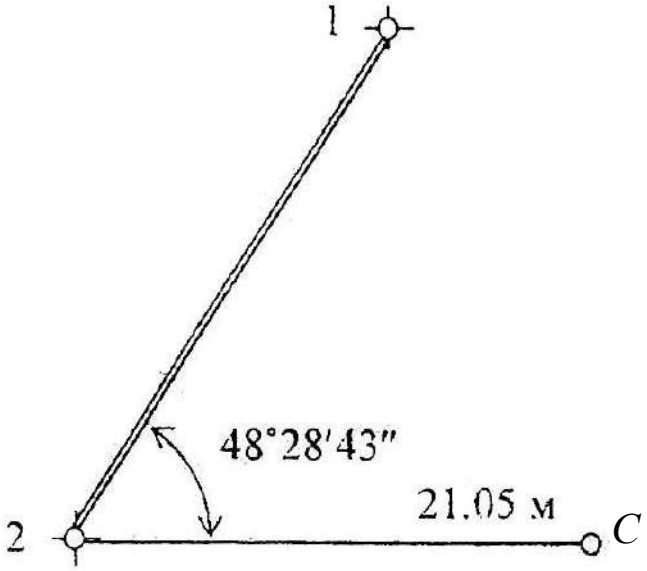


Рис. 7.3. Разбивочный чертеж

На местности в точке 2 устанавливают теодолит и способами изложенными выше (7.1.1, 7.1.2), отмеряют величины, указанные на разбивочном чертеже. Для контроля можно вычислить полярные координаты точки *C* от пункта 1.

7.3. Вынос в натуру точки с заданной отметкой

От пункта геодезической сети А с отметкой H_0 = 49,347 м необходимо вынести на местность точку В с проектной отметкой $H_{пр}$ = 48,000 м. Сначала точку В выносят и закрепляют на местности в соответствии с ее плановым положением.

Для выноса проектной отметки в точке В между исходной точкой А и проектной точкой В устанавливают нивелир (рис. 7.4).

Установив рейку на т. А, берут по ней отсчет *a* (пусть *a* = 0,572 м).

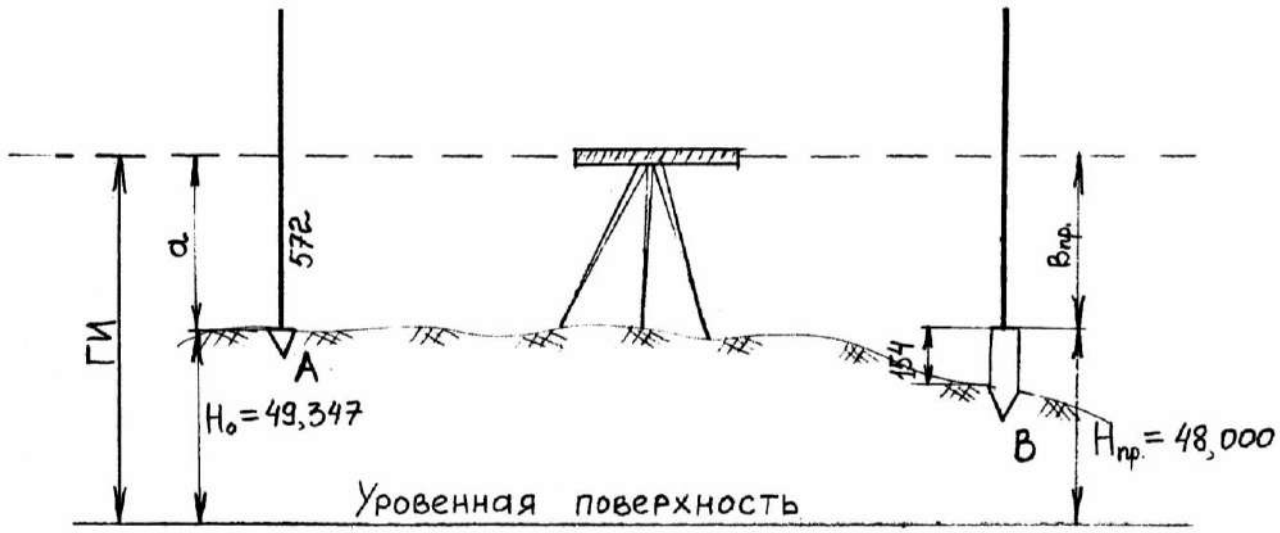


Рис. 7.4. Вынос в натуру точки с проектной отметкой

Определяют горизонт инструмента (ГИ) по формуле:

$$ГИ = H_0 + a = 49{,}347 + 0{,}572 = 49{,}946 \text{ м}.$$

Вычисляют проектный отсчет по рейке $в_{пр}$, соответствующий проектной отметке точки В.

$$в_{пр} = ГИ - H_{пр} = 49{,}946 \text{ м} - 48{,}000 \text{ м} = 1946 \text{ мм}.$$

Затем, наблюдая в трубу нивелира по рейке установленной в точке В, забивают колышек на такую глубину, чтобы отсчет по рейке, установленной пятой на колышке, был равен вычисленному значению $в_{пр}$ = 1946 мм.

Допустим, отсчет по рейке в т. В равен 2100 мм, тогда 2100 – 1946 = 154 мм, это величина, на которую надо приподнять колышек, чтобы получить проектную отметку, соответствующую верху колышка.

7.4. Вынос в натуру линии с проектным уклоном

От пункта геодезической сети А с отметкой H_0 = 50,20 м (рис. 7.5, *а*) требуется разбить линию длинной D = 30 м с уклоном i = 0,040.

Проектное направление линии выносят на местность, закрепляют точками, расположенными через 10 м (1, 2, В).

Вычисляют проектные отметки точек 1, 2, В по формуле:

$$H_{\text{пр}} = H_0 + i \times d,$$

где $H_{\text{пр}}$ – проектная отметка точки, закрепленной на линии АВ; i – проектный уклон; d – расстояние от исходной точки А до определенной точки.

$$H_{\text{пр1}} = 50{,}20 + 0{,}040 \times 10 = 50{,}20 + 0{,}04 = 50{,}24 \text{ м};$$

$$H_{\text{пр2}} = 50{,}20 + 0{,}040 \times 20 = 50{,}20 + 0{,}08 = 50{,}28 \text{ м};$$

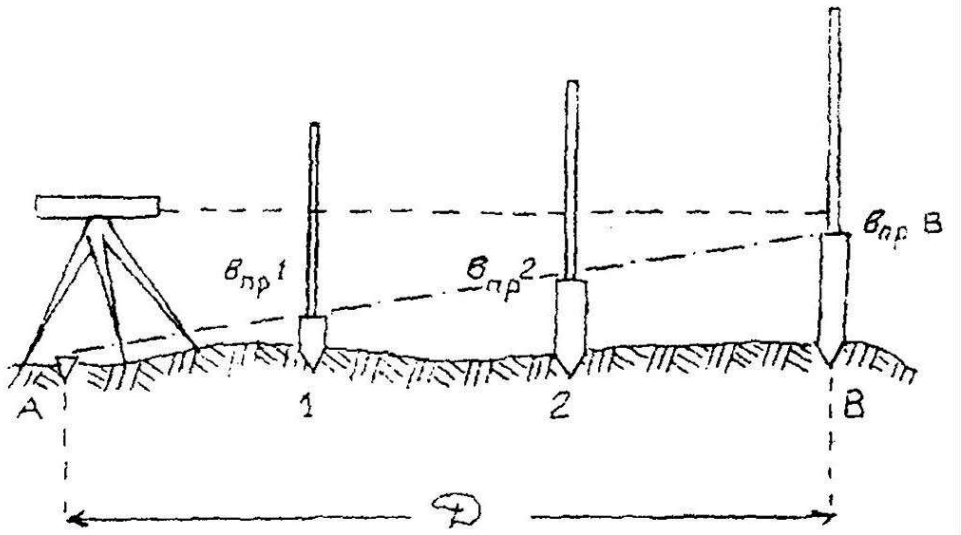
$$H_{\text{прВ}} = 50{,}20 + 0{,}040 \times 30 = 50{,}20 + 0{,}12 = 50{,}32 \text{ м}.$$

Вычисленные проектные отметки точек 1, 2, В выносят в натуру изложенным выше способом. На рис. 7.5, *а* $в_{\text{пр}}1$, $в_{\text{пр}}2$, $в_{\text{пр}}$ В – проектные отсчеты по рейке в точках 1, 2, В.

При другом способе разбивки проектного уклона подъемными винтами нивелира наклоняют трубу нивелира до тех пор, пока отсчет по рейке на вынесенной проектной точке В не станет равен высоте инструмента. В результате линия визирования будет параллельна линии заданного уклона. Промежуточные точки линии определяют установкой рейки в точках 1 и 2 и получением на них того же отсчета, что и на точке В (рис. 7.5, *б*).

Материалы, прилагаемые к отчету в главе «Инженерно-геодезические задачи».

а



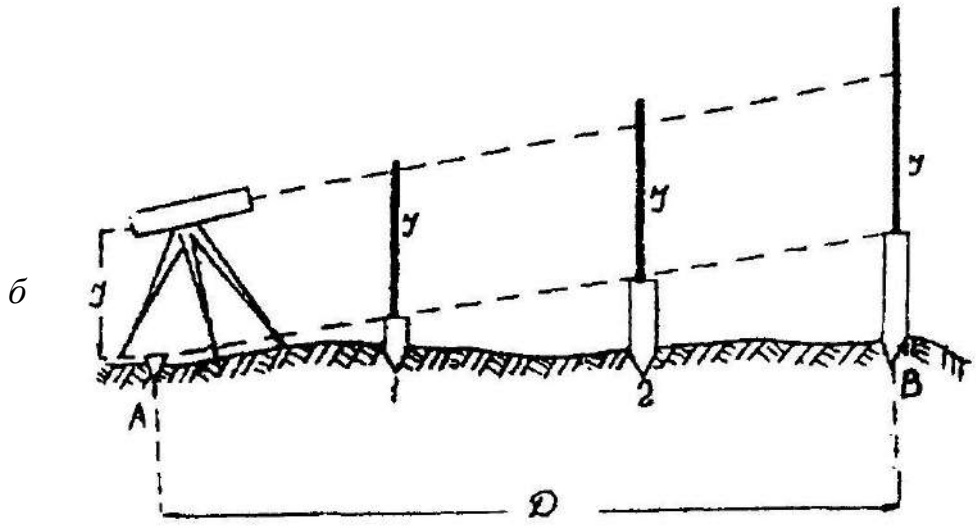


Рис. 7.5. Построение заданного уклона

В отчете по геодезической практике в главе «Инженерно-геодезические задачи» дается описание решения задачи, все вычисления по определению разбивочных элементов и разбивочные чертежи с указанием углов и длин, которые необходимо отложить на местности от исходных пунктов до проектных точек; на топографическом плане бригады указывают проектные точки.

8. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА ПО ПРАКТИКЕ

По итогам геодезической практики студенты пишут бригадный отчет. Отчет оформляется на листах А-4. В отчете отражаются следующие вопросы:

- описание участка работ: местоположения, рельеф, растительность, гидрография, дорожная сеть, наличие населенных пунктов, промышленных предприятий и т. п.;

- виды геодезических работ, поверки приборов, камеральная обработка результатов полевых измерений, результаты и допуски;

- виды работ, выполненные отдельными студентами.

Содержание отчета:

1. Общие сведения.
2. Физико-географическая характеристика района работ.
3. Рекогносцировка местности и закладка центров.
4. Поверки теодолита.
5. Измерение горизонтальных и вертикальных углов и измерение расстояний.
6. Вычисление координат и отметок съемочного обоснования.
7. Тахеометрическая съемка.
8. Поверки нивелира.
9. Геометрическое нивелирование.
10. Инженерно-техническое нивелирование по оси трассы.
11. Решение инженерно-геодезических задач.
12. Вычерчивание топографического плана.

К отчету прилагаются:

1. Схема съемочного обоснования и привязки в произвольном масштабе (на схему выписывают средние значения измеренных углов и длин).
2. Журналы измерения углов и длин сторон.
3. Ведомости вычисления отметок точек съемочного обоснования.
4. Ведомость вычисления координат точек съемочного обоснования.
5. Журнал тахеометрической съемки.
6. Абрисы.
7. Топографический план масштаба 1:500.
8. Пикетажный журнал.
9. Журнал нивелирования.
10. Профиль местности по оси трассы.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ГОСТ 22268-76. Геодезия. Термины и определения.

ГКИНП-02-033-79. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500.

Клепко В. Л., Назаров И. В. Геодезия: курс лекций. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. – 148 с.

СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

Условные знаки для топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Стандартный шрифт

Стандартный шрифт (по ГОСТу 2.304-81 – чертежный шрифт) пишется от руки с наклоном 1:3. Применяется для ведения записей в журнале и оформления документации.

СХЕМА Профиль План

147°25′ 638,9 70,241 139°57′

Студент Преподаватель

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Вычислительный шрифт

Вычислительный шрифт имеет прямое начертание. Он применяется при полевых и вычислительных работах. Шрифт легко запоминается и читается, прост в исполнении.

Пирамида. Сигнал. Азимутный пункт. Широта и долгота. Наблюдение горизонтальных углов. Исправленные углы.

4152 43175 9.175 371 3.323 715 4252.62 3189.14
2245 11657 7963.57 152 343.5 1.569 145 2356.16
250° 41' 24° 32' 293° 38' 45" 225° 49' 31° 53' 47" 15° 24'

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

Н. В. Блинкова, К. В. Вандышева

ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА)

Методические рекомендации
по производственной практике,
по составлению отчета для студентов специальности
21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций
«Геофизические методы исследования скважин (ГИС)» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)»

Екатеринбург
2020

Б69

Рецензенты: *Писецкий В. Б.,* д-р геол.-мин. наук, профессор кафедры геоинформатики Уральского государственного горного университета;
Иголкина Г. В., д-р геол.- мин. наук, профессор кафедры геофизики Уральского государственного горного университета.

Блинкова Н. В., Вандышева К. В.

Б69 ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА): методические рекомендации по производственной практике, по составлению отчета для студентов специальности 21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций «Геофизические методы исследования скважин» (ГИС) и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)». 2-е издание, дополненное / *Н. В. Блинкова, К. В. Вандышева*; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 24с.

Методические рекомендации содержат цели и задачи производственной практики, включающих в себя выработку навыков производственного труда, знакомства с техникой, геофизической аппаратурой, методикой работ. Даются необходимые рекомендации по руководству и организации практики от университета и от предприятия.

Для студентов специальности 21.05.03 Технология геологической разведки специализаций «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» и «Геофизические методы исследования скважин»

© Блинкова Н. В.,
Вандышева К. В., 2010, 2018
© Уральский государственный
горный университет, 2010, 2018

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
Факультета геологии и геофизики УГГУ
_____2018 г.
Председатель комиссии
_____проф. Бондарев В. И.

Н. В. Блинкова, К. В. Вандышева

ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА)

Методические рекомендации
по производственной практике,
по составлению отчета для студентов направления
21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций
«Геофизические методы исследования скважин (ГИС)» и
«Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)»

2-е издание, дополненное

Издание УГГУ Екатеринбург, 2018

Оглавление

Введение…… 4
1. Организация и руководство практикой……. 5
1.1. Организация практики……. 5
1.2. Руководство практикой…… 6
1.2.1. Руководство практикой от университета…….. 6
1.2.2. Руководство практикой от предприятия……... 6
2. Обязанности и права студентов…….. 10
2.1. Обязанности студента…….. 10
2.2. Права студентов…… 12
3. Цели и задачи практики……... 14
3.1. Цель практики……... 14
3.2. Задачи практики…… 14
4. Структура и содержание отчёта……. 15
5. Основные требования к оформлению отчета…… 19
6. Перечень документов, необходимых
при отъезде на практику…….. 21
7. Содержание практики…….……. 21
Рекомендуемая литература……. 23

ВВЕДЕНИЕ

Производственная практика является ответственным этапом в подготовке горных инженеров-геофизиков. Данная программа предусматривает выработку у студентов навыков производственного труда и преобретения профессии, необходимой для инженерной деятельности, закрепления знаний по общеинженерным и специальным дисциплинам и является неотъемлемой частью всего учебного процесса.

Цели, задачи, содержание, объем практик и их название определяются требованиями федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) по направлениям подготовки ВО, программами практик, разработанных с учетом специфики подготовки обучающихся. Цель практики заключается в формировании профессиональных навыков через закрепление, расширение, углубление и систематизацию знаний, полученных студентами в процессе теоретического обучения, проверке профессиональной готовности будущего специалиста к самостоятельной трудовой деятельности и приобретение профессионального опыта. Задачи практики определяются в рабочих программах практик и индивидуальных заданиях, разработанных кафедрами университета ответственными за проведение практики (с учетом специфики и уровня подготовки специалиста).

1. ОРГАНИЗАЦИЯ И РУКОВОДСТВО ПРАКТИКОЙ

1.1. Организация практики

Производственная практика студентов четвёртого курса проводится в геологоразведочных организациях (партиях, экспедициях и частных компаниях), а также научно-исследовательских и проектных организациях геолого-разведочного профиля.

Для успешного проведения производственной практики студентам необходимо знать определённые разделы из цикла предшествующих дисциплин. Из дисциплины «Геофизические методы исследования скважин», оборудование для выполнения спуско-подъёмных операций, геофизические цифровые станции для регистрации данных каротажа, технику и методику работ при выполнении определённых геофизических методов, теорию этих методов. Из дисциплины «Аппаратура геофизических исследований скважин», «Электронные измерительные устройства» необходимо студентам знать устройство скважинных приборов, устройство регистраторов и станций на уровне блок-схем. Из курса «Физика горных пород» – основные физические и физико-механические характеристики горных пород, классификацию горных пород, рудных и нерудных минералов по их способу образования, а так же классификации по буримости.

Из курса «Разведочная геофизика» основные методы разведки и их практической применение.

Из курса наземных методов разведки указываются предпосылки проведения работ, последовательность выполнения разными ме-

тодами, и их взаимодействие, типовой и рациональный комплекс геофизических работ. Определение масштаба съемки, обоснование сети наблюдения, точности и способа ее определения, выбор аппаратуры. Описание последовательности обработки, методики интерпретации результатов наблюдений каждым методом и способ представления полученных данных.

1.2. Руководство практикой

1.2.1. Руководство практикой от университета

Руководитель практики студентов от университета:

– обеспечивает проведение всех организационных мероприятий перед выездом студентов на практику (проводят собрание студентов и инструктаж по вопросам проведения практики, проверяют обеспеченность студентов программами, дневниками, а так же индивидуальным заданиями);

– проводят общий инструктаж по вопросам техники безопасности на практике и дисциплины в пути следования на место практики и обратно;

– обеспечивает высокое качество прохождения практики студентами в соответствии с программой практики, контролирует обеспечение студентов рабочими местами.

1.2.2. Руководство практикой от предприятий

Ответственность за прохождение практики на предприятии возлагается на руководителя предприятия. Непосредственное руководство практикой студентов в структурных подразделения пред-

приятий возлагается приходом руководителя предприятия на высококвалифицированных специалистов.

Предприятие обязано обеспечить студентов во время прохождения производственной практики оплачиваемыми рабочими местами в соответствии с программой практики, создать необходимые условия для усвоения студентами знаний о новой технике, новой аппаратуре, новых методах, передовой технологии, современных вопросов экономики и передовых методов организации труда.

Руководители практики организуют проведение обязательных инструктажей по охране труда и технике безопасности (вводного и на рабочем месте) с оформлением соответствующей документации. Безопасные условия труда и обучения проводятся в соответствии с «Порядком обучения по охране труда и проверке знаний требований охраны труда работников организаций», утвержденные Министерством образования Российской Федерации и Министерством труда и социального развития от 13.01.2003 №1/29 «Об утверждение порядка обучения по охране труда и проверке знаний требований по охране труда работников организаций».

Руководители практики обязаны обеспечить студентов (учащихся) на время прохождения практики спецодеждой, спецобувью и предохранительными приспособлениями в соответствии с трудовым кодексом Российской Федерации и постановлением Министерства труда Российской Федерации от 01.06.2009 № 290 н (в редакции от 12.01.2015) «об утверждений правил обеспечения работников специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами инди-

видуальной защиты», девствующей в части, непротиворечащей трудовому кодексу Российской Федерации.

Предприятие несёт полную ответственность за несчастный случай, происшедший со студентами во время прохождения ими практики.

Руководители предприятий могут выносить в случае необходимости в приказном порядке, взыскания студентам-практикантам, нарушающим правила внутреннего распорядка, и сообщать об этом в университет.

Руководители практики должны создать необходимые условия для выполнения студентами (учащимися) программы производственной практики. Не допускать использования студентов на работах, не предусмотренных программой прохождения практики и не имеющих отношения к профессии (специальности) студентов.

Руководитель от предприятия, осуществляющий общее руководство практикой:

– знакомит студентов с организационной структурой предприятия и основными направлениями его работ;

– совместно с руководителем практики от университета организует и контролирует проведение практики в соответствии с программой и согласованным календарным графиком прохождения практики;

– организует экскурсии по предприятию и на другие объекты (скважины);

– вовлекает студентов в научно-исследовательскую и рационализаторскую работу.

Руководители обязаны предоставить студентам возможность пользования лабораториями, мастерскими, кабинетами (библиотекой), технической и другой документацией в подразделениях предприятия для успешного освоения студентами программы производственной практики и выполнения индивидуальных занятий.

Руководители от предприятия должны обеспечить иногородних студентов койко-местом в общежитии в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями на время прохождения производственной практики с оплатой по установленным нормам.

Руководители должны осуществлять контроль за соблюдением студентами мер пожарной безопасности.

Руководители практики должны обеспечить табельный учёт выхода на работу студентов, дать характеристику о работе каждого студента и заключение о качестве подготовленного ими отчёта.

Руководители практики должны производить оплату и стимулирование труда студентов, зачисленных на вакантные рабочие места (должности), в период прохождения производственной практики по выполняемой работе в соответствии с трудовым кодексом Российской Федерации, локальными нормативными актами, действующими в обществе, и договорами образовательных учреждений на проведение производственной практики, заключаемых с обществом.

Руководители структурных подразделений в праве отстранять студентов от дальнейшего прохождения практики и досрочно отправить студента в расположение образовательного учреждения в случае грубого нарушения ими требований, правил, предписаний и инструкций по охране труда и технике безопасности, предусмотренных

трудовым кодексом Российской Федерации и иными нормативно трудовыми актами, действующими в части не противоречащими трудовому кодексу Российской Федерации.

Во время проведения производственной практики руководители практики должны предоставлять работникам, зачисленным на вакантные рабочие мечта (должности) гарантии компенсации, предусмотренные трудовым законодательством Российской Федерации.

Кроме того руководители практики должны знакомить студента с организацией работ на конкретном рабочем месте; помогать студентам правильно выполнять все задания, овладевать навыками производственной работы и рабочими профессиями, получать необходимые материалы для составления отчётов по практике; контролировать ведение дневников, подготовку отчётов по практике, составлять производственные характеристики об отношении студентов к работе, их деловые качества, а так же их участие в общественной жизни предприятия.

2. ОБЯЗАННОСТИ И ПРАВА СТУДЕНТОВ

2.1. Обязанности студентов

До отъезда на практику, студент должен знать какая кафедра и кто из её преподавателей руководит практикой, знать место и адрес прохождения практики; получить на кафедре, осуществляющей руководство практикой, путёвку-удостоверение, программу практики и пройти общий инструктаж по вопросам техники безопасности; изучить программу практики и маршрут следования к месту практики, сдать книги в библиотеку и своё место в общежитии, оформить об-

ходной лист и сдать его на кафедру; студентам, обучающимся платно оплатить обучение и оформить это в бухгалтерии.

Своевременно, но не позднее, чем за день до начала практики выехать на предприятие-базу практики имея при себе, кроме документов необходимых для прохождения практики, студенческий билет, трудовую книжку (если она имеется) и фотографии для пропуска. Желательно руководителю предприятия сообщить по телефону о своём выезде, вид транспорта, время прибытия.

По прибытию на место студент обязан явиться к руководителю предприятия и получить указания по прохождению практикой, договориться о времени и месте получения консультаций.

До начала работы на штатной должности студент должен пройти производственный инструктаж, организуемый предприятием, с обязательным изучением правил техники безопасности и охраны труда, правила работ с радиоактивными источниками и взрывными веществами (при работе на радиоактивных методах каротажа и перфорации скважин), а также действующих на предприятии правил эксплуатации оборудования.

В период прохождения практики студенты обязаны:

– полностью выполнять задание, предусмотренное программой практики, строго соблюдая сроки прохождения практики;

– подчиняться действующим на предприятии правилам внутреннего трудового распорядка;

– нести ответственность за выполненную работу и её результаты наравне с работниками предприятия;

– овладеть навыками производственной работы, сдать квалификационный экзамен по профилю выполненной работы;

– регулярно вести дневник, отражающий ежедневную работу, составить отчёт;

– чётко выполнять рекомендации и указания руководителей от университета и предприятия.

По окончании практики студентам необходимо сдать пропуск, техническую и художественную литературу, спецодежду, место в общежитии, предварительно отметив на предприятии, взять с собой отчёт по практике, путёвку-удостоверение, характеристику, удостоверение о получении квалификации, трудовую книжку и прибыть в университет в установленный срок (путёвка и характеристика подписываются руководителем предприятия и скрепляются печатью, отчёт по практике подписывается руководителем практики).

По возвращении путевка, отчёт и характеристика сдаются студентом на кафедру для проверки.

2.2. Права студентов

В соответствии с программой практики, предприятие обеспечивает их оплачиваемыми рабочими местами.

После зачисления студентов на оплачиваемые рабочие места и должности, на них распространяется трудовое законодательство Российской Федерации, правила охраны труда и внутреннего распорядка, действующего на данном предприятии, выплачивается компенсация за очередной отпуск по нормам, установленным, для данной профессии (должности).

Во время прохождения практики за студентами независимо от получаемой заработной платы, сохраняется право на получение стипендии, если студент её ранее получал.

На студентов, не имеющих стажа работы, заводится трудовая книжка, в которой делается соответствующая запись.

Студентам, зачисленным на платные должности в геологических партиях и экспедициях, получающим заработную плату и полевое довольствие или бесплатное питание, выплата суточных денег не производится.

Проезд студентов к месту практики и обратно средствами городского, пригородного и местного транспорта, независимо от места практики, оплачивается студентами за свой счёт.

Студенты за время прохождения практики пользоваться бесплатно защитной одеждой, спец обувью, и индивидуальными средствами защиты по нормам, установленными для соответствующих работников данного предприятия.

Предприятие обеспечивает студентов общежитиями на условиях, предоставляемых постоянным работникам.

Студенты имеют право пользоваться на предприятиях по месту прохождения практики литературой, инструкциями, получать консультации специалистов по программе практики и помощь в подборе материалов для отчётов о практике, курсовых и дипломных проектов.

3. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРАКТИКИ

3.1. Цель практики

Целью практики является реализация на производстве и закрепление теоретических знаний, получаемых студентом в процессе обучения; практическая работа по специальности и овладение профессией, отбор и накопление материала, необходимого для выполнения дипломного проекта или дипломной работы; изучение и приобретение опыта руководства структурным подразделением; активное ознакомление с технологией производственного процесса, знакомство с новыми методиками и техническими средствами, а также проверка деловых качеств студентов в производственных условиях.

3.2. Задачи практики

В задачи практики входит:

– формирование профессиональных навыков путём активного участия в производственном процессе;

– приобретение практических навыков самостоятельной работы в должности рабочего;

– закрепление профессиональных знаний и их повышение при прохождении практики;

– приобретение опыта эксплуатации и ремонта оборудования, используемого в партиях и экспедициях;

– изучение конкретных производственных заданий и технико-экономических показателей их выполнения;

– освоение способов интерпретации результатов наблюдений;

– изучение организации труда.

Студент должен постоянно фиксировать свои достижения в специальном дневнике. В дальнейшем все собранные материалы и наблюдения должны быть изложены в отчёте по производственной практике.

Перечень дисциплин с указание разделов, усвоение которых необходимо для прохождения практики.

Для успешного прохождения производственной практики студентам необходимо знать определённые разделы цикла предшествующих дисциплин в соответствии с учебным планом. Из дисциплины « Геофизические методы исследования скважин » теорию методов электрического каротажа, радиоактивного каротажа и методов контроля за техническим состоянием скважин.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Важнейшим этапом прохождения производственной практики является составление отчёта. По отчёту оценивается качество выполнения программы практики. Все собранные материалы являются основой дипломного проекта или дипломной работы.

Любые методические материалы должны быть подкреплены рисунками, таблицами, картами физических полей, блок-схемами, диаграммами.

Студент должен подготовить список используемой литературы, отчётов, инструкций. В отчёте должны быть ссылки на фондовые материалы.

Составление дипломного проекта или дипломной работы является заключительным этапом обучения студентов в УГГУ, дипломный проект является квалификационной работой, подготовка и успешная защита которой в ГЭК (Государственная аттестационной комиссией) служит основанием для присвоения выпускнику университета звания горного инженера – геофизика. Поэтому сбор материалов на практике должен соответствовать следующему перечню разделов:

– для специализации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ»:

Введение

1. Общие сведения о районе работ (приложением должна быть выкопировка из географической карты, с указанием места работ)
2. Геологическое строение района и участка работ
3. Физические и геологические предпосылки для постановки геофизических работ
4. Построение физико-геологической модели (обобщенную ФГМ можно представлять в виде совокупности частных моделей: геологической, петрофизической и физических полей в профильном, плоскостном или объемном варианте)
5. Анализ геофизических работ, проведенных в районе
6. Методика и техника проектируемых работ
7. Обеспечение безопасности жизнедеятельности и охрана окружающей среды
8. Перечень, объём и условие производства проектируемых работ

Заключение

Список использованной литературы;

– для специализации «Геофизические методы исследования скважин»:

Введение

1. Общие сведения о районе работ (приложением должна быть выкопировка из географической карты, с указанием места работ)
2. Геологическое строение района и участка работ
3. Физические и геологические предпосылки для постановки геофизических работ
4. Анализ геофизических работ, проведенных в районе
5. Особенности бурения, конструкция скважины
6. Методика и техника проектируемых работ
7. Обеспечение безопасности жизнедеятельности и охрана окружающей среды
8. Перечень, объём и условие производства проектируемых работ

Заключение

Список используемой литературы.

Студенту необходимо приложить к отчёту каротажные диаграммы, геологическую карту и разрез, чертежи, схемы, графики, таблицы, карты геофизических полей.

Тема должна быть выбрана студентом под руководством квалифицированного специалиста от предприятия или с помощью преподавателя кафедры.

Возможные темы:

– для специализации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ»:

– «Проект геофизических работ с целью поисков золото-сульфидных месторождений в конкретном районе (регионе)»;

– «Проект геофизических работ в помощь геологическому картированию масштаба 1:50 000 при доизучении конкретной площади (участке работ)»;

– «Проект инженерно-геофизических исследований для геологического обеспечения проектирования строительства объекта (указать какого)».

– для специализации «Геофизические методы исследования скважин»:

– «Определение профиля притока и приемистости»;

– «Определение фильтрационно-ёмкостных свойств пластов - коллекторов»;

– «Оценка технического состояния скважины»;

– «Оценка нефтенасыщенности коллекторов»;

– «Новые технические средства для ГИС»;

– «Методы исследования горизонтальных скважин».

Руководитель практики, выделенный производственной организацией, должен постоянно консультировать студента, следить за качеством собранного материала.

В дальнейшем эту роль берёт на себя руководитель дипломного проектирования.

На написание отчёта даётся две недели от начала учебных занятий в осеннем семестре.

5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должна оформляться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к техническим рукописям. Текст располагает на одной стороне листа белой бумаги формата А4. Рекомендуется шрифт 14 Times New Roman расстоянием между строками 1,5 интервала. Поля сверху, снизу и справа не менее 20 мм, слева – не менее 30 мм. Отступ абзаца 10 мм.

Страницы нумеруют подряд, включая рисунки и таблицы. Отсчет страниц начинают с титульного листа, но номер в первый раз проставляет на первой странице введения.

Нумерация рисунков, таблиц, формул сквозная, арабскими цифрами. Их помещают после первого упоминания на той же или на следующей странице. Подрисуночную подпись помещают ниже рисунка. Она включает номер рисунка (например, «Рис. 3») и далее его название. С новой строки помещают необходимые пояснения. Название рисунка набирают шрифтом меньшим, чем шрифт основного текста. Рисунок и подрисуночную подпись сверху и снизу отделяют от текста интервалами. Ссылки на рисунки делают в круглых скобках (например, (рис. 3)), при повторных ссылках добавляет сокращенное слово «смотри» (например, (см. рис. 3)).

Содержание таблиц также набирает более мелким шрифтом. Над таблицей помещают ее название, а над названием справа – слово "Таблица" и ее номер (знак «№» не пишут). Ссылки на таблицы делают так же, как на рисунки.

Слова в тексте пишут полностью, допускаются только общепринятые в технической литературе сокращения. Следует использовать термины и обозначения различных величин принятые в технической литературе. При первом использовании какого-либо обозначения следует пояснить его значение. Греческие буквы набирают прямым шрифтом, латинские – курсивом, за исключением математических (sin, ln и т .п.) и химических символов, которые набирают прямым шрифтом.

Заголовки разделов пишут заглавными буквами жирным шрифтом и располагают посредине листа. Разделы нумеруют арабскими цифрами (слово «глава» обычно не пишется). Подразделы нумеруют двумя цифрами через точку, указывающими номер раздела и номер подраздела в нем.

В конце текстовой части приводят список литературы. Список составляют в алфавитном порядке. Сначала указывают печатные источники, затем фондовые. Описание литературных источников делают в соответствии с установленными правилами. Ссылки на литературу в тексте делают путем указания номера источника по списку в квадратных скобках (например [7]). При использовании заимствованных рисунков, таблиц ссылка на источник или автора обязательна.

Графические приложения выполняют на стандартных листах формата А1. При необходимости можно использовать листы других стандартных форматов.

6. ПЕРЕЧЕНЬ ДОКУМЕНТОВ НЕОБХОДИМЫЙ ПРИ ОТЪЕЗДЕ НА ПРАКТИКУ

1. Паспорт.
2. Военный билет или приписное свидетельство.
3. Страховой полис.
4. Страховое свидетельство.
5. ИНН (идентификационный номер налога плательщика).
6. Трудовая книжка, если она есть.
7. Медицинская справка.
8. Путёвка от кафедры.
9. Справка первого отдела.
10. Два фото размером 3×4 см.

Перед получением путёвки студент на кафедру должен сдать обходной лист.

7. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИКИ

Производственную практику на предприятиях занимающихся ГИС, проходят студенты специализации «Геофизические методы исследования скважин», избравшие для курсового и дипломного проектирования тематику разнообразных методов, методик, технологии исследования скважин.

На практику в геологоразведочные организации отправляются студенты специализации «Геофизические методы поисков и разведки МПИ», избравшие для курсового и дипломного проектирования

тематику разнообразных методов, методик, технологии проведения геофизических методов разведки.

Производственная практика позволит студенту проявить свои деловые и профессиональные качества и обеспечить место для дальнейшей работы после окончания университета.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Возженников Г. С., Белышев Ю. В*. Радиометрия и ядерная геофизика: Учеб. пос. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2000. – 406 с.

2. *Геофизические методы разведки рудных месторождений:* справочник / под ред. В. В. Бродового. – М.: Недра, 1990. – 296 с.

3. *Горбачев Ю. И.* Геофизические исследования скважин: учебник для вузов / под. ред. Е. В. Каруса. – М.: Недра, 1990. – 398 с.

4. *Гравиразведка: справочник геофизика* / под ред. Е. А. Мудрцовой и К. Е. Веселова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 607 с.

5. *Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Резванов В. А. и др.* Промысловая геофизика: учебник для вузов / под. ред. В. М. Добрынина. – М.: Недра, 1986. – 342 с.

6. *Дьяконов Д. И., Леонтьев Е. И., Кузнецов Г. С.* Общий курс геофизических исследований скважин: учебник для вузов. 2-е изд. перераб. – М.: Недра, 1984. – 432 с.

7. *Инструкции по гравиметрической разведке*. – М.: Недра, 1975. – 88 с.

8. *Инструкции по магниторазведке:* наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка / под ред. Ю. С. Глебовского и В. Е. Никитского. – Л.: Недра, 1981.

9. *Инструкции по сейсморазведке*. М.: Недра, 1985.

10. *Инструкции по электроразведке:* наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, морская электроразведка / М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.

11. *Кузнецов Г. С., Леонтьев Е. И., Резванов Р. А.* Геофизические методы контроля разработки нефтяных и газовых месторождений: учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 223 с.

12. *Кассин Г. Г.* Геофизические методы на региональном этапе геологоразведочного процесса. – Екатеринбург: УГГА, 1996. – 104 с.

13. *Магниторазведка:* справочник геофизика / под. ред. В. Е. Никитского и Ю. С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 470 с.

14. *Молчанов А. А., Лукьянов Э. Е., Рапин В. А.* Геофизические исследования горизонтальных нефтегазовых скважин: учебное пособие. – Спб.: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ), 2001. – 298 с.

15. *Рудные месторождения СССР* / под ред. В. И. Смирнова. Том 3. – М.: Недра, 1974. – 392 с.

16. *Сапожников В. М.* Комплексирование геофизических методов: учебное пособие / Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 76 с.

17. *Сковородников И. Г.* Геофизические исследования скважин: Учеб. пос. для вузов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. – 456 с.

18. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых*: справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 456 с.

19. *Электроразведка:* Справочник геофизика. В двух книгах / под. ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1989. – 438 и 278 с.

Учебное издание

БЛИНКОВА НАДЕЖДА ВЛАДИМИРОВНА
ВАНДЫШЕВА КСЕНИЯ ВАСИЛЬЕВНА

ПРАКТИКА ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ УМЕНИЙ И ОПЫТА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ПРАКТИКА)

Методические рекомендации
по производственной практике, по составлению отчета
для студентов направления
21.05.03 «Технология геологической разведки» специализаций «Геофизические методы исследования скважин (ГИС)» и «Геофизические методы поисков и разведки МПИ (РФ)»

2-е издание, дополненное

Редактор В. В. Баклаева
Компьютерная верстка К. В. Вандышевой

Подписано в печать
Бумага писчая. Формат бумаги 60×811/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. Уч. – изд. л. Тираж 100. Заказ 1,25

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

А. А. Редозубов, В. Г. Жуков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ВКР) ИНЖЕНЕРА

Учебное пособие для написания ВКР для специальности 21.05.03 Тезхнология геологической разведки специализации «Геофизические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых»

Издательство
Уральского государственного горного университета

Екатеринбург – 2020

УДК 550

Рецензент: *Давыдов А. В.*, доктор геол.-мин. наук, профессор

кафедры геоинформатики УГГУ

Р33 Методические указания по выполнению выпускной квалификационной работы (ВКР) инженера для студентов специальности 21.05.03 Тезхнология геологической разведки специализации «Геофизические методы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых»*А. А. Редозубов, В. Г. Жуков*; Уральский гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2020. – 39 с.

Пособие представляет конспект лекций по курсу « Интерпретация данных ГИС», читаемый студентам очного обучения. В нём одновременно с изложением теоретических основ интерпретации содержатся рекомендации по выполнению соответствующих практических работ и приводится часть заданий. Предполагается, что некоторые исходные материалы для выполнения практических работ будут выдаваться индивидуально на аудиторных занятиях.

В методических указаниях изложены сведения о порядке подготовки и защиты ВКР инженера (дипломный проект, дипломная работа), а также рекомендации по порядку изложения, объему и оформлению каждого раздела пояснительной записки и графических приложений.
Для студентов очного и заочного обучения

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ВЫПОЛНЕНИЯ ВКР…….. 4

2. ТЕМАТИКА ВКР И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ…… 5

3. СТРУКТУРА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА…… 6

4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА.. 8

4.1. Аннотация…….. 8

4.2. Введение……. 9

4.3. Общие сведения о районе работ…….. 9

4.4. Геолого-геофизическая изученность…….. 10

4.5 Геологическое строение района и участка работ…... 10

4.6. Физико-геологические предпосылки для постановки геофизических работ…….. 12

4.7. Анализ результатов геофизических работ ранее проведенных в районе …… 14

4.8. Методика проектируемых работ……. 14

4.9. Специальная часть…… 15

4.10. Обеспечение безопасности жизнедеятельности….. 16

5. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЧАСТЬ…… 17

5.1. Общие положения……. 17

5.2. Предполевые работы и проектирование……. 18

5.3. Полевые геофизические работы…….. 19

5.4. Топографо-геодезические работы…….. 23

5.5. Камеральные работы при геофизических исследо-

ваниях……..... 24

5.6. Определение стоимости и составление смет на геологоразведочные работы…… 24

6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ВКР В ФОРМЕ ДИП-ЛОМНОЙ РАБОТЫ…….. 25

6.1. Структура дипломной работы…….. 25

6.2. Содержание дипломной работы……..... 26

7. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ВКР…… 27

8. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ ВКР…….. 30

ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА…….. 31

ПРИЛОЖЕНИЯ……. 33

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ВЫПОЛНЕНИЯ ВКР

Выполнение выпускной квалификационной работы является заключительным этапом обучения в высшем учебном заведении. Это самостоятельная учебная работа студента, направленная на обобщение, закрепление и углубление приобретенных во время обучения теоретических знаний и практических навыков и применение их для решения конкретной производственной или научной задачи.

ВКР может выполняться в виде типового дипломного проекта или в виде дипломной работы. В первом случае ставится задача проверить умение будущего инженера решать конкретные геологические (или иные) задачи геофизическими методами, правильно эти задачи формулировать и составлять проект их реализации. Во втором случае студент должен показать способность самостоятельно решать конкретные методические или теоретические вопросы геофизической разведки.

Разработка ВКР требует от студента полной мобилизации его творческих возможностей, целенаправленного труда в течение всего периода дипломирования. Желательно, чтобы работа над специальным заданием – наиболее творческой частью дипломного проекта – начиналась еще до начала дипломирования, во время производственной практики и учебного семестра. Тем более это желательно, когда ВКР выполняется в виде работы исследовательского характера.

Наиболее высокой оценки заслуживают ВКР, представляющие реальную ценность в прикладном или научном отношении. Государственной Аттестационной комиссией ВКР или ее специальная глава может быть признана реальной при выполнении хотя бы одного из следующих условий:

- ВКР выполнена по заданию предприятия (организации) или предприятие документально подтверждает использование результатов работы;

- материалы ВКР опубликованы в виде статьи, доклада или включены в отчеты предприятия, где студент проходил практику или в отчеты о НИР кафедры;

- разработанная студентом установка, прибор, компьютерная программа и т. п. используется в учебном процессе или научно-исследовательской работе.

Законченная выпускная квалификационная работа с отзывом руководителя и рецензией специалиста сторонней организации, назначенного заведующим кафедрой, представляется для публичной защиты. При успешной защите Государственная Аттестационная комиссия присваивает автору ВКР квалификацию инженера.

2. ТЕМАТИКА ВКР И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Если ВКР выполняют в форме дипломного проекта, в теме должна быть указана цель проектируемых работ, например: общие поиски или специализированные поиски конкретных объектов, поисково-оценочные работы на конкретных объектах, предварительная или детальная разведка, геологическое картирование, гидрогеологические или инженерно-геологические исследования (и их цель) и т. п. Должен быть указан район проектируемых работ. В отдельных случаях могут быть указаны проектируемые геофизические методы и масштаб работ, но, как правило, эти параметры проекта должны выбираться и обосновываться самим студентом. Обычно проект составляют для условий того района, где студент проходил производственную практику.

Примеры тем дипломного проекта:

-«Проект геофизических работ с целью поисков золото-сульфидных месторождений в конкретном районе»;

-«Проект геофизических работ в помощь геологическому картированию масштаба 1:25000 при доизучении конкретной площади»;

-«Проект инженерно-геофизических исследований для геологического обеспечения проектирования строительства объекта (указать какого)».

Исходными материалами для составления дипломного проекта, как правило, должны служить материалы, собранные в период производственной практики. Для дипломирования необходимо собрать не только результативные материалы из отчетов и проектов, но и первичные результаты наблюдений, которые студент должен обработать и проинтерпретировать в процессе работы над ВКР. Необходимо также собрать материалы, нужные для составления экономической части проекта. Особое внимание следует обратить на сбор сведений о нормах и стоимости работ для новых методов и методик, не включенных в нормативные документы. В отдельных случаях, когда студент по объективным причинам не смог во время практики собрать достаточный материал для дипломирования, ему может быть предложена тема, для которой можно найти необходимый материал без выезда в удаленные пункты.

Вместо дипломного проекта студент по согласованию с кафедрой может выполнять работу исследовательского или конструкторского характера. В этом случае он должен самостоятельно разработать актуальный вопрос методики или теории разведочной геофизики, или разработать прибор или установку, или составить программу для интерпретации результатов геофизических исследований по собственному оригинальному алгоритму.

Примеры тем дипломных работ:

-«Построение физико-геологических моделей на основе анализа физических свойств горных пород и особенностей геологического строения рассматриваемого участка или на основе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных»;

-«Анализ новых методик геофизических исследований и интерпретации геофизических материалов»;

-«Разработка и изготовление прибора или установки (указать каких) для учебных или производственных целей».

3. СТРУКТУРА ВКР В ФОРМЕ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

Дипломный проект состоит из пояснительной записки (обычный объем 70-100 страниц) и графических приложений (демонстрационных плакатов), выполненных на листах формата А1. Некоторые приложения могут быть выполнены на листах других стандартных форматов. Небольшие рисунки, которые нет необходимости выносить на демонстрационные плакаты, помещают в тексте. Кроме того, в тексте следует продублировать в уменьшенном масштабе графические материалы с демонстрационных плакатов, за исключением имеющих очень большие размеры (например, геологическая карта района работ). Вместо демонстрационных плакатов можно изготовить электронный вариант чертежей, и на защите пользоваться мультимедийным проектором. Диск с электронной версией графических приложений должен быть приложен к ВКР. Наиболее важные графические материалы рекомендуется продублировать на 1-2 демонстрационных плакатах или распечатать слайды и передать копии членам ГАК. Если работа содержит объемный табличный материал, его следует поместить в конце пояснительной записки в качестве текстовых приложений.

Перечень разделов и подразделов текстовой части дипломного проекта (в скобках указан примерный объем в страницах):

ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ (1)

АННОТАЦИЯ (1)

ОГЛАВЛЕНИЕ (1-2)

ВВЕДЕНИЕ (1-2)

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ РАБОТ (2-4)

2. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ РАЙ-ОНА РАБОТ (5-7)

2.1. Геологическая изученность

2.2. Геофизическая изученность

3. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА И УЧАСТКА РАБОТ (15-17)

3.1. Геологическая позиция и общая геологическая характеристика района работ

3.2. Стратиграфия

3.3. Магматизм

3.4. Тектоника

3.5. Метаморфизм

3.6. Полезные ископаемые

3.7. Гидрогеологическая характеристика района работ

3.8. Геологическое обоснование выбора участка работ и геологическое строение участка работ.

4. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПОСТАНОВКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ (8-12)

4.1. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых района работ

4.2. Геолого-геофизическая характеристика объектов поисков и объектов – геологических помех

4.3. Физико-геологические модели объектов поисков и объектов-помех, оценка возможности применения различных геофизических методов

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАНЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ В РАЙОНЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ (10-12)

6. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРУЕМЫХ РАБОТ(10-15)

6.1 Выбор и обоснование комплекса методов

6.2. Методика и техника работ каждым методом

6.3. Камеральная обработка и интерпретация результатов работ

7. СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ (10-15)

8. ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

8.1. Мероприятия по охране труда и безопасному ведению работ

8.2. Мероприятия по охране окружающей среды

9. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЧАСТЬ ПРОЕКТА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (1)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

СПИСОК ГРАФИЧЕСКИХ И ИНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ, НЕ ВКЛЮЧЕННЫХ В ПОЯСНИТЕЛЬНУЮ ЗАПИСКУ

Возможно объединение близких по содержанию подразделов небольшого объема и введение подразделов, не указанных в перечне. Возможна перестановка разделов и подразделов, если этого требует логика изложения материала.

4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

4.1. Аннотация.

Указываются инициалы и фамилия автора дипломного проекта и его тема.

В следующем абзаце приводятся ключевые слова, отражающие содержание проекта.

Затем указывают объект, на который составлен проект, цель проектируемых работ, проектируемые для решения поставленной задачи методы. Предполагаемые результаты проектируемых работ.

Указывают тему специальной части, полученные результаты и их значимость.

Завершают аннотацию сведениями о количестве страниц пояснительной записки, иллюстраций, таблиц, приложений, литературных источников.

Изложение должно быть кратким, но позволяющим понять существо дипломного проекта. Объем аннотации, как правило, не должен превышать половины страницы.

4.2. Введение

Во введении должна быть дана четкая формулировка геологического задания: местоположение участка проектируемых работ (административная, географическая и геологическая привязка), стадия геологоразведочных работ (см. приложение 6), целевое назначение и ставящиеся перед работами геологические задачи, актуальность и значение для экономики, ожидаемые результаты работ.

Приводят сведения о месте прохождения производственной практики, о задачах и видах работ, проводившихся предприятием, и о видах работ, в которых студент принимал непосредственное участие. Дают характеристику собранных в период практики материалов, послуживших исходными для составления дипломного проекта. Указывают руководителя практики от предприятия.

4.3. Общие сведения о районе работ

В этом разделе приводятся сведения о районе, характеризуются условия проведения и организации проектируемых работ. Указывают географическое положение и административная принадлежность района работ, характеризуется рельеф, гидрографическая сеть, климат, растительность и животный мир. Дают характеристика проходимости местности, имеющихся путей сообщения. Приводят сведения о промышленности и сельскохозяйственном производстве в районе, о населении и его занятости.

Приведенные в разделе сведения должны давать четкое представление о категории трудности проведения геофизических работ, продолжительности полевого периода, возможности найма рабочих на месте. Указывают положение базы экспедиции (партии) и связь с ней.

Текст необходимо иллюстрировать обзорной картой. На карте следует указать положение участка работ и, если возможно, базы экспедиции.

4.4. Геолого-геофизическая изученность района работ

В этом разделе в хронологическом порядке указывают проведенные в районе геологические и геофизические исследования. Сначала описывают геологические, затем геофизические исследо-

вания. Указывают год проведения работ, выполнявшая работы организация и непосредственные руководители работ. Если работы дали ощутимые практические или методические результаты, кратко описывают эти результаты. По участку проектируемых работ следует привести более подробные сведения. Можно привести данные об изученности района в табличной форме.

Раздел следует иллюстрировать схемами изученности района.

В заключение следует сделать вывод о степени изученности района и о направлении дальнейших исследований.

4.5. Геологическое строение района и участка работ

Этот раздел должен начинаться с характеристики **геологической позиции** района и краткого описания его **общего геологического строения.** Описывают слагающие район горные породы, их возраст, петрографическая принадлежность и распространение по площади. Описывают основные структуры и крупные тектонические нарушения. Желательно указать рудоносность структурных элементов и комплексов пород. Хорошо, если будет указано проявление петрографических комплексов и структурных элементов в геофизических полях.

В подразделе **стратиграфия** в хронологическом порядке описывают стратиграфическую колонку. Приводят сведения о литологии стратиграфических горизонтов, их мощности, распространении на территории района. Отмечают несогласия, фациальные изменения и т. п. Хорошо привести данные о физических свойствах слагающих стратиграфические горизонты пород. Указывают стратиграфическую приуроченность полезных ископаемых. Подраздел иллюстрируютя стратиграфической колонкой, которая приводится на приложении с геологической картой. В тексте полезно привести наиболее важные участки стратиграфической колонки в более крупном масштабе.

При описании **магматизма** указывают его фазы, проявившиеся в районе и характерные для них комплексы магматических пород. Приводят сведения о форме, размерах элементов залегания и взаимоотношениях интрузивных, эффузивных и жильных тел, о проявлениях приконтактового метаморфизма. Указывают их положение в разрезе и возраст. Отмечаютя связь полезных ископаемых с магматическими породами. Хорошо, если будут приведены краткие сведения о физических свойствах горных пород. Текст желательно иллюстрировать рисунками.

При описании **тектоники** сначала следует рассмотреть общую тектоническую схему района, охарактеризовать наиболее крупные пликативные и дизъюнктивные структурные элементы. Описание необходимо иллюстрировать рисунком. Далее эти и более мелкие структурные элементы надо описать подробнее, указать их возрастные соотношения, элементы залегания и т. п. Особое внимание следует обратить на установленную или предполагаемую связь полезных ископаемых с теми или иными структурами.

Подробно надо описать **метаморфизм** горных пород. Следует рассмотреть наблюдающиеся в районе типы метаморфизма, степень и характер изменения отдельных пород и комплексов. Необходимо описать пространственное распространение метаморфизованных пород, связь метаморфизма с магматической и тектонической деятельностью. Особое внимание следует обратить на связь полезных ископаемых с метаморфизмом и на околорудные изменения вмещающих пород. Указать характер изменения физических свойств пород при метаморфизме.

В подразделе, касающемся **полезных ископаемых**, приводят сведения обо всех полезных ископаемых, месторождения или проявления которых известны в районе работ. Указывают их пространственное положение, стратиграфическая, структурная и литологическая приуроченность, генетический тип. Рассматривают поисковые признаки и рудоконтролирующие факторы.

Месторождения и проявления полезного ископаемого, на поиски или разведку которого составляется проект, описывают подробно, другие полезные ископаемые – более кратко. Для полезного ископаемого – объекта поисков детально описывают контролирующие структуры, состав и метаморфизм вмещающих пород, глубина залегания, форма, размеры, элементы залегания, вещественный состав рудных тел, наличие околорудных изменений вмещающих пород, ореолов вкрапленности и т. п. Приводят сведения о мощности и характере слоя рыхлых отложений и коры выветривания, о гипергенных изменениях. Если известных месторождений на участке нет, рассматривают существующие представления об ожидаемом характере объектов поисков.

Подраздел следует иллюстрировать схемой расположения месторождений и рудопроявлений (можно их показать на геологической карте). Очень желательно привести разрезы по месторождениям и рудопроявлениям.

В **гидрогеологической характеристике** района описывает водоносность комплексов пород, приводят сведения о водоносных горизонтах, химизме подземных вод, степени их пригодности для питьевого и технического водоснабжения. Раздел резко усиливают, если проектируемые работы направлены на решение гидрологических задач.

Заключительным разделом геологической части проекта является **обоснование выбора участка** для проектируемых работ. Его делают на основе рассмотренных в предыдущих разделах геологических данных и геолого-геофизической изученности территории. Затем следует дать подробную геологическую характеристику выбранного участка, указать наличие на нем перспективных геофизических и геохимических аномалий, их установленную или предполагаемую геологическую природу. Текст необходимо иллюстрировать геологической картой достаточно крупного масштаба (обычно 1:25000 или 1:10000 или крупнее). Следует привести реальные или прогнозные разрезы месторождений или рудопроявлений.

Если проектируются работы по разведке месторождения, необходимо подробно рассмотреть все известные данные о его строении, морфологии рудных тел, их составе и степени разведанности.

4.6. Физико-геологические предпосылки для постановки геофизических работ

Физические свойства горных пород и полезных ископаемых района лучше описывать по их генетическим группам (осадочные, вулканогенно-осадочные, магматические и т. п.) Обязательно указываются источники, по которым приводятся данные по физическим свойствам, способы определения, представительность. Эти данные обычно приводят в виде таблицы. Если есть возможность, надо построить гистограммы или вариационные кривые и выполнить статистическую обработку. Наиболее наглядное представление о физических свойствах горных пород и полезных ископаемых дает диаграмма, которую надо обязательно построить. Для ее построения строится колонка, в которую включаются все горные породы района, и около нее – графики всех физических свойств.

Информацию о физических свойствах горных пород можно получить из литературных и фондовых источников. Можно оценить физические свойства пород путем статистической обработки результатов полевых наблюдений или каротажа. На основе анализа этих данных следует сделать выводы о принципиальной возможности разделения горных пород по их физическим свойствам.

Наличие различия физических свойств объекта и вмещающей среды еще не гарантирует возможности его обнаружения соответствующим геофизическим методом. Важное значение имеют и его геометрические параметры – форма, глубина от поверхности, элементы залегания, наличие мешающих геологических фак-

торов (мощный слой приповерхностных рыхлых отложений, экраны из пород высокого сопротивления и т. д.). Поэтому для получения представления о возможностях геофизических методов необходимо дать комплексную **геолого-геофизическую характеристику объектов поисков**, включая их геометрические параметры, физические свойства и возможное влияние геологических помех.

В завершение раздела должна быть построена **физико-геологическая модель объекта поисков** и для нее выполнено решение прямой задачи. Для оценки глубинности методов в условиях района прямую задачу следует решить для нескольких положений эрозионного среза. Для характеристики возможностей методов хорошо также привести результаты наблюдений над реальными объектами. Желательно также построить физико-геологические модели для объектов, которые будут затруднять интерпретацию результатов (вызывать искажения, похожие на аномалии от объектов поисков или, маскировать их).

Итогом раздела являются выводы о возможностях каждого геофизического метода в условиях района проектируемых работ.

4.7. Анализ результатов геофизических работ ранее проведенных в районе

В этом разделе детально анализируют результаты работ последнего года или нескольких последних лет. Сначала кратко описывает примененную методику работ. Дает характеристику примененного комплекса методов. Формулируют задачи, которые ставились перед каждым методом и основные сведения о методике его применения (сеть наблюдений, использовавшаяся аппаратура, тип и размеры установок, точность и т. п.).

Затем производятописание физических полей и сопоставление их с геологическим строением площади. Описывают отдельные аномалии и высказывают соображения об их геологической природе.

Затем в качестве примера подробно анализируют несколько типичных аномалий. Если на участке имеются известные месторождения или рудопроявления, на которых проведены геофизические работы, аномалии над ними должны быть обязательно проанализированы. Для выбранных аномалий надо самостоятельно выполнить качественную и количественную интерпретацию и дать объяснение их геологической природы.

В заключение раздела следует дать оценку применявшейся ранее методике геофизических исследований и высказать свои предложения по ее совершенствованию.

4.8. Методика проектируемых работ

В начале раздела надо указать стадию проектируемых работ и сформулировать конкретные задачи, которые ставятся перед геофизическими исследованиями для выполнения геологического задания. На основе геологического строения, физико-геологических предпосылок и анализа результатов ранее проведенных геофизических работ **обосновывают комплекс методов**.

Определяют основные методы, которыми будет обследоваться вся площадь, и дополнительные, которыми будут изучаться наиболее интересные, по данным основных методов, участки. Определяют, если это необходимо, вспомогательные методы, результаты которых будут использоваться при интерпретации данных других методов (например, ВЭЗ или малоглубинная сейсморазведка с целью изучения рельефа коренных пород для нужд гравиразведки). Для каждого метода должна быть четко сформулирована решаемая им задача.

Указывает последовательность выполнения работ разными методами и их взаимодействие. Определяют масштаб съемки и рассчитываютя сеть наблюдений. Если сеть наблюдений для разных методов разная, это должно быть обосновано, а сети согласо-

ваны (для методов с более редкой сетью должны использоваться профили и пикетаж более детальной сети).

Методика работ каждым методом включает обоснование сети наблюдений, точности и способа ее определения, выбор аппаратуры. Выбирают и обосновывают системы наблюдений, типы и параметры установок в электроразведке, схема создания опорной сети, где она необходима, учет вариаций поля и т. п. Кратко описывают технику проведения работ.

Описывает **порядок обработки и методику интерпретации результатов наблюдений** каждым методом и комплексную интерпретация с привлечением геологических данных. Указывают способ представления полученных результатов.

Если решение поставленных задач возможно при использовании различных вариантов методики, необходимо сопоставить стоимости работ для разных вариантов. Предпочтение следует отдать тому варианту, при котором необходимая информация может быть получена при меньших затратах.

4.9. Специальная часть

В специальной части студент разрабатывает какой-либо узкий вопрос, представляющий практический или научный интерес. Разработка этого вопроса должна содержать элементы исследования или научного обобщения. Качество специальной части в наибольшей степени определяет творческую зрелость выпускника и его способность к самостоятельной инженерной деятельности. Поэтому от качества специальной части во многом зависит общая оценка дипломного проекта.

Тематика специальной части дипломного проекта аналогична рассмотренной в разделе 2 настоящих методических указаний тематике дипломных работ, но в специальной части дипломного проекта постановка вопроса более узкая, и соответственно ее

объем меньше. Как правило, тема специальной части должна быть связана с темой дипломного проекта и полученные результаты должны использоваться при составлении проекта. Желательно, чтобы тему специальной части студент предложил сам, подготовив ее в период производственной практики и согласовав с руководителем практики от предприятия. Возможна разработка специальной части как продолжения разработки вопросов, которыми студент занимался в процессе курсового проектирования или научно-исследовательской работы в период теоретического обучения.

Структура специальной части в зависимости от темы может быть различной, но во всех случаях в ней должны быть отражены следующие моменты: постановка задачи и состояние вопроса, цель исследования, методика исследования, описание и анализ полученных результатов, выводы и рекомендации по использованию полученных результатов.

Раздел иллюстрирует графическими материалами, таблицами, схемами установок и т. п. В качестве приложений оформляются все первичные материалы – распечатки результатов расчетов на компьютере, алгоритмы и программы, журналы измерений при проведении экспериментов, вспомогательные графики и т. п.

Место специальной части в тексте пояснительной записки определяется ее содержанием.

4.10. Обеспечение безопасности жизнедеятельности

Мероприятия по охране труда и безопасности ведения работ. Рассматривает специфику природных и климатических условий района работ и предусматривают меры, обеспечивающие безопасность проведения работ на опасных участках (сложный рельеф, болота, тайга, необходимость переправ через реки и т. д.). Обустройство полевых лагерей и обеспечение находящихся в них людей материалами и снаряжением, продовольствием,

транспортом, аптечками и т. п. Необходимо предусмотреть надежную связь полевых отрядов с базой. Рассматривают действия в критических ситуациях – стихийные бедствия, аварии на расположенных поблизости промышленных предприятиях и т. д.

Общие положения безопасности ведения работ включают в себя безопасность при подготовке сети (лесорубочные работы, противопожарные мероприятия и т. п.), безопасность транспортировки людей и грузов, безопасность эксплуатации источников тока и аппаратуры. Подробно следует рассмотреть правила безопасности при проведении работ проектируемыми методами.

Необходимо предусмотреть обучение персонала безопасным приемам труда, указать периодичность проверки знаний по технике безопасности, предусмотреть контроль за соблюдением этих правил.

Мероприятия по охране окружающей среды. Анализируют факторы, сопутствующие проектируемым работам, которые отрицательно влияют на окружающую среду, и предусматриваются меры по уменьшению этого влияния.

Применение наземных транспортных средств вызывает разрушение грунтов и почв, приводит к загрязнению их и растительного покрова горюче-смазочными материалами. Это воздействие на среду должно быть минимальным. Следует максимально аккуратно проводить лесорубочные работы при разбивке сети, расчистке площадок для полевых лагерей, чтобы наносить растительности как можно меньший урон, строго соблюдая при этом правила пожарной безопасности. Самое серьезное внимание должно быть уделено охране рек и других водоемов, колодцев, грунтовых вод от загрязнения, недопущению нанесения вреда ихтиофауне.

Необходимо предусмотреть проведение природовосстановительных мероприятий после окончания работ: очистки профилей от поваленных деревьев, кустов, лесопосадочные работы,

уборки площадок полевых лагерей, восстановления почвенного слоя и т. п.

5. Производственная часть проекта

5.1. Общие положения

Производственная часть проекта должна содержать организационные условия производства геологоразведочных работ, расчет времени, затрат труда и расходования материальных ценностей (в номенклатуре) на все виды предполевых, полевых и камеральных геологоразведочных работ, объемы которых определены в методической части проекта.

Исходя из календарного плана выполнения работ, составленного по срокам выполнения геологического задания с учетом организационных условий производства, определяют необходимые трудовые и материальные ресурсы по периодам (годам, месяцам). Обосновывает объем производственного и бытового строительства, и рассчитывает количество необходимых материалов по нормам ССН-92, вып. 11, часть 2.

Составляет схему перевозки грузов и транспортировки персонала, по нормам ССН-92, вып. 10 рассчитывают необходимое количество грузов по видам транспорта и затрат времени на транспортировку персонала с учетом времени полевых сезонов.

Обосновывают затраты на прочие сопутствующие работы (производственные командировки, полевое довольствие, доплаты и др.).

5.2. Предполевые работы и проектирование

Определяет состав и затраты исполнителей, необходимые для составления проектно-сметной документации, на основе действующих в геологоразведочной организации временных норм и норм ССН 1.1 (табл. 17–23) на сбор, изучение геологических материалов по району работ, написание проекта и составления смет по форме, приведенной в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Затраты труда на проектирование

Виды работ	Ед. изм.	Объем работ	Норма на ед. чел.- дн.	Затраты труда, чел.-дн.					Итого, чел.-дн.
				гл. геолог	геолог 1 кат.	техн. геолог	….	….	
Изучение фондовых материалов … … Составление текста проекта									
ИТОГО:									∑ Т

Расчет затрат времени на предварительное дешифрирование материалов космо- и аэрофотосъемок выполняют в соответствии с ССН, вып. 1, табл. 23–25, в зависимости от масштаба работ и категории сложности геологического строения. Нормы основных расходов – СНОР, вып. 1, ч. 1, табл. 3.

5.3. Полевые геофизические работы

При проектировании полевых геофизических исследований с использованием методов гравии-, магнито-, электроразведки, радиометрии, а также аэрогеофизических методов производят расчет

затрат времени и затрат труда по форме, пример которой показан в табл. 5.2.

Для этого по соответствующим частям ССН находят нормы времени на единицу объема работ, обосновывают и описывают все условия, в соответствии с которыми выбраны нормы времени (параметры сети, категория трудности, способ передвижения, тип и число приборов, схема установки электродов, расстояние подлета к участку работ и т. д.).

При проведении работ в ненормализованных условиях в соответствии с ССН обосновывают и приводят поправочные коэффициенты к нормам времени.

При одновременном использовании нескольких коэффициентов в результате их перемножения определяется общий поправочный коэффициент.

Суммарные затраты времени определяют путем перемножения объемов работ на норму времени и на поправочные коэффициенты (табл 5.2, гр. 7 = гр. 3 · гр. 5 · гр. 6). К ним добавляют затраты времени для проверки и профилактического обслуживания аппаратуры и оборудования в полевой период. Затраты времени на профилактику зависят от методов геофизических исследований и типа приборов. Нормируют ССН и составляют от одной до трех отрядосмен на один месяц полевых работ (поправочные коэффициенты к затратам времени составляют соответственно 1,04; 1,085; 1,13).

Затраты труда в человеко-днях определяются путем перемножения норм затрат труда на общее количество отрядо-смен (табл. 5.2, гр.10 = гр. 8 × гр. 9). Нормы затрат труда берутся из соответствующих таблиц ССН.

В табл. 5.2. рассчитывют также проектное суммарное количество координатных точек. Для этого объемы работ умножают на количество координатных точек в единице объема работ (приводятся в соответствующих таблицах норм времени ССН). Общее количество координатных точек необходимо для расчета затрат времени на камеральные работы.

Если отработку площади проектируют по участкам с нескольких баз, то по нормам ССН определяются затраты времени на переезды отряда внутри района работ (перебазировка с одного участка работ на другой), исходя из схемы переездов. При этом необходимо учитывать, что нормы времени на переезды (перебазировку отряда)

не включают затраты времени по ежедневной доставке производственного персонала к месту проведения геофизических работ на профиль и обратно. Время на эти цели предусмотрено в укрупненных нормах времени на соответствующие виды геофизических исследований, а расходы учтены в нормах основных расходов (СНОР).

Далее рассматривают вопросы организации различных видов полевых работ: количество отрядов и их численность, календарные сроки выполнения полевых работ. Для этого суммарные затраты времени и труда увязывают с продолжительностью полевых работ и штатами производственных подразделений (отряд, партия), выполняющих данные виды работ, по формулам:

$$N = T_{\text{общ.}} / (t \cdot d \cdot \text{К}_{\text{в.н.}}),$$

где N – количество геофизических отрядов, необходимых для выполнения работ; $T_{\text{общ.}}$ – общие затраты времени на геофизические исследования соответствующим методом, отрядо-смен; t – количество месяцев работы по проекту; d – количество смен (дней) в месяце (25,4 – при односменном режиме работы); $\text{К}_{\text{в.н.}}$ – коэффициент выполнения норм выработки, принимаемый от 1,05 до 1,20.

$$\text{Ч} = \text{З}_{\text{т}} / \text{Т}_{\text{ф}} \text{К}_{\text{в.н.}},$$

где Ч – численность трудящихся, занятых на выполнении геофизических исследований; $\text{З}_{\text{т}}$ – суммарные затраты труда, человеко-дни; $\text{Т}_{\text{ф}}$ – фонд времени одного работающего за рассматриваемый период, дни;

$$\text{Т}_{\text{ф}} = (\text{Т}_{\text{к}} – \text{Т}_{\text{пр.}} – \text{Т}_{\text{вых.}} – \text{Т}_{\text{отп.}})\cdot 0{,}96,$$

где $\text{Т}_{\text{к}}$ – календарные сроки выполнения запланированного объема работ, дни; $\text{Т}_{\text{пр.}}$ – число праздничных дней за рассматриваемый период; $\text{Т}_{\text{вых.}}$ – число выходных дней; $\text{Т}_{\text{отп.}}$ – число дней отпуска (по два дня на один месяц работы); 0,96 – коэффициент, учитывающий невыходы на работу по уважительной причине.

Как правило, по приведенным формулам рассчитывают количество геофизических отрядов и численность трудящихся, исходя из заданных сроков выполнения работ. При этом следует учитывать, что под геофизическим отрядом понимают первичное производственное подразделение, организуемое для выполнения работ

одним из геофизических методов с помощью одного прибора, станции или комплекта аппаратуры. Таким образом, при расчете количества отрядов фактически определяют необходимое количество приборов или комплектов аппаратуры для выполнения запроектированного объема работ в заданные сроки. Возможны и обратные расчеты, т. е. уточнение календарных сроков работ, исходя из существующих штатов и имеющейся аппаратуры в геофизической организации.

5.4. Топографо-геодезические работы

Проектирование топографо-геодезических работ осуществляют в соответствии с ССН, вып. 9. Для выбора и использования сметных норм и норм затрат труда обосновывают: категорию трудности местности; категорию трудности рубки леса; категория твердости пород древесины; коэффициент на заболоченность и глубину снежного покрова и другие показатели, отражаемые в табл. 2.3.3.

Таблица 5.3

Расчет затрат времени на проведение топографо-геодезических работ

(ССН, вып. 9)

№ п/п	Вид работ	Категория трудности	Объем работ	Норма времени, отр.-см.	Поправочный коэф.	Итого затрат времени, отр.-см.	Нормативный документ, табл.
	ИТОГО:						

5.5. Камеральные работы при геофизических исследованиях

Затраты времени и труда на камеральные работы по геофизическим исследованиям методами сейсмо-, гравии-, магнито-, электроразведки, радиометрии, скважинной геофизики и аэрогеофизическим работам нормируются ССН, глава «Камеральные работы».

Продолжительность камерального периода в отрядо-месяцах для различных видов геофизических работ определяют в соответствии с продолжительностью полевых работ, количеством координатных или физических точек за месяц работы отряда, сложностью обработки полевого материала.

Для определения количества точек, выполняемых отрядом за месяц работ, необходимо общее количество физических или координатных точек разделить на расчетную продолжительность работ в месяцах. Продолжительность работ в месяцах рассчитывают путем деления общих затрат времени в отрядо-сменах для данного метода на 25,4 (среднее число смен в месяце).

Нормы ССН на камеральную обработку геофизических исследований не предусматривают затраты на использование ЭВМ. При использовании ЭВМ на камеральных работах в данном разделе необходимо обосновать количество машинного времени в машино-часах, требуемого для обработки полевых материалов.

5.6. Определение стоимости и составление смет на геологоразведочные работы

Смету составляют на весь объем геологоразведочных работ и затрат, предусмотренных проектом.

Сметная стоимость геологоразведочных работ складывется из основных расходов, накладных расходов, плановых накоплений, компенсируемых затрат, подрядных работ и резерва на непредвиденные расходы.

Общая сметная стоимость геологоразведочных работ сводится по следующей номенклатуре работ и затрат с подразделением каждой позиции по видам, методам, способам, масштабам и т. п. (форма СМ-1):

I. Основные расходы

а. Собственно геологоразведочные работы:

- предполевые работы и проектирование;

- полевые работы – всего:

в том числе по видам, методам, способам, масштабам и т. д.:

- организация и ликвидация полевых работ;

- лабораторные и технологические исследования;

- камеральные и опытно-методические работы;

- прочие собственно геологоразведочные работы (содержание радиостанций, затраты на метрологическое обеспечение, охрану полевого лагеря и т. д.).

б. Сопутствующие работы и затраты:

- строительство зданий и сооружений;

- транспортировка грузов и персонала партий.

II. Накладные расходы

III. Плановые накопления

IV. Компенсируемые затраты:

- производственные командировки;

- полевое довольствие;

- доплаты и компенсации;

- возмещение убытков, причиненных изъятием или временным занятием земельных участков;

- рекультивация земель и лесных угодий;

- попенная оплата;

- ликвидация последствий взрывов;

- согласование мест проведения геологоразведочных работ.

V. Подрядные работы

VI. Резерв на непредвиденные работы и затраты

Всего по объекту

Подробный порядок определения сметной стоимости по перечисленным видам работ и затрат изложен в Инструкции по составлению проектов и смет на геологоразведочные работы [13] и в Методическом руководстве [14].

6. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ВКР В ФОРМЕ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

6.1. Структура дипломной работы

Дипломная работа, как и дипломный проект, состоит из пояснительной записки и демонстрационных плакатов или графических приложений в электронной форме, которые на защите демонстрируются с помощью мультимедийного проектора. Всё касающееся графических и иных приложений, изложенное в разделе 3, в полной мере относится к дипломной работе. Примеры возможных тем дипломных работ были приведены в разделе 2. Конечно, эти примеры не исчерпывают всей возможной тематики, которая может быть очень разнообразной. В каждом конкретном случае тема дипломной работы определяется ее руководителем и студентом. Тема дипломной работы утверждается на заседании кафедры.

Структура текстовой части дипломной работы (в скобках указан ориентировочный объем разделов в страницах):

Титульный лист (1)

Дипломное задание (1)

Аннотация (1)

Оглавление (1)

Введение (1-3)

Основная часть (40-60)

Заключение (1-2)

Список литературы

Список графических и иных приложений, не включенных в пояснительную записку.

Структура основной части пояснительной записки разрабатывается студентом вместе с руководителем в зависимости от содержания работы.

6.2. Содержание дипломной работы

Аннотация. Указывают инициалы и фамилию автора работы и ее название.

В следующем абзаце приводят ключевые слова, отражающие содержание работы.

Затем приводят краткие сведения об объекте исследования, цели работы, методы решения поставленных задач, основне полученне результаты и их практическое и научное значение. Аннотация должна быть составлена так, чтобы по ней можно было понять существо работы.

Завершают аннотацию сведениями о количестве страниц пояснительной записки, иллюстраций, таблиц, приложений, литературных источников.

Объем аннотации, как правило, не должен превышать половины страницы.

Введение должно отражать актуальность и современное состояние проблемы. Наибольшее внимание следует уделить формулировке цели исследований. Далее надо сформулировать за-

дачи, которые необходимо решить; что необходимо сделать для их решения. Следует указать исходные материалы для дипломной работы, новизну и значимость работы, отметить личный вклад автора.

Основная часть пояснительной записки в зависимости от содержания работы может иметь различную структуру, разрабатываемую студентом при консультации руководителя. Можно лишь указать характер информации, которая должна содержаться в дипломной работе.

1. Состояние проблемы, которое необходимо рассмотреть на основе обзора литературных и иных источников. Выяснение вопросов, требующих разработки, соображения о возможных способах решения поставленных задач.

2. Обоснование направления исследований и методика их проведения. Описание и анализ полученных результатов. Сопоставление своих результатов с ранее известными.

3. Возможные области применения полученных результатов. Задачи дальнейших исследований по проблеме.

В заключении указывают степень решения поставленных задач, основные выводы, область применения полученных результатов, пути дальнейших исследований по проблеме.

7. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ВКР

Пояснительная записка должна оформляться в соответствии с требованиями, предъявляемыми к техническим рукописям. Текст располагает на одной стороне листа белой бумаги формата А4. При наборе на компьютере рекомендуется шрифт 14 с расстоянием между строками 1,5 интервала. Поля сверху, снизу и справа не менее 20 мм, слева – не менее 30 мм. Отступ абзаца 10-15 мм.

Страницы нумеруют подряд, включая рисунки и таблицы. Отсчет страниц начинают с титульного листа, но номер в первый раз проставляет на первой странице введения. Снизу на первой странице введения располагают штамп (приложение 3).

Формулы набирают с помощью соответствующего редактора и располагают в отдельной строке посредине страницы. Нумерация формул сквозная, арабскими цифрами. Номера формул в круглых скобках располагают у правой границы текста. Необходимые пояснения помещают после формул. Первая строка расшифровки начинается со слова «где» (без двоеточия).

Слова в тексте пишут полностью, допускаются только общепринятые в технической литературе сокращения. Следует использовать термины и обозначения различных величин принятые в технической литературе. При первом использовании какого-либо обозначения следует пояснить его значение. Греческие буквы набирают прямым шрифтом, латинские – курсивом, за исключением математических (sin, ln и т .п.) и химических символов, которые набирают прямым шрифтом.

Заголовки разделов пишут заглавными буквами жирным шрифтом и располагают посредине листа. От последующего текста их отделяют двойным интервалом. Заголовки подразделов пишут строчными буквами, за исключением первой заглавной, шрифт лучше использовать жирный. Их начинают с абзаца и отделяют от предыдущего текста двойными интервалами. Разделы нумеруют арабскими цифрами (слово «глава» обычно не пишется). Подразделы нумеруют двумя цифрами через точку, указывающими номер раздела и номер подраздела в нем.

Рисунки в тексте могут быть выполнены компьютерным способом или от руки черной тушью (чернилами). Их помещают после первого упоминания на той же или на следующей странице. Подрисуночную подпись помещают ниже рисунка. Она включает номер рисунка (например, «рис. 4») и его название. Далее с новой строки помещают необходимые пояснения. Если текст набран шрифтом 14, название рисунка набирают шрифтом 12, а поясне-

ния – шрифтом 10. Рисунок и подрисуночную подпись сверху и снизу отделяют от текста интервалами. Ссылки на рисунки делают в круглых скобках, при повторных ссылках добавляет сокращенное слово «смотри» (например, «см. рис. 4»).

Содержание таблиц набирает более мелким шрифтом. В головке таблицы допускаются только горизонтальные и вертикальные линии. Диагональные линии не допускаются. Над таблицей помещают ее название, а над названием справа – слово "Таблица" и ее номер (знак «№» не пишут). Если таблица не помещается на странице, на следующей странице следует полностью повторить головку, а сверху справа написать «Продолжение (или «Окончание») таблицы» и ее номер. Ссылки на таблицы делают так же, как на рисунки.

В конце текстовой части приводят список литературы, использовавшейся в процессе подготовки ВКР. Список составляют в алфавитном порядке. Сначала указывают печатные источники, затем фондовые. Описание литературных источников делают в соответствии с установленными правилами. Примеры библиографического описания литературных источников приведены в приложении 4. Ссылки на литературу в тексте делают путем указания номера источника по списку в квадратных скобках. При использовании заимствованных рисунков, таблиц ссылка на источник или автора обязательна. Это в полной мере относится и к демонстрационным чертежам.

Графические приложения выполняют на стандартных листах формата А1. При необходимости можно использовать листы других стандартных форматов. Чертежи вычерчивают черной тушью (чернилами) или выполняют на компьютере. На чертежах должны использоваться общепринятые обозначения и цвета красок.

Подписи на чертежах следует делать стандартными шрифтами. Размер букв должен быть достаточно большим, чтобы надписи легко читались с некоторого расстояния. Можно выполнять надписи с помощью компьютера, а затем подклеивать. Каждый лист должен иметь общий заголовок. Если на листе помеще-

ны несколько чертежей, например, карты различных физических полей, каждый чертеж должен иметь название, написанное более мелким шрифтом, чем общее название листа. Название листа дублирует в штампе, помещенном в нижнем правом углу листа. Форма штампа приведена в приложении 5.

8. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ ВКР

К защите ВКР допускаются студенты, выполнившие учебный план и подготовившие в установленный срок свои выпускные квалификационные работы. Расписание заседаний ГАК утверждается проректором по учебной работе и доводится до общего сведения не позднее, чем за месяц до начала защит ВКР.

Завершенная выпускная работа подписывается студентом на титульном листе, в штампе на первой странице введения и в штампах графических приложений. Консультанты по геологической и экономической части подтверждают свое согласие с этими разделами подписями на оборотной стороне дипломного задания. Консультант по геологической части ставит свою подпись также в штампе на первой странице введения и в штампах графических приложений с геологическим содержанием.

Руководитель ВКР после проверки работы также ставит свою подпись на пояснительной записке и чертежах и составляет отзыв. Вместе с отзывом руководителя ВКР представляется заведующему кафедрой для утверждения и направления на рецензию специалисту из сторонней организации из числа утвержденных приказом по институту.

До начала защиты студент представляет в ГАК свою ВКР с отзывом руководителя и рецензией. Личная карточка студента с перечнем изученных дисциплин и оценок по ним и зачетная книжка представляются в ГАК деканатом.

Для доклада студенту предоставляется 15 минут. Доклад необходимо подготовить заранее, распределить время между его частями и отрепетировать. Во время выступления можно иметь текст доклада, но не следует его читать. Лучше вместо текста доклада пользоваться его планом с краткими тезисами основных положений. Излагаемый материал надо иллюстрировать демонстрационными чертежами.

После доклада члены ГАК задают вопросы, связанные с темой защищаемой ВКР. Вопросы могут задавать также все присутствующие. После ответов на вопросы зачитывают отзыв руководителя и рецензию. Затем студенту предоставляется возможность ответить на замечания по работе.

После окончания всех защит, назначенных на данный день, проводится закрытое заседание ГАК, на котором принимается решение по каждой защищавшейся работе. При обсуждении желательно присутствие руководителей и, если это возможно, рецензентов. При определении оценки работы учитываются качество доклада, ответы на вопросы и отзывы руководителя и рецензента.

Результаты защиты ВКР объявляются в тот же день, сразу после закрытого заседания ГАК.

Положительное решение ГАК является основанием для присуждения выпускнику квалификации горного инженера и выдачи диплома о высшем образовании.

ОСНОВНАЯ РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

По геолого-геофизической части

1. *Гравиразведка:* справочник геофизика/ под ред. Е. А. Мудрецовой и К. Е. Веселова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 607 с.

2. *Инструкции по гравиметрической разведке*. М.: Недра, 1975. 88 с.

3. *Инструкции по магниторазведке:* наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка / под ред. Ю. С. Глебовского и В. Е. Никитского. Л.: Недра, 1981.

4. *Инструкции по сейсморазведке*. М.: Недра, 1985.

5. *Инструкции по электроразведке:* наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, морская электроразведка / М-во геологии СССР. Л.: Недра, 1984. 352 с.

6. *Комплексирование методов разведочной геофизики*: Справочник геофизика / под ред. В. В. Бродового и А. А. Никитина. М.: Недра, 1984. 379 с.

7. *Магниторазведка:* справочник геофизика / под. ред. В. Е. Никитского и Ю. С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 470 с.

8. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых*: справочник геофизика / под ред. Н. Б. Дортман. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 456 с.

9. *Электроразведка:* Справочник геофизика. В двух книгах / под. ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 438 и 278 с.

По охране труда и окружающей среды

10. *Болтыров В. Б., Золоев К. К*. Экология геологоразведочных работ: методические рекомендации. Свердловск: ПО «Уралгеология». 1991. 82 с.

11. *Правила безопасности при геологоразведочных работах.* М.: Недра, 1979. 249 с.

12. *Ширшков А. И.* Охрана труда в геологии. М.: Недра, 1990. 235 с.

По производственной части

13. *Инструкция по составлению проектов и смет.* Приложение к приказу Роскомнедра от 22.11.93, № 108. – М., 1993.

14. *Проектирование геологоразведочных работ*: методические указания по выполнению курсовой работы дисциплины «Экономика и организация геологоразведочных работ» и экономической части ВКР специалиста для студентов геологических и геофизических специальностей / Г. С. Карпов, С. В. Макарова, Г. А. Самсонов, В. Г. Жуков. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 64 с.

15. *Сборники норм основных расходов (СНОР)*, выпуски 1-11. – М., 1995.

16. *Сборник сметных норм (ССН),* выпуски 1-11. – М.: ВИЭМС, 1992.

Учебное издание

А. А. Редозубов, В. Г. Жуков

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ВКР) ИНЖЕНЕРА

Учебное пособие

Подписано в печать _____ 2016 г. Бумага писчая. Формат 60х84 1/16.
Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. _____. Уч.-изд. л. _____. Тираж 200 . Заказ №

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
Уральский государственный горный университет
Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники УГГУ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

для обучающихся специальности

21.05.03 Технология геологической разведки

форма обучения: очная, заочная

Авторы: Макаров А.Б., профессор, д.г.-м.н.,
Малюгин А.А., доцент, к.г.-м.н.

Екатеринбург
2020

Самостоятельная работа студентов в рамках учебного процесса играет важную роль в изучении дисциплины «Месторождения полезных ископаемых», поскольку основными объектами труда горных инженеров-геологов – поисков, разведки являются месторождения полезных ископаемых. Поэтому в процессе обучения у студентов формируются представления о месторождения полезных ископаемых как геологических объектах, возникающих в процессах формирования и развития земной коры. Главные задачи профессиональной деятельности – разработка научно обоснованных направлений поисковых работ и выбор рациональной методики разведки месторождений полезных ископаемых могут быть успешно решены при условии овладения студентом современных представлений о геологических и физико-химических условиях их формирования. В процессе самостоятельной работы студент получает представление об особенностях строения каждого типа месторождений как модели месторождений, с которым он будет сталкиваться в процессе своей будущей практической деятельности, и сравнивать с ними конкретные объекты. Для этого в рамках самостоятельной работы в первую очередь следует обратить внимание на изучение имеющегося на кафедре каменного материала, характеризующего большую часть типов промышленных месторождений.

Основное содержание дисциплины и объемы самостоятельной работы по разделам дисциплины приведены в таблице

№№ тем	Содержание	Часы по СРС
1	Форма и условия залегания рудных тел	20
2	Структуры и текстуры руд	20
3	Изучение генетических типов месторождений полезных ископаемых	29
4	Подготовка к экзамену	27

Методические указания по организации самостоятельного изучения дисциплины

1. Освоение лекционного курса

Лекции по дисциплине «Месторождения полезных ископаемых» дают главный материал, как по теории, так и по практике исследований генезиса и геолого-промышленных типов месторождений полезных ископаемых. Современные проблемы, рассматриваемые в данной дисциплине, обусловлены как появлением новых теоретических представлений о геологии месторождений, так и их новых промышленных типов. Это требует после

прослушивания лекций обращаться к рекомендуемой литературе для более глубокой проработки соответствующей темы, детального рассмотрения основных терминов, проблемных вопросов и подходов к их решению, а также изучения дополнительного материала по теме для последующего выполнения лабораторных заданий.

После прослушивания лекции необходимо:

- внимательно просмотреть конспект лекции и (используя поля) сделать необходимые пояснения к сокращениям, аббревиатурам, терминам и т.п.;
- используя рекомендованную литературу уяснить проблемные вопросы и подходы к их решению;
- в письменном виде сформулировать вопросы, которые следует задать преподавателю для окончательного усвоения темы лекции;
- следует взять за правило – выполнять работу с конспектом лекций в тот же день, когда лекция прослушана и в памяти еще осталась часть ее содержания.

2. Подготовка, выполнение и оформление практических занятий

Практические занятия расширяют область знаний в изучаемой дисциплине и показывают применение теоретической части в практике исследований, позволяют самостоятельно оперировать знаниями в решении практических задач.

Наиболее важным в этом плане является изучение и закрепление знаний о вещественном составе минерального сырья по методическим указаниям, имеющимся на кафедре ГПР МПИ. Последующим этапом закрепления теоретического материала является изучение новых разрабатываемых месторождений в рамках существующих геолого-промышленных типов и генетической классификации МПИ.

Особое внимание при изучении генетических типов месторождений следует обратить на работу с научной литературой по данной проблематике.

Чтобы лабораторные занятия приносили максимальную пользу, необходимо помнить, что упражнения в решении практических задач, подготовка к занятиям проводятся по прочитанному на лекциях материалу и связаны, как правило, с детальным разбором отдельных разделов лекционного курса. Они вырабатывают навыки самостоятельной творческой работы, развивают мыслительные способности.

В рамках программы изучения дисциплины «Месторождения полезных ископаемых» предусматривается следующая тематика лабораторных работ.

Тема 1. Форма и условия залегания рудных тел.

Цель практических работ – ознакомиться с принципами определения формы рудных тел, изучить геологические разрезы, определить формы рудных тел на реальных геологических разрезах и найти их место в квалификационной таблице; по геологической обстановке на разрезе определить главные факторы, обусловившие форму и место локализации полезного ископаемого.

Места локализации рудных тел и, соответственно, их форма определяется рядом геологических факторов, в частности, условиям образования (эндогенными, экзогенными, или метаморфогенными). Как следствие, при изучении геологических разрезов месторождений, после определения формы рудного тела следует внимательно ознакомиться с геологической обстановкой и попытаться определить, какой из геологических факторов является определяющим: сингенетичность или эпигенетичность руд: отложения или замещения и др.

При выполнении работы следует иметь в виду, что форма природных геологических тел в большинстве случаев далека от идеальной, и при определении названия подбирается наиболее близкий эталон – идеальное геологическое тело.

Тема 2. Структуры и текстуры руд

Цель занятий – ознакомиться с основными структурами и текстурами руд, описать особенности минералогического состава и текстур руд различного генезиса. При изучении образцов необходимо, прежде всего, определить рудные минералы, текстуры, определить тип месторождения по типоморфным текстурам. Для этого используются таблицы «Типы текстур руд» по С.А. Вахромееву (1979).

Тема 3. Изучение генетических типов месторождений полезных ископаемых

Цель практических работ – изучение теоретического и имеющегося в учебных коллекциях каменного материала, изучить парагенетические ассоциации минералов руд, описать имеющиеся в коллекциях образцы руд и определить их место согласно генетической классификации месторождений полезных ископаемых (по В.Ф. Рудницкому, «Основы учения о полезных ископаемых», стр. 46).

Последовательность изучения генетических типов МПИ рекомендуется следующим образом:

1). Повторение теоретического материала по лекции, учебным пособиям, консультации с преподавателем, просмотр дополнительной литературы из рекомендованного списка.

2). Самостоятельная работа по дополнительному изучению образцов руд из учебных коллекций кафедры.

3). Изучение примеров месторождений данного класса по литературным данным.

4). Проверка усвоения материала по «Вопросам и заданиям для самопроверки» (В.Ф. Рудницкий, «Основы учения о полезных ископаемых», стр. 233-245).

3. Рекомендации по работе с литературой

Изучение учебной и научной литературы является основным видом самостоятельной работы, которая сопровождает весь процесс изучения любой дисциплины. Организацию этой работы следует строить, используя следующие рекомендации:

1. Составить перечень книг, с которыми следует познакомиться , ориентируяясь на источники, содержащие необходимый материал.

2. Систематизировать перечень источников (для экзамена, для написания исследовательских работ.

3. Зафиксировать выходные данные по каждой книге.

4. Установить для себя, какие книги (или какие главы книги) следует прочитать более внимательно, а какие – просмотреть. При этом целесообразно проконсультироваться с преподавателем.

5. Все прочитанные книги, учебники и статьи рекомендуется конспектировать с указанием основных идей автора, наиболее ярких цитат (с указанием страниц источника).

6. На собственных книгах допускается делать на полях краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные для Вас мысли и обязательно указываются страницы в тексте – это позволяет экономить время и быстро находить «избранные» места в разных книгах.

7. Рекомендуется широко использовать интернет-источники и базы геологической литературы.

4. Подготовка к экзамену

На экзамене будут оценены полученные в процессе обучения знания (примерный перечень рассматриваемых на экзамене вопросов приведен ниже).

1). Понятие о полезных ископаемых и их месторождениях

2).Вещественный состав руд. Вредные и полезные компоненты. Комплексное использование руд.

3). Минеральный состав руд. Массивные и вкрапленные руды.

4). Рудоконтролирующие структуры.

5). Морфологическая классификация рудных тел. Формы рудных тел.

6). Понятия текстуры и структуры руд. Классификация текстур.

7). Гидротермально-метасоматические изменения вмещающих пород.

8). Источники рудного вещества эндогенных месторождений.

9). Источники рудного вещества экзогенных месторождений.

100. Причины и способы рудоотложения.

11). Раннемагматические месторождения- условия образования полезных ископаемых.

12). Позднемагматические месторождения- условия образования полезных ископаемых.

13. Ликвационные месторождения – условия образования и примеры месторождений.

14). Пегматиты: условия формирования месторождений, их типы и примеры.

15). Карбонатиты. Условия формирования, примеры месторождений.

16). Грейзены: факторы их образования, примеры месторождений.

17). Скарновые месторождения: условия формирования и примеры.

18). Порфировые месторождения: условия формирования и примеры.

19).Субвулканические (гидротермально-метасоматические) вулканогенные месторождения

20).Гидротермально-осадочные вулканогенные месторождения, условия их формирования и примеры.

21). Гидротермальные амагматогенные месторождения, условия формирования и примеры.

22). Месторождения выветривания и факторы их формирования.

23). Инфильтрационные месторождения.

24). Остаточные месторождения.

25). Механические месторождения полезных ископаемых и условия их формирования. Россыпные месторождения и их примеры.

26). Химические месторождения и условия их формирования.

27). Биохимические месторождения и условия их формирования.

28). Метаморфогенные месторождения.

Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. В процессе подготовки к экзамену имеющиеся пробелы в знаниях, углубляются, систематизируются и упорядочиваются знания. На экзамене демонстрируются знания и навыки, приобретенные в процессе обучения по данной дисциплине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, РЕКОМЕНДУЕМОЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ

а) основная

Рудницкий В. Ф. Основы учения о полезных ископаемых. Учебное пособие.- 3-е издание, исправленное и дополненное - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. -245 с.

б) дополнительная

Попова О.М. Полезные ископаемые: Лабораторный практикум с основами теории.-Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 97 с.

Рудные месторождения СССР В 3-х томах /под ред. Смирнова В.И., М.: Недра, 1978.

Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1989

Рабочая программа дисциплины Б1.В.03-Основы учения о полезных ископаемых

Интернет ресурсы: Все о геологии http://www.geo.web.ru