



Министерство науки и высшего образования РФ

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования**

«Уральский государственный

горный университет»

Зайцев Д. В., Куклина А. А., Смольников С. А.

ФИЗИКА

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Учебное пособие

по дисциплине «Физика»

для студентов всех специальностей и направлений

очного и заочного обучения

Екатеринбург – 2024

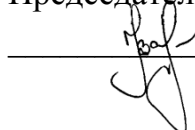
Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО

Методической комиссией факультета
геологии и геофизики

13 октября 2023 г.

Председатель комиссии



К. В. Вандышева

Зайцев Д. В., Куклина А. А., Смольников С. А.

ФИЗИКА

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Учебное пособие
по дисциплине «Физика»
для студентов всех специальностей и направлений
очного и заочного обучения

Рецензент: *М. В. Майсурадзе*, канд. техн. наук, доцент кафедры термообработки и физики УрФУ, г. Екатеринбург

Учебное пособие рассмотрено на заседании кафедры физики 28 сентября 2023 г. (протокол № 16) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Зайцев Д. В., Куклина А. А., Смольников С. А.

З 17 ФИЗИКА. Обработка результатов измерений и оформление отчетов по лабораторным работам: учебное пособие / Д. В. Зайцев, А. А. Куклина, С. А. Смольников; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2024. – 32 с.

ISBN 978-5-8295-0909-5

В учебном пособии рассмотрены основные положения теории расчета погрешностей прямых и косвенных измерений, даны рекомендации по построению графиков измеряемых зависимостей, приведен конкретный пример оформления отчета по лабораторной работе.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей и направлений очного и заочного обучения.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ПРАВИЛА ПОВЕДЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ЛАБОРАТОРИЯХ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА	5
ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	6
КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ	7
СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ	8
Случайные погрешности	10
Проверка результатов на промах	13
Сложение систематических и случайных погрешностей	14
ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	15
ОКРУГЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	16
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	16
Таблицы	16
Графики	17
СПИСОК КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ	18
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	19
Лабораторная работа. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ	21
ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	31

ВВЕДЕНИЕ

Работа инженеров и научных сотрудников во многом связана с измерениями или сравнением тех или иных физических величин. Различают истинное значение физической величины, точно отражающее свойства материального объекта, и действительное – значение, полученное в результате измерения. Чем ближе результат измерения к истинному значению, тем более качественно оно выполнено. Для количественного выражения качества проведенного измерения вводят понятие погрешности измерения – разница между действительным результатом измерения и истинным значением.

Погрешности отличаются друг от друга по виду представления (абсолютные, относительные и приведенные), характеру проявления (случайные, систематические и промахи) и т. д. Пособие поможет разобраться в этом многообразии и научиться грамотно представлять результаты своей работы.

Настоящее пособие ориентировано на студентов первого и второго курсов Уральского государственного горного университета и посвящено изложению основных правил и приемов обработки данных, получаемых при измерениях. В связи с тем, что обработка результатов измерений требует знаний основ теории вероятностей и математической статистики, чем не владеют студенты младших курсов, в пособии рассмотрены лишь самые основные понятия и приёмы обработки данных, а изложение ведется на уровне, доступном студентам, начинающим своё обучение в вузе.

Учебное пособие дает студентам представление о правилах оформления отчётов о результатах своих измерений, которые они выполняют на лабораторных практикумах по физике. Несмотря на краткость изложения, это пособие также может оказаться полезным и студентам старших курсов при представлении ими результатов своей научной деятельности как в курсовых, так и в дипломных работах.

ПРАВИЛА ПОВЕДЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ В ЛАБОРАТОРИЯХ ФИЗИЧЕСКОГО ПРАКТИКУМА

1. Входить в лабораторию можно только с разрешения преподавателя, предварительно сняв с себя верхнюю одежду.

2. Приступать к выполнению практикума можно только после ознакомления с правилами по технике безопасности в физической лаборатории. Инструктаж по технике безопасности в лаборатории проводит преподаватель. Студенты, прослушавшие инструктаж, обязуются соблюдать правила по технике безопасности и расписываются об этом в соответствующем журнале.

3. Только преподаватель может включать силовой рубильник в лаборатории.

4. При нахождении в лаборатории необходимо соблюдать тишину, чистоту и порядок. Нельзя отвлекаться от работы и отвлекать своих товарищей. Запрещается держать на лабораторном столе посторонние предметы (сумки, одежду и т. д.).

5. Запрещается принимать пищу в лаборатории.

6. Запрещается прикасаться к установкам, которые не используются при выполнении текущей лабораторной работы.

7. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, следует ознакомиться с описанием работы (до начала занятия). Понимать основные принципы работы лабораторного стенда, порядок выполнения лабораторной работы и физические законы, изучаемые в ней. Получить допуск к выполнению лабораторной работы у преподавателя.

8. При проведении лабораторной работы точно выполнять все указания преподавателя, без его разрешения не выполнять самостоятельно никаких работ, которые не указаны в методическом пособии.

9. Следить за исправностью всех креплений в приборах и приспособлениях, не прикасаться и не находиться близко к вращающимся и движущимся частям машин и механизмов.

10. Соблюдать осторожность при обращении с приборами из стекла и лабораторной посудой: не бросать, не ронять и не ударять их.

11. Обращаться осторожно с тяжелыми металлическими предметами, которые применяются в некоторых работах по механике.

12. При сборке электрической схемы использовать провода с наконечниками, без видимых повреждений изоляции, избегать пересечений проводов, источник тока включать в последнюю очередь.

13. Собранную электрическую схему включать под напряжение только после проверки ее преподавателем.

14. Не прикасаться к находящимся под напряжением элементам электрической цепи и к корпусам стационарного электрооборудования.

15. Наличие напряжения в электрической цепи проверять только соответствующими для этого приборами.

16. Не допускать предельных нагрузок измерительных приборов.

17. Не оставлять без надзора не выключенные электрические устройства и приборы.

18. При обнаружении неисправности в лабораторной установке или работе электрических устройств, входящих в неё: находящихся под напряжением, повышенном их нагревании, появлении искрения, запаха горелой изоляции и т. д., немедленно отключить источник электропитания и сообщить об этом преподавателю.

19. Устранение неисправностей в лабораторной установке может производить только преподаватель при отключенном источнике питания.

20. При получении травмы сообщить об этом преподавателю, по возможности оказать первую помощь пострадавшему и при необходимости отправить пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение.

21. По окончании лабораторной работы необходимо отключить источник тока или установку, разобрать электрическую схему (если она есть) – вернуть установку в исходное состояние. Привести в порядок рабочее место, сдать преподавателю приборы, оборудование, материалы. Покидать помещение лаборатории можно только с разрешения преподавателя.

22. При нарушении правил техники безопасности студент отстраняется от работы в лаборатории и допускается к ней только после повторного изучения правил техники безопасности и собеседования с преподавателем.

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств и представление полученного результата в принятых единицах. **Система единиц** – это совокупность основных и производных единиц физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами. В нашей стране используется Международная система единиц СИ, где в качестве основных единиц приняты: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и т. д. Несмотря на это, для удобства восприятия, иногда допускается представление результатов измерений в других единицах измерений.

Прежде чем начать измерение, необходимо выделить то физическое свойство, которое будет определяться, также необходимо определить средство измерений. Все измерения можно разделить на прямые и косвенные. **Прямым** называется *измерение*, при котором значение измеряемой величины непосредственно считывается со шкалы прибора, проградуированного в соответствующих единицах измерения. Например, измерение длины тела линейкой, измерение времени с помощью часов, измерение температуры с помощью термометра и т. д. **Косвенным** называется *измерение*, результат которого определяют на основании прямых измерений величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Задачей измерения является получения действительного или измеряемого значения физической величины.

Истинное значение физической величины – это значение физической величины, которое точно количественно характеризует соответствующую физическую величину. **Действительное значение физической величины** – это результат измерения, полученный экспериментальным путем. Чем ближе результат измерения к истинному значению, тем более качественно выполнено измерение. Для количественного выражения качества проведенного измерения вводят понятие **погрешности измерения** – это разница между результатом измерения и истинным значением.

При проведении измерений, как правило, истинное значение измеряемой величины неизвестно. Погрешность характеризует доверительный интервал, в котором с определенной степенью достоверности содержится истинное значение. При сравнении результатов измерения одной и той же физической величины поступают следующим образом. Если доверительные интервалы перекрываются, то говорят, что различия незначимы и результаты измерений согласуются. Если доверительные интервалы не перекрываются, то различия считаются значимыми и результаты измерений не совпадают.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ

Погрешность измерения включает в себя множество разных составляющих, которые можно классифицировать по различным признакам: по виду представления (абсолютные, относительные и приведенные), характеру проявления (случайные, систематические и промахи) и т. д.

По виду представления погрешности делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

1. **Абсолютная погрешность** – алгебраическая разность между результатом измерения искомой величины и ее истинным значением, выраженная в единицах измерения:

$$\Delta = x - x_{\text{ист.}}$$

2. **Относительная погрешность** – погрешность, приходящаяся на единицу измеряемой величины; обычно выражается в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \, \%.$$

3. **Приведенная погрешность** – это погрешность, которая относится к максимально возможному значению шкалы прибора; обычно выражается в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_{\text{max приб.}}} \cdot 100 \, \%.$$

По характеру проявления погрешности можно разделить на случайные, систематические и промахи (грубые погрешности).

4. **Случайная погрешность** – погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом в серии повторных измерений одной и той же физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью в одних и тех же условиях. В них нет никакой закономерности, они неизбежны, неустранимы.

5. **Систематическая погрешность** – погрешность измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины.

6. **Грубая погрешность** – это случайная погрешность результата отдельного наблюдения, резко отличающегося от остальных результатов.

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

Систематическая погрешность – это погрешность измерения, которая остаётся постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях. Одной из основных задач при выполнении эксперимента является выявление и, по возможности, устранение всех систематических погрешностей. Изменяющиеся систематические погрешности выявляются легче постоянных. Обнаруженные и оцененные систематические погрешности исключаются из результатов путем введения поправок.

В зависимости от причин возникновения систематические погрешности подразделяются на следующие виды:

1. Погрешности метода или модели, которые обычно называют методическими погрешностями, например: определение плотности вещества без учета имеющихся в нем примесей, использование формул, не совсем точно описывающих явление, и др.

2. Погрешности воздействия внешних факторов: внешних тепловых, радиационных, гравитационных, электрических и магнитных полей.

3. Погрешности, возникающие из-за неточности действий или личных качеств оператора (экспериментатора), называемые личностными погрешностями.

4. Инструментальные или приборные погрешности, обусловленные схемными, конструктивными и технологическими несовершенствами средств измерения, их состоянием в процессе эксплуатации. Например: смещение начала отсчета у измерительного прибора, неточность градуировки шкалы прибора, использование прибора вне допустимых пределов его эксплуатации, неправильное положение прибора и т. п. За исключением смещения начала отсчета, приборные погрешности относятся к разряду неустранимых погрешностей.

В общем случае систематическая погрешность обусловлена суммарным воздействием перечисленных факторов, многие из которых невозможно рассчитать, подавить или выявить в данном эксперименте. Поэтому различные составляющие систематической погрешности пытаются устранить с помощью экспериментальных или математических приемов путем введения поправок в результаты наблюдений при условии, что погрешность данного вида по величине и знаку известна. После внесения поправок влияние систематической погрешности данного вида на результат и погрешность измерения устраняется полностью. Если же систематическая погрешность неизвестна, но имеет известные границы изменения, то её учитывают в результате измерения.

Если систематическая погрешность измерения определяется тем прибором, который используется в конкретном измерении, то это будет инструментальной погрешностью, которая определяется классом точности средства измерений. Он выражается в виде определенного числа и указывается или на шкале измерительного прибора, или в его паспорте (технической документации). Например, 0,2. Это значит, что приведенная погрешность равна $\gamma = \pm 0,2 \%$.

$$\Delta_c = \gamma \cdot X_N,$$

где X_N – нормирующее значение.

Нормирующее значение может выбираться по-разному:

а) для средств измерений с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой, если нулевое значение лежит на краю шкалы или вне ее, нормирующее значение X_N выбирается равным соответствующему пределу измерения; если нулевое значение лежит внутри диапазона измерений, то нормирующее значение выбирается равным большему из модулей пределов измерений;

б) для средств измерений, для которых принята шкала с условным нулем, нормирующее значение устанавливается равным модулю разности пределов

измерений. Например, для пирометра с пределом измерений от 100 до 500 °C $X_N = 500 - 100 = 400$ °C;

в) для средств измерений с установленным номинальным значением нормирующее значение принимается равным этому номинальному значению.

В случае неравномерной шкалы, на шкале прибора указано число, подчеркнутое углом, которое определяет приведенную погрешность. Нормирующее значение X_N в этом случае устанавливают равным всей длине шкалы или ее части, соответствующей диапазону измерения.

Если характер погрешности мультипликативный, то на шкале прибора указан класс точности в виде числа, обведенного кружком. В этом случае нарисованное число устанавливает относительную погрешность, выраженную в процентах. Для вычисления систематической погрешности необходимо относительную погрешность умножить на полученное значение X :

$$\Delta_c = \gamma \cdot X.$$

Если погрешность имеет мультипликативный и аддитивный характер одновременно, то класс точности на приборе может быть обозначен с помощью двух чисел из того же ряда, разделенных косой чертой c/d . Например, на лицевой стенке прибора написано $c/d = 0,02/0,01$. В этом случае относительная погрешность вычисляется по формуле

$$\delta = \frac{\Delta_c}{X} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_N}{X} \right| - 1 \right) \right].$$

Если класс точности используемого средства измерений неизвестен, то в качестве систематической погрешности можно брать одно деление шкалы аналогового прибора или единицу последнего разряда цифрового прибора.

Случайные погрешности

Случайная погрешность – это составляющая погрешности измерения, проявляющаяся в виде непредсказуемых отклонений от истинного значения физической величины, меняющихся от одного наблюдения к другому. Данная погрешность обусловлена влиянием на результаты измерения множества факторов, воздействие которых на каждое отдельное измерение невозможно учесть или заранее предсказать. Случайная погрешность может быть связана с трением и зазорами в измерительных устройствах, с влиянием внешних условий (вибрацией, колебаниями температуры, влажности и др.), с несовершенством наших органов чувств. Случайную погрешность нельзя исключить из результатов измерений, однако, они поддаются обработке с помощью математической

статистики, основанной на теории вероятности, что позволяет учесть её влияние на оценку истинного значения измеряемой величины.

По соотношению случайной и систематической погрешностей определяется подход к производимым измерениям. Если систематическая является определяющей (существенно больше случайной), то измерения достаточно провести только один раз, например, при измерении линейкой правильной геометрической фигуры. Если же случайная ошибка много больше, то измерения проводят несколько раз. Число измерений выбирается таким образом, чтобы случайная погрешность среднего арифметического была меньше систематической погрешности.

Случайная погрешность при данном наблюдении может появиться, а может и не появиться, может быть больше или меньше по величине, может быть положительной или отрицательной. Корректно ответить на вопрос о том, как учесть случайные погрешности, помогут теория вероятностей и математическая статистика. Эти особенности приводят к тому, что случайные погрешности подчиняются так называемому нормальному закону распределения, или, иначе, закону распределения Гаусса.

Для этого закона распределения справедливы два утверждения:

- случайные погрешности одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто;
- чем больше погрешность, тем реже она появляется.

При измерении какой-либо физической величины необходимо провести не одно, а несколько наблюдений этой величины. Предполагается, что измерения проводятся одним и тем же наблюдателем с помощью одного и того же прибора. В результате получаем ряд чисел $x_1, x_2, \dots, x_N$. Этот ряд в статистике называют выборкой, а N – объемом выборки – количество измерений. Каждому результату измерений соответствует случайная погрешность. Если мы обозначим истинное значение измеряемой величины через μ , то можно записать этот ряд следующим образом:

$$x_1 = \mu + \Delta_{\text{сл}1};$$

$$x_2 = \mu + \Delta_{\text{сл}2};$$

.....

$$x_N = \mu + \Delta_{\text{сл}N}.$$

Учитывая, что случайные погрешности имеют разные знаки и то, что одинаковые по величине, но разного знака случайные погрешности встречаются при большом объеме выборки одинаково часто, то можно заметить, что среднее арифметическое $\bar{x}$ ближе к истинному значению μ , чем произвольно взятое x_i .

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i.$$

В качестве характеристики случайного рассеяния результатов наблюдений (характеристики случайных погрешностей) возьмем среднее квадратичное отклонение наблюдений (СКО):

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^n (\bar{x} - x_i)^2}.$$

S характеризует разброс результатов наблюдений относительно $\bar{x}$, являющегося оценкой истинного значения μ . Для характеристики случайного отклонения $\bar{x}$ относительно μ вводят величину СКО результата измерения:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^n (\bar{x} - x_i)^2}.$$

При большом разбросе данных и малом числе измерений $\bar{x}$ может существенно отличаться от истинного значения. Для того чтобы оценить степень приближения среднего значения к истинному, используется величина, называемая доверительным интервалом – интервалом значений измеряемой физической величины, в который попадает ее истинное значение.

Интервал $[\bar{x} - \Delta_{\text{сл}}, \bar{x} + \Delta_{\text{сл}}]$ или $[-\Delta_{\text{сл}}, +\Delta_{\text{сл}}]$ называется доверительным интервалом в первом случае результата измерения, во втором – случайной погрешности. Так как случайная погрешность, распределенная по нормальному закону, может принимать любые, в том числе и сколь угодно большие значения, то мы не можем наверняка сказать, что она лежит в указанном интервале, а можем лишь говорить о вероятности p попаданий случайной погрешности в заданный интервал. Зная закон распределения погрешностей, эту вероятность можно подсчитать:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\bar{x}-\Delta_{\text{сл}}}^{\bar{x}+\Delta_{\text{сл}}} \lambda^{\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx.$$

Таблица 1 – Коэффициенты Стьюдента

Количество измерений	p			Количество измерений	p		
	0,9	0,95	0,99		0,9	0,95	0,99
2	6,31	12,71	63,66	13	1,78	2,18	3,05
3	2,92	4,30	9,92	14	1,77	2,16	3,01
4	2,35	3,18	5,94	15	1,76	2,14	2,98
5	2,13	2,78	4,60	20	1,73	2,09	2,86
6	2,02	2,57	4,03	25	1,71	2,06	2,80

Количество измерений	p			Количество измерений	p		
	0,9	0,95	0,99		0,9	0,95	0,99
7	1,94	2,45	3,71	30	1,70	2,04	2,76
8	1,90	2,36	3,50	40	1,69	2,02	2,71
9	1,86	2,31	3,35	50	1,69	2,01	2,68
10	1,83	2,26	3,25	100	1,66	1,98	2,63
11	1,81	2,23	3,17	...			
12	1,80	2,20	3,11	∞	1,645	1,960	2,576

Этот интервал в элементарных функциях не берется, но эта задача решена и составлены таблицы. Обычно задаются доверительной вероятностью p и, зная N , по таблице коэффициентов Стьюдента находят $t_{p,N}$ (табл. 1). При всех измерениях в лабораторном практикуме рекомендуется задавать значение $p = 0,95$ (95 %). Более высокая надежность 0,99 требуется только при очень точных и ответственных экспериментах. Зная $t_{p,N}$, находят доверительный интервал в единицах измерения по формуле

$$\Delta_{\text{сл}}(\bar{x}) = t_{p,N} \cdot S_{\bar{x}}.$$

Проверка результатов на промах

Промахом называют грубую погрешность, т. е. погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, который для данных условий резко отличается от остальных результатов. Именно грубые погрешности и могут быть вызваны ошибками, которые допускает оператор: неправильный отсчет по шкале измерительного прибора или неправильная запись результата наблюдений. Также их причинами могут стать внезапные и кратковременные изменения условий измерения или незамеченные неисправности в аппаратуре. Промахи могут возникать при однократных измерениях и могут быть выявлены и устранены при повторных измерениях.

Поэтому обработку прямых измерений рекомендуется начинать с проверки результатов на наличие промахов. Существует много критериев выявления и отбрасывания промахов. Выбор критерия зависит от цели измерений. Для выявления результатов, содержащих грубые погрешности, существуют различные статистические методы (критерии), в основе которых, как правило, лежит предположение о том, что результаты наблюдений принадлежат ряду, элементы которой распределены по нормальному закону.

Метод состоит в том, что подсчитывают вероятность получить отклонение результата наблюдения от среднего, равное большому отклонению подозрительного результата. Если эта вероятность мала, то результат считают промахом и ис-

ключают из выборки, если же эта вероятность достаточно велика, то отклонение результата считают естественным в условиях нормального распределения и оставляют его. Если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратичного отклонения. В этом случае считается, что результат, возникающий с вероятностью $P \leq 0,003$, маловероятен и его можно квалифицировать промахом, т. е. сомнительный результат x_i отбрасывается, если

$$|\bar{x} - x_i| > 3S.$$

Величины $\bar{x}$ и S вычисляются без учета x_i .

При объеме выборки N менее 10 следует применять критерий Романовского, который вычисляется по формуле

$$\left| \frac{\bar{x} - x_i}{S} \right| = \beta.$$

Если $\beta \geq \beta_{кр}$, то результат отбрасывается, где β – теоретическое значение, определяется по формуле критерий Романовского, а $\beta_{кр}$ – табличное значение. Обычно вероятность p принимают 0,95 (табл. 2).

Таблица 2 – Критерий Романовского

N	$\beta_{кр}$			N	$\beta_{кр}$		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
3	1,41	1,41	1,41	15	2,33	2,49	2,80
4	1,64	1,69	1,72	16	2,35	2,52	2,84
5	1,79	1,87	1,96	17	2,38	2,55	2,87
6	1,89	2,00	2,13	18	2,40	2,58	2,90
7	1,97	2,09	2,26	19	2,43	2,60	2,93
8	2,04	2,17	2,37	20	2,45	2,62	2,96
9	2,10	2,24	2,46	25	2,54	2,72	3,07
10	2,15	2,29	2,54	30	2,61	2,79	3,16
11	2,19	2,34	2,61	35	2,67	2,85	3,22
12	2,23	2,39	2,66	40	2,72	2,90	3,28
13	2,26	2,43	2,71	45	2,76	2,95	3,33
14	2,30	2,46	2,76	50	2,80	2,99	3,37

Сложение систематических и случайных погрешностей

1. Если $\Delta_c < 0,8S_{\bar{x}}$, то неисключёнными систематическими погрешностями пренебрегают по сравнению со случайными и принимают, что граница погрешностей измерений $\Delta_c = \Delta_{сл}$ равна границе доверительного интервала случайной составляющей.

2. Если $\Delta_c > 8S_{\bar{x}}$, то случайной погрешностью пренебрегают по сравнению с систематической и считают, что граница погрешности результата измерений равна границе неисключенной систематической погрешности.

3. Если $0,8S_{\bar{x}} \leq \Delta_c \leq 8S_{\bar{x}}$, то границу погрешности результата измерения находят путем построения композиции распределений случайной и неисключенной систематической погрешностей по формуле:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{сл}^2}.$$

ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Косвенным измерением называется измерение физической величины, при котором ее значение находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, значения которых получены прямыми измерениями. Вычисление её производят по формуле:

$$\Delta_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot \Delta_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \cdot \Delta_n\right)^2}$$

или

$$\Delta_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta_i\right)^2}.$$

В случае, если переменные x_i или функции от них образуют произведение или частное, удобнее пользоваться следующей формулой для подсчета относительной погрешности результата косвенного измерения:

$$\Delta_f = f \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial(\ln f)}{\partial x_i} \cdot \Delta_i\right)^2}.$$

Например, если мы имеем функцию вида $y = \frac{5x^2}{z^3}$, то получим

$$\begin{aligned} \Delta_y &= y \cdot \sqrt{\left(\frac{z^3}{5x^2} \cdot \left(\frac{10x}{z^3}\right) \cdot \Delta_x\right)^2 + \left(\frac{z^3}{5x^2} \cdot \left(-3 \frac{5x^2}{z^4}\right) \cdot \Delta_z\right)^2} = \\ &= y \cdot \sqrt{\left(2 \cdot \frac{\Delta_x}{x}\right)^2 + \left(3 \cdot \frac{\Delta_z}{z}\right)^2}. \end{aligned}$$

Минус под корнем во второй части уравнения убираем, так как при выносе его за скобку в квадрате получаем плюс $(-1)^2 = 1$.

ОКРУГЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Округление результата измерения проводят после вычисления и округления погрешности. Числовое значение результата должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. На основании этого можно сформулировать алгоритм округления:

1. Погрешность результата указывается двумя значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и одной – если первая 3 и более. Все цифры, кроме нуля, всегда значащие. Ноль является значащей цифрой, если он стоит между другими цифрами. Например, в числе 0,001203 три нуля в левой части являются незначащими цифрами, тогда как ноль между 2 и 3 значащий.

2. Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности.

3. Округление проводится лишь в окончательном результате, все предварительные вычисления проводятся с одним-двумя лишними знаками.

Например, если мы получили итоговое значение $x = 25,3478$, в случае погрешности 0,578, округляем погрешность до значения 0,6 и записываем результат, как $x = 25,3 \pm 0,6$. Если погрешность равна 0,0237, то округляем её до значения 0,024 и записываем результат, как $x = 25,348 \pm 0,024$.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В экспериментальной физике результаты измерений важно представить в наглядной форме, удобной для использования и обработки. Обычно для этого составляют таблицы, графики и уравнения. Представление данных в виде таблиц облегчает сравнение различных значений, поэтому данные опыта, как правило, записывают в таблицу, которая позволяет также вести и обработку результатов измерений. При построении графика функциональная зависимость становится явной, а результаты опыта наглядными. Для совместных измерений по графику легко можно определить и количественную связь между неоднородными величинами.

Таблицы

Таблицы применяют для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Наименование таблицы, при его наличии, должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Наименование таблицы следует помещать над таблицей слева, без абзачного отступа в одну строку с ее номером через тире.

Таблицу следует располагать в отчете непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице. В таблицу обязательно заносятся все данные, полученные из измерений, а также расчётные величины по необходимости. Названия величины и единицы измерения записываются в «шапке» таблицы. Таблицу в отчёте лучше вычерчивать с помощью карандаша и линейки, тогда как результаты измерений необходимо записывать ручкой.

Графики

Диаграммы и графики являются наиболее удобным средством передачи информации о зависимости физических величин друг от друга. Чаще всего график представляет зависимость между двумя переменными, хотя можно строить и трехмерные зависимости. Графики в отчёте лучше вычерчивать с помощью карандаша и линейки. Оси у графиков необходимо подписывать и указывать размерность физических величин.

Начало отсчета по координатным осям может не совпадать с нулевыми делениями. Это зависит от того, какой диапазон величин интересует. Например, при оптических исследованиях в видимом диапазоне спектра бессмысленно начинать шкалу длин волн с 0, так как глаз видит свет только в диапазоне от 400 до 700 нм.

Если можно определить доверительный интервал для данного измерения или систематическую погрешность, то эти величины откладываются по обе стороны от точки так, чтобы точка оказалась в центре образованного доверительного интервала.

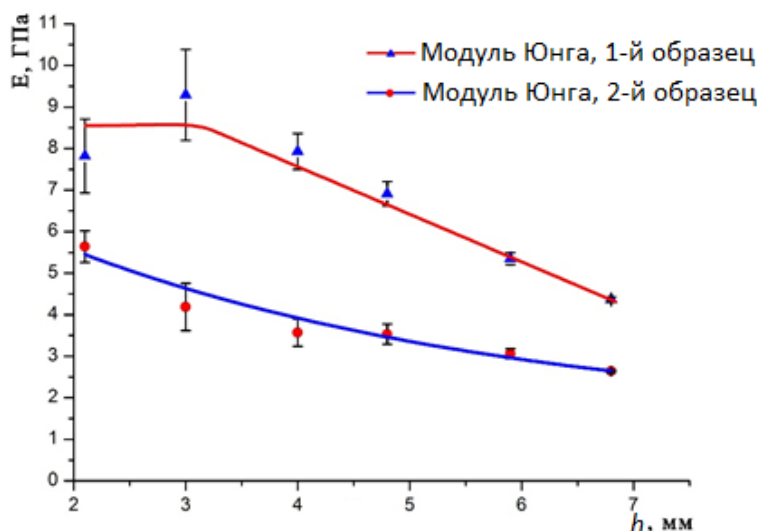


Рис. 1. Пример графика

По нанесенным на график точкам проводится плавная кривая. При этом желательно, чтобы кривая имела наименьшее количество изгибов и не выходила за пределы доверительных интервалов точек, как показано на рис. 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое измерение? Какие виды измерений бывают?
2. Какие бывают виды погрешностей по форме числового выражения?
3. Как определить погрешность прямых измерений?
4. Что такое случайная погрешность? Опишите закон сложения случайных погрешностей.
5. Какие основные законы распределений случайных величин используются при обработке измерений?
6. Как можно перейти к интервальному представлению результата измерений (доверительная вероятность)?
7. Как проверить результаты на промах?
8. Чем отличается систематическая и случайная погрешности?
9. Как рассчитать погрешность косвенных измерений?
10. Сформулируйте правила округления результата измерений.
11. В каком виде можно представить результат измерений?

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчёт по лабораторной работе должен быть аккуратно оформлен и написан понятным русским языком. В отчёте не допускаются поправки и исправления. При оформлении отчёта в тетради, необходимо на её обложке или её обороте указать номер группы, фамилию и инициалы студента. В случае, когда отчёт оформлен на отдельных листах, необходимо на титульном листе указать номер группы, фамилию и инициалы студента, а также дату выполнения лабораторной работы. Текст отчёта должен быть написан ручкой (синей или черной), а таблицы, эскизы, схемы и графики, начерчены карандашом. При работе с карандашом рекомендуется использовать линейку.

Отчёт по лабораторной работе должен состоять из следующих пунктов:

1. Номер и название лабораторной работы.

2. Цель работы.

3. Краткая теория, которая должна содержать в себе основные расчетные формулы и описание основных физических законов, которые изучаются в данной лабораторной работе. При написании краткой теории можно пользоваться как материалом из методического пособия по выполнению лабораторной работы, так и использовать другие учебные пособия.

4. Перечень приборов, используемых для выполнения лабораторной работы, с описанием их основных характеристик (пределы измерений, погрешность и т. д.). Помимо названия приборов необходимо указать их модель (если на приборе есть данные).

5. Эскиз или схематическое изображение установки. Электрическую цепь или оптическую схему при наличии. Схемы должны быть аккуратно выполнены и понятны. Все элементы на схеме должны быть подписаны.

6. Порядок выполнения работы. В этом разделе по пунктам указывается последовательность действий при выполнении лабораторной работы.

7. Таблица, содержащая результаты измерений. В таблицу обязательно заносятся все данные, полученные из измерений, а также расчётные величины по необходимости. Названия величины и единицы измерения записываются в таблицу.

8. Расчёт искомой величины. Необходимо привести по крайней мере по одному примеру расчёта всех параметров, которые получают в этой работе. Вначале записываем формулу, а затем подставляем в формулу все численные величины с указанием их размерности. Записываем ответ.

В некоторых лабораторных работах предполагается выполнение нескольких видов измерений, каждый из которых заносится в отдельную таблицу.

В этом случае рекомендуется после каждой таблицы производить расчёт искомой величины, чередуя пункты 7 и 8.

9. Расчёт погрешностей. Аналогично пункту 8, записываем формулы и численные величины, с указанием их размерности. Записываем ответ.

10. Построение графиков, если это необходимо в лабораторной работе. Обязательно указываются величины и их размерность на осях графиков.

11. Запись окончательного результата с погрешностью.

12. Заключение. В нём должны содержаться основные полученные величины с погрешностями, и если необходимо, то провести их сравнение с табличными значениями, которые необходимо выписать. При сравнении экспериментальных величин с табличными значениями необходимо учесть погрешность. В заключении необходимо кратко объяснить совпадение или несовпадение экспериментальных величин с табличными значениями, а также сделать выводы о достижении или недостижении цели работы.

Изменение правил оформления отчёта возможно при предварительном согласовании с преподавателем, который закреплён за вашей группой.

Лабораторная работа

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Цель работы. *Определение плотности твердого тела правильной геометрической формы, ознакомление с устройством и правилами работы с измерительными инструментами и вычислением погрешности измерений.*

Краткая теория

Плотность тела – это скалярная физическая величина, которая определяется отношением массы тела к его объему для однородного тела:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

т. е. плотность численно равна массе единицы объема тела. Поэтому для нахождения плотности тела по формуле (1), нам необходимо знать его массу и объем. Однородным телом называется такое тело, свойства которого одинаковы в любой его точке объема. Понятие об однородности тела противоречит тому, что все тела состоят из атомов и содержат в себе много дефектов (границы зерен, дислокации, точечные дефекты и т. д.). Несмотря на это, если мы рассматриваем участок в объеме тела, который во много раз превышает размеры неоднородностей, и при условии, что они равномерно распределены по объему тела, то различия между участками тела становятся незначительными и плотность перестаёт зависеть от положения рассматриваемых участков в объеме образца. Следовательно, мы можем рассматривать такое тело, как однородное. В случае, когда размер неоднородностей сопоставим с размером тела или эти участки распределены неравномерно по объему тела, то это тело является неоднородным и его плотность зависит от положения рассматриваемых участков в его объеме. В этом случае, плотность тела оценивают локально в его конкретных участках объема, где оно однородно, или используют термин средняя плотность. Плотность тела также зависит от его температуры, давления и агрегатного состояния. Поэтому в определении плотности тела мы также должны учитывать эти факторы.

В данной работе мы определяем плотность однородного тела при комнатных условиях. Исследуемое тело имеет форму цилиндра, следовательно, его объем можно рассчитать по формуле

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h, \quad (2)$$

где d – диаметр; h – высота цилиндра.

Подставляя формулу (2) в уравнение (1), получим выражение для вычисления плотности исследуемого тела:

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}. \quad (3)$$

Из полученной формулы (3) следует, что для определения ρ нужно измерить значения m , d , h .

Приборы и материалы:

- весы МАССА-К ВК-600 0,01;
- штангенциркуль ШЦ-I-150 0,05;
- микрометр МК-25 0,01;
- исследуемое тело цилиндрической формы.

Весы

Масса тела (m) в работе определяется на электронных весах с автоматической калибровкой. После включения весов дождитесь окончания калибровки и убедитесь, что весы показывают нулевые значения. Если значения не нулевые, то убедитесь, что на платформе ничего нет и нажмите на кнопку « $\rightarrow 0 \leftarrow$ » – установка нуля весов. После этого поместите тело на центральную часть платформы, дождитесь, когда значения на табло весов перестанут изменяться, и запишите показания прибора. Обязательно нужно записывать все цифры с прибора, даже если последние цифры равны нулю.

Штангенциркуль

Штангенциркуль позволяет производить измерение внутренних и наружных размеров тела с точностью до 0,05 мм. Он состоит из подвижной части, на которой расположены губка и нониус и неподвижной части, где располагаются

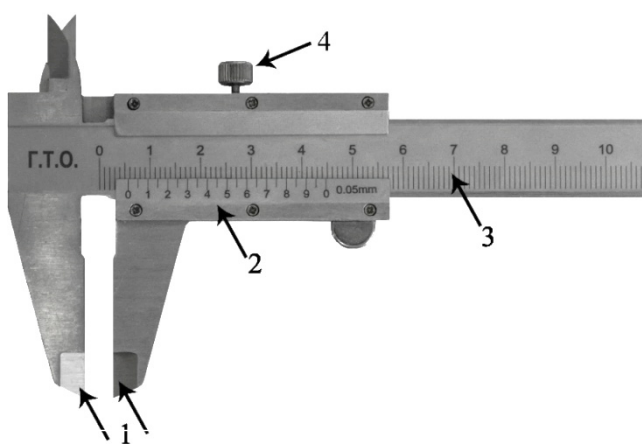


Рис. 2. Штангенциркуль:
1 – губки; 2 – нониус; 3 – линейка;
4 – стопорный винт

губка и измерительная линейка (рис. 2). Фиксация подвижной части относительно неподвижной производится с помощью стопорного винта.

Для измерения высоты цилиндра его плотно зажимают между губками штангенциркуля, не прикладывая чрезмерных усилий, и фиксируют нониус стопорным винтом (см. рис. 2). По положению нуля нониуса отсчитывают по линейке целое число делений от нуля. Далее смотрят, какое

деление нониуса совпадет с делением на линейке (рис. 3). Считаем количество делений нониуса от нуля до деления, которое совпало с делением на линейке. Получившееся число умножаем на цену деления нониуса и суммируем со значением основной шкалы.

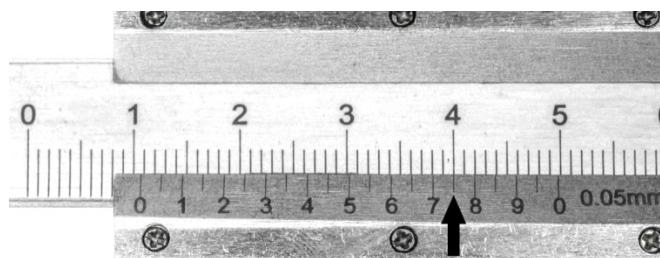


Рис. 3. Определение размера измеряемого тела с помощью штангенциркуля

Например, на рис. 3 нуль нониуса перешел за 10 мм масштаба и деление между 7 и 8 на нониусе совпадает с одним из делений на линейке (показано стрелкой). Следовательно, 15 делений нониуса расположено между нулем и делением, которое совпадает с делением на линейке. Поэтому высота тела равна $h = 10 \text{ мм} + 15 \cdot 0,05 \text{ мм} = 10 \text{ мм} + 0,75 \text{ мм} = 10,75 \text{ мм}$. Учитывая, что длина шкалы на нониусе равна 1 мм, можно определить значение 0,75 мм без дополнительных вычислений.

Микрометр

Микрометр – это прибор для измерения наружных размеров небольшого тела с точностью до 0,01 мм. В данной лабораторной работе будем его использовать для определения диаметра исследуемого цилиндрического тела. Микрометр состоит из рамки, выполненной в виде полукруга и ручки, на которой расположен измерительный барабан (рис. 4). Для проведения измерения размера тела его зажимают между измерительными губками. Для этого тело прижимают к неподвижной губке (пятка) и плавно подводят подвижную губку (винт) к измеряемому телу. Передвижение подвижной губки осуществляется с помощью вращения барабана. Фиксация тела между губками достигается только за счёт вращения трещотки и появления характерных щелчков. Нельзя зажимать измеряемое тело при помощи вращения барабана, так как возникает риск поломки микрометра. После фиксации образца между губками барабан необходимо зафиксировать поворотом стопора.

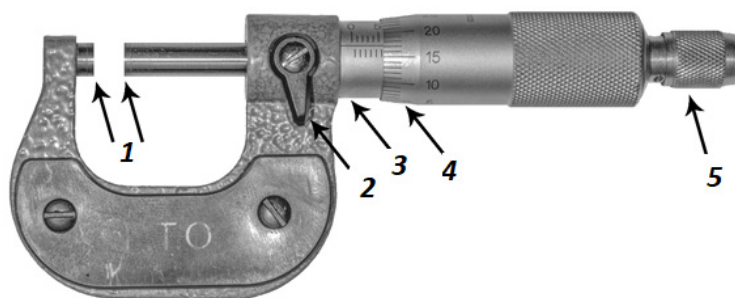


Рис. 4. Микрометр:

1 – измерительные губки (пятка и винт); 2 – фиксатор;
3 – горизонтальная шкала стебля; 4 – вертикальная шкала барабана; 5 – трещотка

Для определения высоты тела сначала считаем количество верхних рисок на горизонтальной шкале стебля от нуля до барабана и умножаем их на один миллиметр. Далее смотрим на нижние риски и если мы видим, что нижняя риска расположена ближе к барабану, чем крайняя правая верхняя риска, то добавляем 0,5 мм, если верхняя риска ближе к барабану, чем нижняя, то ничего не добавляем. Смотрим пересечение горизонтальной линии на стебле с вертикальной шкалой на барабане и выбираем деление, которое расположено ближе к линии. Полученное число умножаем на 0,01 мм. Добавляем получившееся число к значению на горизонтальной шкале.

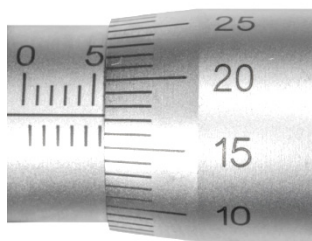


Рис. 5. Определение размера измеряемого тела с помощью микрометра

Например, на рис. 5 количество верхних делений равняется 5, умножаем это число на 1 мм. Правое нижнее деление расположено ближе к барабану, чем верхнее, поэтому добавляем 0,5 мм. Затем определяем деление на вертикальной шкале барабана, которое расположено ближе к линии горизонтальной шкалы (17-е деление на рис. 5). Получаем диаметр тела $d = 5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм} + 0,17 \text{ мм} = 5,67 \text{ мм}$.

Известно, что исследуемое тело невозможно изготовить идеальной формы. При механической обработке детали могут возникнуть погрешности формы, например, как на рис. 6.

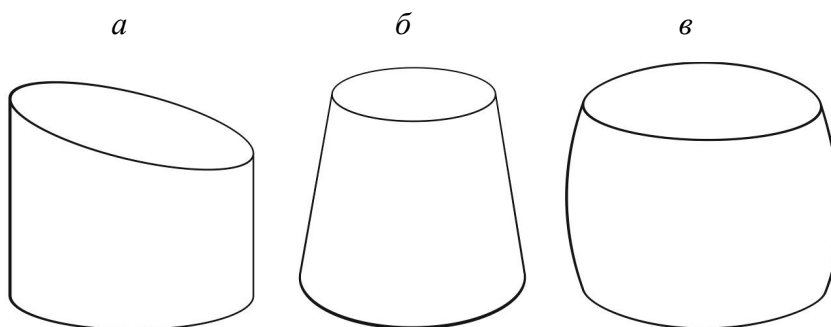


Рис. 6. Виды несовершенства формы цилиндрических образцов:
а – непараллельность оснований; б – конусность; в – бочкообразность

Поэтому для точного определения объема образца V , при планировании эксперимента, важно правильно выбрать сечения для снятия размеров d и h .

Например, при определении высоты h рекомендуется последовательно, поворачивая образец, проводить измерения длин, образующих 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' (рис. 7, а), тогда как при определении диаметра d рекомендуется проводить измерения в следующем порядке 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' (рис. 7, б).

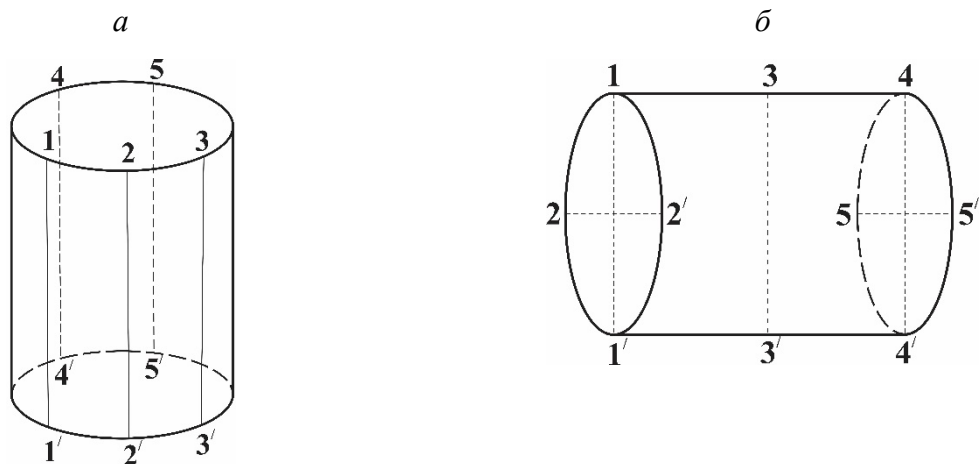


Рис. 7. Порядок измерений высоты (а) и диаметра (б) образца цилиндрической формы

При дальнейшей обработке результатов измерений средняя арифметическая величина размеров h и d считается наиболее близкой к истинной.

Порядок выполнения работы

1. Исследуемое тело взвешиваем на весах 5 раз. Результаты заносим в табл. 3.

2. Высоту измеряем штангенциркулем, а диаметр цилиндра микрометром. Все измерения делаем по 5 раз по схеме, приведенной на рис. 7. Результаты измерений и вычислений записываются в табл. 3.

3. Средние значения массы, высоты и диаметра тела находим по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

где n – это количество измерений.

4. Плотность тела рассчитывается по формуле (3), в которой для величин массы, диаметра и высоты берутся значения из табл. 3. Находим среднее значение плотности тела.

5. Вычисляем погрешности измерений.

6. Записываем выводы, где проводим сравнение полученного значения плотности тела с табличными значениями и определяем материал, из которого сделано исследуемое тело.

Результаты измерений

Измерения	h , мм	d , мм	m , г	ρ_i , кг/м ³	$(\bar{\rho}-\rho_i)^2$, кг ² /м ⁶
1					
2					
3					
4					
5					
	$\bar{h} =$	$\bar{d} =$	$\bar{m} =$	$\bar{\rho} =$	$\Sigma(\bar{\rho}-\rho_i)^2 =$

Расчёт случайной погрешности измерений для ρ :

$$S_{\bar{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=0}^n (\bar{\rho} - \rho_i)^2},$$

$$\Delta_{\text{сл}}(\bar{\rho}) = t_{p,N} \cdot S_{\bar{\rho}},$$

где $t = 2,78$ для $N = 5$ и $p = 0,95$.

Систематическая погрешность определения косвенного измерения плотности:

$$\Delta_c = \bar{\rho} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_c(m)}{\bar{m}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{\Delta_c(d)}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_c(h)}{\bar{h}}\right)^2}.$$

Полная погрешность:

$$\Delta_{\rho} = \sqrt{\Delta_c^2 + \Delta_{\text{сл}}^2}.$$

Окончательный результат записываем в таком виде:

$$\rho = \bar{\rho} \pm \Delta_{\rho}.$$

При записи окончательного результата следует учитывать правило округления результатов и записи погрешностей измерений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется плотностью тела?
2. Вывести расчетную формулу определения плотности цилиндра.
3. Какое тело называется однородным?
4. Поясните порядок выполнения работы.
5. Какие измерения в данной работе относятся к прямым, а какие к косвенным?
6. Как вычисляется случайная погрешность при измерениях?
7. Что такое систематическая погрешность измерений и из чего она складывается?
8. Сравните случайные и систематические погрешности измерений в данной работе. Какая величина дает наибольший вклад в погрешность определения плотности?

ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Лабораторная работа №*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ К ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ C_p/C_v

Цель работы. Изучение законов идеального газа, определение опытным путем величины показателя адиабаты для воздуха и сравнение полученного значения с теоретическим для двухатомного газа.

Краткая теория

Теплоёмкость – скалярная физическая величина, определяемая как отношение количества теплоты δQ поглощаемой/выделяемой термодинамической системой при бесконечно малом изменении её температуры, к величине этого изменения dT , [ДжК]:

$$C_{\text{тела}} = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Молярная теплоемкость численно равна количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молю вещества для повышения его температуры на 1 Кельвин.

Обычно различают две теплоемкости газов:

C_v – теплоемкость газа при постоянном объеме:

$$C_v = \frac{i}{2} R,$$

где i – число степеней свободы молекул газа; R – универсальная газовая постоянная.

C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R.$$

Эти теплоемкости связаны друг с другом уравнением Майера:

$$C_p = C_v + R.$$

Уравнение Майера показывает, что C_p всегда больше C_v на величину газовой постоянной. Так как газ при постоянном давлении расширяется от нагревания и совершает некоторую работу против внешних сил, то, следовательно, C_p больше C_v и $\frac{C_p}{C_v} > 1$.

Отношение молярных теплоемкостей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – постоянная Пуассона (γ – показатель адиабаты):

$$\gamma = \frac{i+2}{i},$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

Это соотношение имеет большое значение при анализе адиабатных процессов, когда отсутствует теплообмен между газом и окружающей средой. При адиабатных процессах для идеального газа справедлив закон Пуассона:

$$PV^\gamma = \text{const}.$$

Измерительные приборы

Наименование прибора	Пределы измерений	Цена наименьшего деления
Манометр	– 240 ... + 240 мм вод. ст.	1 мм вод. ст.

Порядок выполнения работы

1. Флажок крана Z (рис. 8) устанавливаем в I-е положение (рис. 9) (смотреть с торца крана) и резиновой грушей нагнетаем воздух в сосуд пока разность уровней менисков жидкости в трубках манометра не достигнет 15–20 см по шкале манометра.

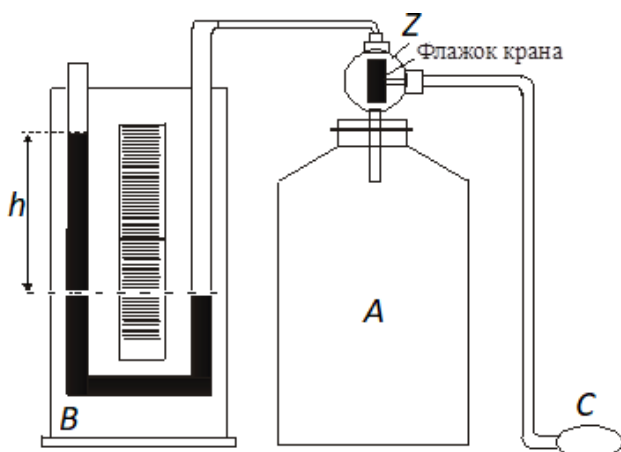


Рис. 8. Схема экспериментальной установки:

A – стеклянный сосуд; B – дифференциальный водный манометр; C – резиновая груша;
 Z – трехходовой кран; h – высота изменения уровня воды

2. Затем поворачиваем флажок крана Z на 180° градусов (см. рис. 9, II-е положение) для предотвращения утечек воздуха через клапан нагнетателя. При нагнетании воздух в сосуде сжимается и его температура повышается. Чтобы температура воздуха внутри сосуда сравнялась с температурой окружающей

среды t_1 , следует подождать (3–5 минут) перед снятием показаний водяного манометра. При этом устанавливается постоянная разность уровней (h_1) в плечах манометра. Давление газа в сосуде для этого случая равно $H + h_1$, где H – атмосферное давление. Полученный результат заносят в табл. 4.

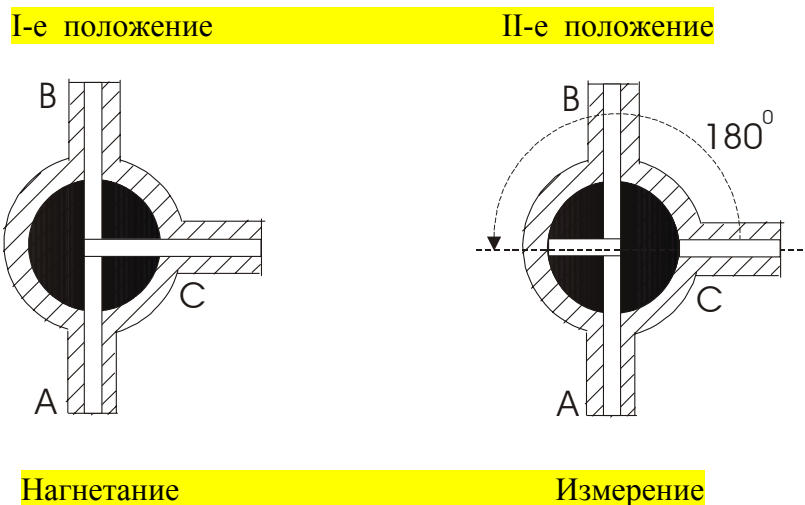


Рис. 9. Два положения трехходового крана

Таблица 4

Результаты эксперимента

Номер п/п	h_1 , мм	h_2 , мм	$h_1 - h_2$, мм	γ_i	$(\bar{\gamma} - \gamma_i)^2$
1	105	31	74	1,419	0,001438
2	134	28	106	1,264	0,013654
3	133	33	100	1,330	0,002601
4	136	37	99	1,374	0,0000527
5	123	42	81	1,519	0,018911
Среднее значение $\bar{\gamma} = 1,381$					$\sum (\bar{\gamma} - \gamma_i)^2 = 0,0367$

3. Вынимаем вращающуюся часть крана (втулку), после чего воздух выходит из сосуда. После прекращения шипения немедленно вставляем втулку в прежнее положение (см. рис. 9, II-е положение). Во время отсутствия втулки крана давление воздуха в сосуде падает до атмосферного, а его температура понижается до t_2 . Понижение температуры объясняется тем, что при адиабатическом расширении воздух совершает работу против атмосферного давления за счет внутренней энергии.

4. Через 3–5 минут после закрытия крана воздух в сосуде нагреется до температуры окружающей среды t_1 , его давление увеличивается, и по шкале манометра можно снять отсчет разности уровней h_2 . Полученный результат заносим в табл. 4.

5. Проводим 5 экспериментов, повторяя пп. 1–6.

6. Вычисляем γ , используя формулу: $\gamma_1 = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$.

7. Вычисляем погрешности измерений.

8. Записываем выводы.

Вычисляем показатель адиабаты:

$$\gamma_1 = \frac{h_1}{h_1 - h_2} = \frac{105 \text{ мм}}{74 \text{ мм}} = 1,419.$$

Вычисляем среднеквадратичное отклонение среднеарифметического:

$$S_{\bar{\gamma}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\bar{\gamma} - \gamma_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} \cdot 0,0367} = 0,0428.$$

Вычисляем случайную погрешность измерений γ :

$$\Delta_{\text{сл}} = t_{p,N} \cdot S_{\gamma} = 2,78 \cdot 0,0428 = 0,119.$$

Рассчитываем систематическую погрешность измерений γ , где в качестве значений h_1 и h_2 берем среднее значение:

$$\Delta_c = \bar{\gamma} \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{126}\right)^2 + \left(\frac{1}{34}\right)^2} = 0,0418.$$

Вычисляем полную погрешность измерений γ :

$$\Delta_{\gamma} = \sqrt{\Delta_{\text{сл}}^2 + \Delta_c^2} = \sqrt{0,119^2 + 0,0418^2} = 0,1261 \approx 0,13.$$

Окончательный результат записываем следующим образом

$$\gamma = 1,38 \pm 0,13.$$

Выводы

Полученное в ходе измерений значение показателя адиабаты $\gamma = 1,38 \pm 0,13$ с учетом погрешности совпадает с теоретическим значением, равным 1,4, которое следует из того факта, что воздух на 99 % состоит из смеси двухатомных газов – азота N_2 и кислорода O_2 . Данное значение показателя адиабаты говорит о том, что в ходе экспериментов колебательные степени свободы молекул газов, составляющих воздух, не были возбуждены. Случайная погрешность измерений γ более, чем в три раза больше систематической погрешности, что говорит о том, что изопроцессы в баллоне не были строго равновесными и расширение воздуха не было строго адиабатическим.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булинский А. В., Ширяев А. Н. Теория случайных процессов: учебник / А. В. Булинский, А. Н. Ширяев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 408 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – М.: Академия, 2007. – 576 с.
3. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – М.: Высшее образование, 2008. – 479 с.
4. Кингман Дж. Пуассоновские процессы // пер. с англ.; под ред. А. М. Вершика. – М.: МЦНМО, 2007. – 136 с.
5. Крянев А. В., Лукин Г. В. Математические методы обработки неопределенных данных: монография / А. В. Крянев, Г. В. Лукин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216 с.
6. ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М., 1978.
7. ГОСТ 11.004-76. ПС. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. – М., 1974. Отменен с 1.03.87.
8. ГОСТ 8.401-80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М., 1982.
9. МИ 1317-86. Методические указания. Результаты и характеристики погрешности измерений (способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров). – М., 1986.
10. Краткие сведения по обработке результатов физических измерений: метод. указания / сост. Г. П. Яковлев. – Екатеринбург, 2003.
11. Степанова Е. А., Скулкина Н. А., Волегов А. С. Основы обработки результатов измерений / Е. А. Степанова, Н. А. Скулкина, А. С. Волегов: – Екатеринбург, 2014. – 98 с.
12. Горбанов В. И., Полев В. Ф. Физика. Часть 1. Механика, специальная теория относительности, молекулярная физика и термодинамика: курс лекций / В. И. Горбанов, В. Ф. Полев; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2012. – 105 с.
13. Коршунов И. Г. Основы физики: учебник / И. Г. Коршунов; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. – 311 с.

Учебное издание

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Викторович
КУКЛИНА Александра Александровна
СМОЛЬНИКОВ Сергей Авенирович

ФИЗИКА

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТОВ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Учебное пособие
по дисциплине «Физика»
для студентов всех специальностей и направлений
очного и заочного обучения

Редактор изд-ва *Н. Л. Сайгина*
Компьютерная верстка *Зайцева Д. В., Куклиной А. А., Сайгиной Н. Л.*

Подписано в печать 22.03.2024 г.
Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печ. л. 2,0. Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 150 экз.

Издательство УГГУ
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Отпечатано в типографии
ООО «Издательство УМЦ УПИ»
620072, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2