

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский государственный горный университет»**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»**

На правах рукописи



**Макарова Валерия Викторовна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ХОДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА  
В УСЛОВИЯХ ПАО «УРАЛАСБЕСТ»**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор,  
Лагунова Юлия Андреевна

**Екатеринбург – 2024**

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	11
1.1. Особенности конструкции гусеничных карьерных экскаваторов .....	13
1.2. Основные характеристики технического состояния ходового оборудования экскаватора.....	23
1.3. Обзор и анализ проведенных исследований по техническому состоянию карьерных экскаваторов.....	24
1.4. Методы регистрации и контроля деформаций и нагрузок, действующих на конструкцию ходового оборудования.....	31
1.5. Постановка задач исследований .....	35
2. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	38
1.2. Определение факторов, оказывающих воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерного экскаватора .....	38
2.2. Планирование многофакторного эксперимента для исследования надежности ходового оборудования карьерного экскаватора .....	41
2.3. Последовательность проведения эксперимента.....	57
2.4. Применение экспериментальной механики при проведении натурных испытаний .....	57
2.5. Итоги планирования эксперимента .....	68
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	70
3.1. Карьерный экскаватор ЭКГ-10 №333 ПАО «УРАЛАСБЕСТ».....	71
3.2. Применение вибродиагностического метода исследования.....	75
3.3. Тензометрические испытания редукторов хода.....	85
3.4. Применение твердометрии для оценки элементов гусеничного хода карьерного экскаватора .....	93
3.5. Определение показателей надежности ходового оборудования карьерных экскаваторов .....	98
3.6. Результаты проведения экспериментальных исследований .....	106
4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВЕДУЩЕЕ КОЛЕСО ГУСЕНИЧНОГО ХОДА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА.....	112
4.1. Расчет нагрузок на ведущее колесо в среде APM WinMachine.....	114

4.2. Анализ влияния материала на напряженно-деформированное состояние ведущего колеса .....	119
4.3. Выводы по главе .....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	127
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 .....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 .....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 .....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 .....	192
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 .....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 .....	197

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* В настоящее время проведение экскавационных работ на карьерах Российской Федерации занимает значительный объем (74 %) от всех выполняемых горных работ. Проблема повышения функционирования (работоспособности) карьерных экскаваторов типа механическая лопата (ЭКГ) по-прежнему остается актуальной. На работоспособность карьерных экскаваторов оказывают влияние внеплановые простои, 37 % которых возникают из-за проблем с обслуживанием гусеничного ходового оборудования. В случае внеплановых простоев затраты на восстановление составляют минимум 3000 руб./ч в зависимости от конструктивных элементов, подлежащих ремонту.

Ходовое оборудование карьерных экскаваторов должно обладать: достаточной силой тяги, заданной скоростью передвижения и маневренностью; способностью преодолевать заданные подъемы и уклоны; небольшой массой при обеспечении заданных давлений (средних и максимальных) на грунт; устойчивостью машины при всех возможных изменениях положения ее центра тяжести; отсутствием больших динамических нагрузок в конструкции всей машины при передвижении; малыми сопротивлениями при передвижении; минимальным числом быстроизнашивающихся элементов; удобством в эксплуатации и долговечностью.

Гусеничное ходовое оборудование обладает высокой устойчивостью, способностью преодолевать уклоны (до 15°), высокой проходимостью, малыми давлениями на грунт, универсальностью. Его недостатки – большая масса (с нижней рамой до 50 % общей массы машины); высокое тяговое усилие (30–40 % силы тяжести экскаватора); сложность устройства и быстрый износ ходовых элементов.

Сервисное обеспечение эксплуатации карьерного экскаватора типа ЭКГ – многофакторная задача. Наиболее важными составляющими сервиса являются профилактическое обслуживание, своевременное обеспечение запасными частями и комплектующими изделиями на протяжении всего жизненного цикла карьерного экскаватора, использование современных композитных материалов, применение методов неразрушающего контроля при диагностировании и предупреждении возникновения возможных отказов, которые должны стать важным направлением

снижения себестоимости экскавационных работ за счет сокращения времени простоев карьерного экскаватора в ремонте.

Капитальные ремонты карьерных экскаваторов проводят в среднем после 72 месяцев эксплуатации. Статистические данные о фактических показателях надежности карьерных экскаваторов, объемах и номенклатуре поставок запасных частей для ходового оборудования карьерных экскаваторов не используются в сложившейся системе организации сервиса.

Таким образом, разработка и реализация методов диагностирования и предупреждения возникновения отказов, обеспечивающих снижение себестоимости экскавационных работ за счет сокращения времени простоев в ремонте карьерного экскаватора типа ЭКГ (из-за выхода из строя его ходового оборудования), а также исследование влияющих факторов и напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций ходового оборудования, является актуальной.

***Степень разработанности темы исследования.*** Вопросами надежности и долговечности карьерных экскаваторов, трения и изнашивания их элементов, диагностикой технического состояния, совершенствованием технического обслуживания и ремонта занимались исследователи: Л. И. Андреева, А. П. Богданов, А. Ю. Болотнев, П. В. Буюнкин, В. С. Великанов, Б. М. Габбасов, В. Н. Геращенко, А. А. Гайнуллин, В. Н. Гетопанов, А. В. Докукин, С. Ю. Дрыгин, А. А. Ефимов, С. Л. Иванов, Л. И. Кантович, А. Б. Катанов, В. С. Квагинидзе, П. И. Кох, Ю. Д. Красников, В. Р. Кубачек, А. В. Кудреватых, Е. Г. Кузин, Ю. А. Лагунова, Р. В. Левкович, Е. Б. Ломакин, А. М. Мажитов, Н. А. Маслов, Д. Е. Махно, Е. Е. Милосердов, Л. А. Молдавский, Д. С. Наумов, И. Г. Носовский, К. Ю. Окулов, М. В. Павлов, В. Б. Перлин, Р. Ю. Подэрни, В. М. Рачек, В. Ю. Сергеев, А. А. Синяков, В. И. Солод, Л. И. Сосновский, Ю. Н. Тимошенко, А. А. Томашевский, А. А. Хорешок, Д. А. Шибанов, А. В. Шовкопляс, J. Zhao, H. Zhang, Z. Zhang, Y. Ji, J. Ren, A. Moniri-Morad, J. Sattarvand и др.

Широкий класс задач технической диагностики успешно решался методами неразрушающего контроля такими учеными, как: И. Л. Абрамов, Н. П. Алешин, Н. А. Баркова, И. Д. Богомолов, Е. А. Воробьев, Б. Л. Герике, П. Б. Герике, М. Ю.

Дрыгин, И. Н. Ермолов, В. В. Носов, А. И. Потапов и др.

Оценка напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций горных машин и оборудования выполнялась такими учеными, как: Н. В. Савинова, С. А. Хорошавин, В. С. Шестаков и др.

**Объектом исследования** является ходовое оборудование карьерного экскаватора.

**Предметом исследования** является оценка влияния условий эксплуатации карьерного экскаватора на напряженно-деформированное состояние его ходового оборудования при анализе существующей системы технического обслуживания, а также повышение эффективности функционирования экскаватора с учетом методов неразрушающего контроля.

**Идея работы** состоит в повышении эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора за счет снижения затрат на поддержание его работоспособного состояния и внедрение в систему технического обслуживания и ремонта методов прогнозирования напряженно-деформированного состояния на основе неразрушающего контроля – вибродиагностики, тензометрии и твердометрии.

**Целью работы** является повышение эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора за счет снижения затрат на поддержание его работоспособного состояния.

**Задачи работы:**

- проанализировать случаи возникновения износа элементов ходового оборудования карьерных экскаваторов типа ЭКГ;
- исследовать влияние факторов, оказывающих существенное воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерных экскаваторов;
- определить количество натуральных экспериментов, необходимых для оценки напряженно-деформированного состояния элементов ходового оборудования;
- провести экспериментальные исследования по выявлению внешних и внутренних факторов возникновения напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции ходового оборудования карьерных экскаваторов;

- разработать конструкцию ведущего колеса на основе действия рабочих нагрузок и напряженно-деформированного состояния в металле, выбрать рациональный материал;

- разработать ремонтный цикл обслуживания ходового оборудования с включением диагностических методов исследования в промежутках между выполнением плановых ремонтов.

***Соответствие паспорту специальности:***

Тема исследования соответствует паспорту научной специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»:

п. 15 – Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах;

п. 16 – Техническое обслуживание и ремонт горных машин и оборудования с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий их эксплуатации.

***Научная новизна полученных результатов заключается:***

- в установлении зависимости влияния факторов, оказывающих существенное воздействие на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора;

- в обосновании критерия эффективности функционирования экскаватора с учетом применения методов технической диагностики в межремонтный период его эксплуатации;

- в разработке метода прогнозирования возникновения дефектов ходового оборудования карьерного экскаватора, основанного на использовании теории статистических решений для конкретных условий эксплуатации.

***Теоретическая значимость работы*** состоит:

- в научном обосновании и доказательстве повышения эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора путем разработки рациональной структуры ремонтного цикла с использованием в межремонтный

период методов технической диагностики: вибродиагностики, тензометрии и твердометрии.

***Практическая значимость работы*** состоит:

- в проведении экспериментальных исследований по выявлению внешних и внутренних факторов возникновения напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции ходового оборудования карьерного экскаватора;
- в разработке ремонтного цикла обслуживания ходового оборудования с включением диагностических методов исследования;
- в разработке методики проведения диагностического исследования.
- в разработке конструкции ведущего колеса с учетом напряженно-деформированного состояния в металле и выборе рационального материала.

***Методология и методы исследования*** включают: анализ и обобщение научно-технической литературы, теоретические и экспериментальные методы исследования, а также методы математической статистики для обработки результатов, метод Чеддока при определении значимости факторов, влияющих на ресурс ходового оборудования карьерного экскаватора, компьютерное моделирование рабочих нагрузок на ведущее колесо ходового оборудования с помощью метода конечных элементов.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Внеплановые простои карьерного экскаватора, которые характеризуются неисправностью ходового оборудования, возникают под влиянием внешних факторов, подчиняются линейному распределению, и, как следствие, уменьшают суточную добычу асбеста в забое по сравнению с плановой добычей в среднем на 5 % при доверительной вероятности 95 %.
2. Рациональная структура ремонтного цикла с учетом влияния внешних факторов, условий и режимов эксплуатации, а также конструктивных характеристик приводит к увеличению межремонтного периода и, как следствие, к повышению производительности карьерного экскаватора и коэффициента технической готовности.
3. Оценка технического состояния ведущего колеса ходового оборудования

карьерного экскаватора проводится на основе анализа результатов моделирования напряженно-деформированного состояния с учетом фактических нагрузок и использования различных литевых сталей для конкретных условий эксплуатации.

***Обоснованность и достоверность результатов, научных положений и выводов*** подтверждается значительным объемом статистических данных об отказах и разрушениях металлоконструкций ходового оборудования карьерного экскаватора в условиях ПАО «Ураласбест», применением стандартизованных методов неразрушающего контроля с использованием современной виброизмерительной, тензометрической и регистрирующей аппаратуры, получением статистически значимых экспериментальных результатов, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, расхождение между которыми не превышает 10 %.

***Апробация результатов работы:***

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных научно-технических и практических конференциях: международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В. Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2019, 2022-2024), всероссийская научно-практическая конференция «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта» (г. Екатеринбург, 2019, 2022-2023), международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика: повышение эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (г. Пермь, 2022-2023), международный научный симпозиум «Неделя горняка» (г. Москва, 2023-2024), международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2023-2024), международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2023), международная научно-практическая конференция «Цифровые технологии транспорта и логистики» (г. Москва, 2023), международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (г. Сочи, 2024).

**Личный вклад соискателя** заключается в: формулировании целей и задач исследования; участии на всех этапах диссертационного исследования – совместном проведении экспериментальных исследований, обработке экспериментальных данных, анализе, описании и обобщении полученных результатов, написании и оформлении рукописи диссертации, публикации научных работ по результатам исследований; установлении закономерностей влияния факторов, оказывающих существенное влияние на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора; формулировании рекомендаций по повышению эффективности технического обслуживания ходового оборудования карьерного экскаватора; разработке конструкции ведущего колеса на основе метода конечных элементов.

***Реализация результатов работы:***

Основные результаты исследования диссертационной работы приняты к внедрению ПАО «Ураласбест» при планировании технического обслуживания и ремонта карьерного экскаватора ЭКГ-10 (Акт внедрения ПАО «Ураласбест» от 11 июля 2024 г.).

По результатам исследований получено положительное решение по заявке № 2024108330 от 26.04.2024 на изобретение «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства».

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 18 научных статей, в том числе 3 – в рецензируемых научных изданиях ВАК, 1 – в рецензируемых научных изданиях Scopus / Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и десяти приложений. Материал диссертации изложен на 197 страницах машинописного текста, в том числе содержит 19 таблиц, 65 рисунка, библиографический список из 142 наименований.

# 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Активное развитие горнодобывающей отрасли и потребность в высокопроизводительных машинах, способных передвигаться по карьеру, обусловили появление карьерного экскаватора (рис. 1.1), ходовое оборудование которого представляет собой специальное устройство для передвижения по различным типам грунтов и устойчивого опирания на грунт во время работы (рис. 1.2).



Рис. 1.1. Гусеничный карьерный экскаватор ЭКГ-10

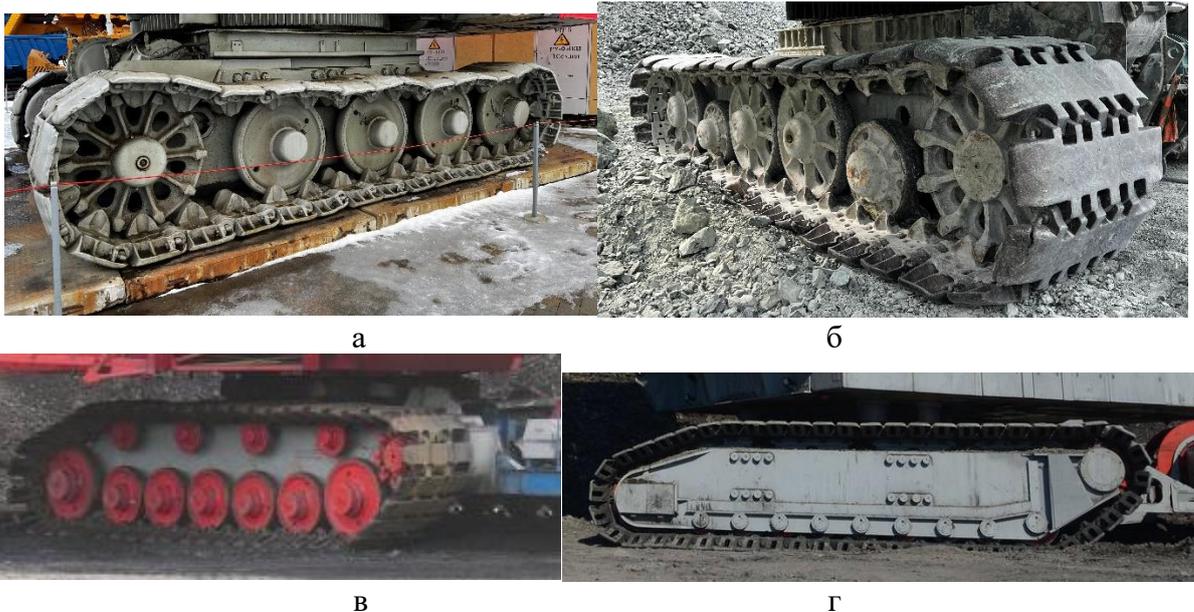


Рис. 1.2. Ходовое оборудование карьерных экскаваторов:  
а) ЭКГ-5А, б) ЭКГ-10, в) ЭКГ-18М, г) ЭКГ-35

Ходовое оборудование предназначено для передачи на грунт нагрузки от силы тяжести карьерного экскаватора и внешних нагрузок, действующих при работе, а также для передвижения в пределах рабочей зоны и с объекта на объект. Гусеничное ходовое оборудование состоит из металлоконструкций нижней рамы, гусеничных рам и ходового механизма, включающего ведущее и ведомое колеса, опорные и поддерживающие катки и редукторов хода.

В работе [47] В. С. Квагинидзе показал, что ходовое оборудование карьерного экскаватора обладает следующими достоинствами: достаточной силой тяги, высокой скоростью передвижения и маневренностью, способностью преодолевать заданные подъемы и уклоны, устойчивостью машины при всех возможных изменениях положения ее центра тяжести, малыми сопротивлениями при движении, минимальным числом быстроизнашивающихся элементов, удобством в эксплуатации [12, 37, 47, 107].

Достоинства гусеничного хода отмечены в работе Р. Ю. Подэрни: высокая устойчивость машины при работе и передвижках, более равномерное распределение давления опорной поверхности на грунт, отсутствие необходимости в подготовке пути и возможность свободного маневрирования, способность преодолевать большие уклоны (до  $23^\circ$ ), высокие тягово-цепные качества и возможность использования на различных почвах, возможность воспринимать значительные нагрузки при сравнительно низком давлении на грунт [12, 89].

К недостаткам гусеничного хода карьерного экскаватора (типа «механическая лопата») относятся: большая масса, технологическая сложность конструкции при производстве и сборке, продавливание гусеницами слабого грунта и грунта средней крепости при многократных проходах по одному месту с образованием глубоких борозд, проседание гусениц в грунте при движении по кривой, большая материалоемкость, недолговечность, высокая стоимость ремонтов, низкие КПД и скорости движения, высокий уровень вибрации при движении по твердым поверхностям, быстрый износ ходовых элементов [58, 68, 107].

### 1.1. Особенности конструкции гусеничных карьерных экскаваторов

Гусеничное ходовое оборудование служит для преобразования вращающего момента, подводимого к ведущим колесам через трансмиссию от силовой установки, в тяговое усилие, движущее карьерный экскаватор [58, 88].

Гусеничное ходовое оборудование (рис. 1.3) состоит из: гусениц 4 (цепей, лент или траков), ведущих 3 и направляющих 1 колес, опорных 5 и поддерживающих 2 катков [50, 88, 99, 116].

Сила тяжести карьерного экскаватора передается через подвеску на опорные катки и гусеницы, а через них — на опорную поверхность (грунт).

Под воздействием крутящего момента  $M$  ведущие колеса приводят в движение гусеницы, по которым передвигается несущая система карьерного экскаватора на опорных катках. При перекатывании опорных катков задние звенья гусеничной цепи перемещаются на верхнюю сторону гусеницы, а затем снова соприкасаются с поверхностью грунта под передней частью карьерного экскаватора [50, 88, 99].

По конструкции гусеничное ходовое оборудование карьерного экскаватора может быть с несущими или приподнятыми направляющими колесами, передним или задним расположением ведущих колес, с поддерживающими катками или без них и различными типами шарниров гусениц (открытые металлические, резинометаллические шарниры, шарниры в виде игольчатых подшипников) [50, 58, 88, 116].

На рис. 1.3,а и 1.3,б ведущие колеса расположены в задней части карьерного экскаватора. В этих схемах потери на трение в шарнирах меньше, чем при переднем расположении ведущих колес, так как число шарниров гусеницы, нагруженных тяговым усилием, и точек перегиба уменьшается [50, 88, 99, 116].

В схеме на рис. 1.3,в направляющее колесо является несущим, т. е. оно опущено на опорную поверхность и одновременно играет роль опорного катка. В этом случае направляющее колесо обязательно подрессорено [50, 88].

В схемах, приведенных на рисунке 1.3,б и 1.3,г отсутствуют поддерживающие катки, опорные катки большого диаметра, и само ходовое оборудование имеет меньшую высоту. Однако при движении с большими скоростями верхняя ветвь гусеницы начинает совершать значительные вертикальные колебания,

сопровожаемые ударами по опорным каткам. Схема на рисунке 1.3,г содержит большое число опорных катков, расположенных в шахматном порядке, что улучшает проходимость машины [50, 88, 116].

Наиболее широкое распространение получили металлические многозвенные гусеничные цепи, состоящие из звеньев (траков), шарнирно соединенных друг с другом [50, 88, 116].

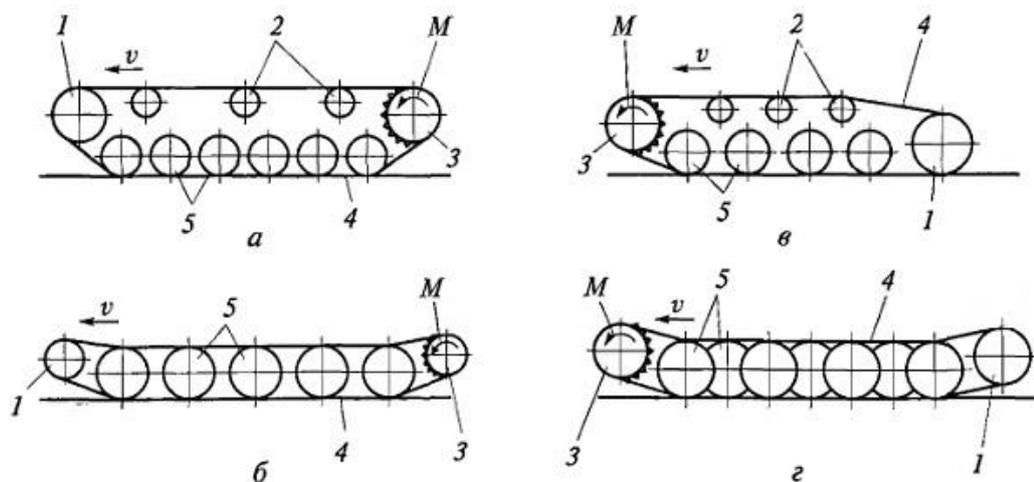


Рис. 1.3. Схемы гусеничных движителей с кормовым (а, б) и носовым (в, г) расположением ведущего колеса [50]:

1 — направляющее колесо; 2 — поддерживающие катки; 3 — ведущее колесо;  
4 — гусеничная цепь; 5 — опорные катки;  
 $v$  — скорость машины;  $M$  — вращающий момент

Траки (рис. 1.4) представляют собой литые или штампованные звенья из износостойкой стали, имеющие на наружной поверхности грунтозацепы, на внутренней поверхности — направляющие гребни, а также отверстия (цевки), в которые входят зубья ведущих колес, и ушки, в которые входят соединительные пальцы, шарнирно соединяющие траки между собой [88, 116].

Направляющие гребни препятствуют спаданию гусениц с катков. Если опорные катки одинарные, то гребни выполняются двойными и располагаются по обе стороны катков, а если катки сдвоенные, то применяются одинарные гребни, которые проходят между катками [50].

В гусеницах с открытыми металлическими шарнирами соединительный палец  $b$  в виде длинного стального стержня круглого сечения вставлен в ушки сближенных друг с другом траков и закреплен шплинтом, стопорным кольцом или расклепыванием [50]. Гусеницы с такими шарнирами подвержены ускоренному

износу, так как в шарниры легко попадает грязь и особенно песок, обладающий абразивными свойствами. В результате износа увеличивается длина гусеницы и уменьшается прочность пальцев. Изменение длины гусеницы требует частой регулировки ее натяжения, а с уменьшением прочности пальцев происходит их поломка, ведущая к разрыву гусениц [50, 88, 116].

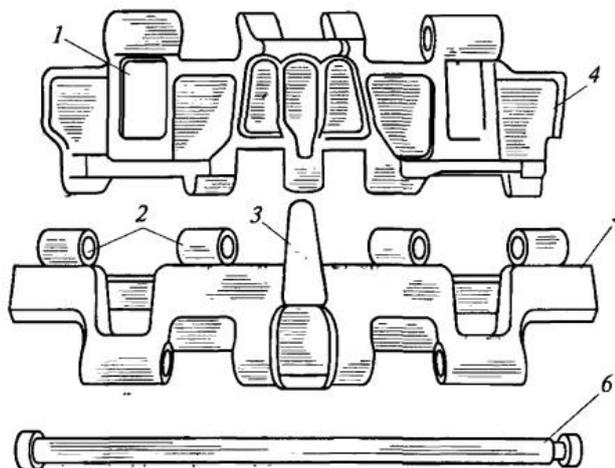


Рис. 1.4. Элементы металлической многозвенной гусеницы с открытым металлическим шарниром [50]:

- 1 — цевка; 2 — ушки; 3 — направляющий гребень; 4, 5 — траки;  
6 — соединительный палец

Применение резинометаллических шарниров (рис. 1.5), в которых устранено трение, значительно увеличивает надежность и срок службы гусениц. В таких шарнирах палец впрессован в резиновую втулку, которая, в свою очередь, запрессована в ушки трака. При изгибе гусеничной цепи происходит лишь закручивание резиновых втулок. Трение скольжения между поверхностями отсутствует, поэтому нет износа траков и пальцев. Однако в такой конструкции возникают потери при изгибе гусеницы вследствие гистерезисных явлений в резине. Для их уменьшения производится предварительное закручивание втулок в сторону, обратную их закручиванию при работе [50, 88, 116].

Шарниры на игольчатых подшипниках содержат запас смазки и закрыты сальниками. В настоящее время такие шарниры широкого распространения не получили [50].

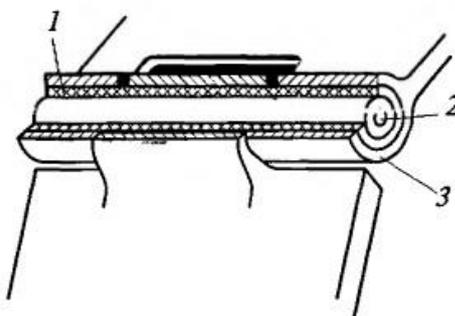


Рис. 1.5. Соединение траков резинометаллическим шарниром [50]:  
1 — резиновая втулка; 2 — палец; 3 — ушко трака

Ведущие колеса гусеничного ходового оборудования, предназначенные для перематывания гусеничной цепи, представляют собой стальные венцы, прикрепленные к ступицам бортовых передач [50, 88].

По типу зацепления ведущих колес с гусеничной цепью различают ведущие колеса с цевочным и гребневым зацеплениями [50, 88].

При цевочном зацеплении (рис. 1.6,а) зубья венцов входят в отверстия (цевки) траков гусениц и при вращении ведущих колес перематывают гусеницу.

При гребневом зацеплении (рис. 1.6,б) на наружной поверхности ведущего колеса имеются углубления, по форме и размерам соответствующие гребню гусеницы, или специальные ролики, укрепленные между гладкими ободьями колеса, которые, взаимодействуя с гребнями траков, перематывают гусеницу [88, 116].

Конструкция элементов зацепления ведущих колес с гусеницей должна обеспечивать безударную передачу усилий, свободный вход и выход элементов гусеницы из зацепления, хорошее самоочищение от грязи, снега и попадающих в зацепление крупных предметов [50, 88, 116].

Направляющие колеса располагаются на противоположном от ведущих колес конце машины и служат для направления движения гусеницы и (совместно с механизмом натяжения) для регулирования натяжения гусеницы. В зависимости от конструкции гусениц, ведущих колес и опорных катков направляющие колеса могут быть двойными или одинарными [50, 88, 99, 116].

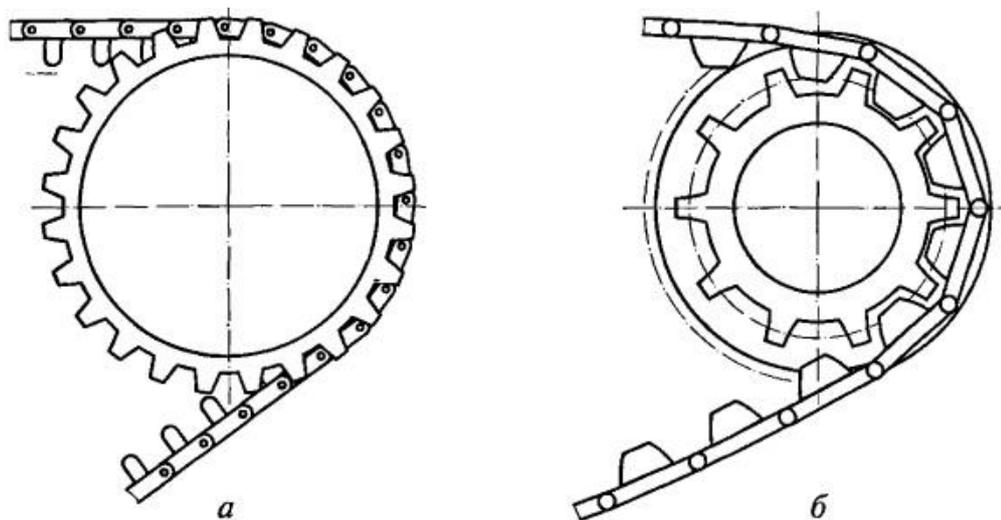


Рис. 1.6. Цевочное (а) и гребневое (б) зацепление ведущего колеса с гусеницей [50]

Натяжение гусениц необходимо для предотвращения их спадания, уменьшения потерь при перематывании гусениц и облегчения их монтажа и демонтажа [50].

Среди натяжных механизмов с механическим приводом различают:

- винтовые — с поступательным перемещением оси направляющего колеса (рис. 1.7,а),

- кривошипные — с перемещением оси направляющего колеса по дуге окружности, когда поворот кривошипа может осуществляться с помощью червячной пары (рис. 1.7,б) или винтовой стяжки (рис. 1.7,в) [50, 88, 116].

В механизме натяжения, представленном на рисунке 1.7,а при вращении винта корпус механизма с прикрепленным к нему направляющим колесом перемещается вдоль корпуса экскаватора и изменяет натяжение гусеницы. В схеме на рисунке 1.7,б направляющее колесо устанавливается в соответствующее заданному натяжению гусеницы положение при помощи червячной пары 5. Фиксация этого положения обеспечивается с помощью гребенок на кривошипе и корпусе карьерного экскаватора. Ввод и вывод гребенки кривошипа из зацепления с корпусом осуществляются в одном механизме с помощью червячной пары 6 и винтового механизма. В схеме на рисунке 1.7,в направляющее колесо устанавливают в необходимое положение за счет изменения длины винтовой стяжки. В некоторых подобных конструкциях вместо винтовой стяжки установлен гидравлический цилиндр [88, 99, 116].

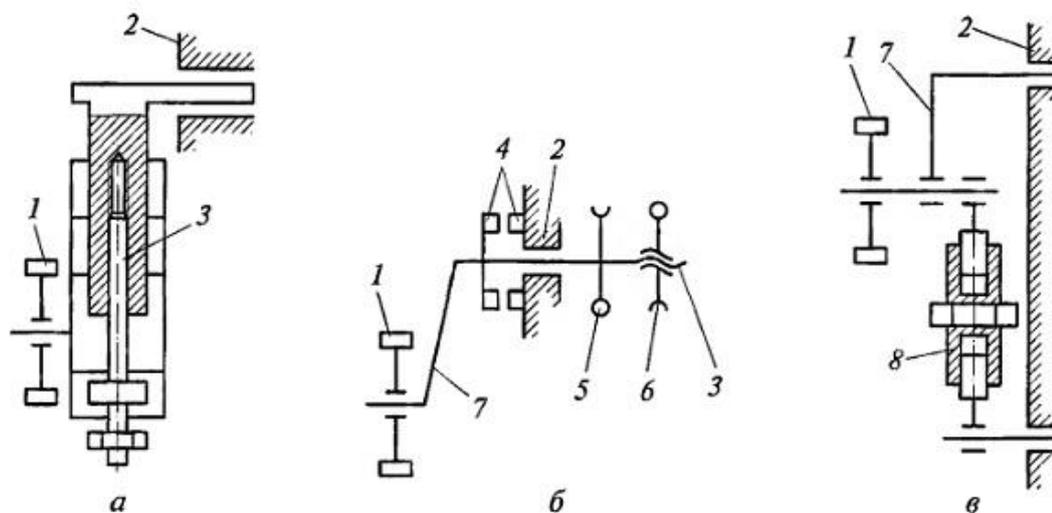


Рис. 1.7. Винтовой (а) и кривошипные (б, в) механизмы натяжения гусениц [50]:  
 1 — направляющее колесо; 2 — корпус машины; 3 — винтовой механизм;  
 4 — фиксирующие гребенки; 5, 6 — червячные пары; 7 — кривошип;  
 8 — винтовая стяжка

Опорные катки передают силу тяжести поворотной платформы карьерного экскаватора на гусеничные цепи, и по ним происходит перемещение. Число опорных катков от пяти до семи по борту [50].

Опорные катки гусеничного ходового оборудования можно разделить на три типа: с наружной резиновой шиной, с внутренней амортизацией (рис. 1.8,а) и жесткие цельнометаллические (рис. 1.8,б). Каток каждого из трех типов может быть одинарным, двойным и при очень больших нагрузках на катки – тройным [50, 88].

Также опорные катки могут быть выполнены с пневматическими шинами или шинами с эластичным наполнителем (рис. 1.8,в) [50].

В зависимости от диаметра опорные катки бывают малого (500...600 мм) и большого (700...800 мм; и более) диаметров. Гусеничное ходовое оборудование с опорными катками малого диаметра включает в себя поддерживающие катки [50].

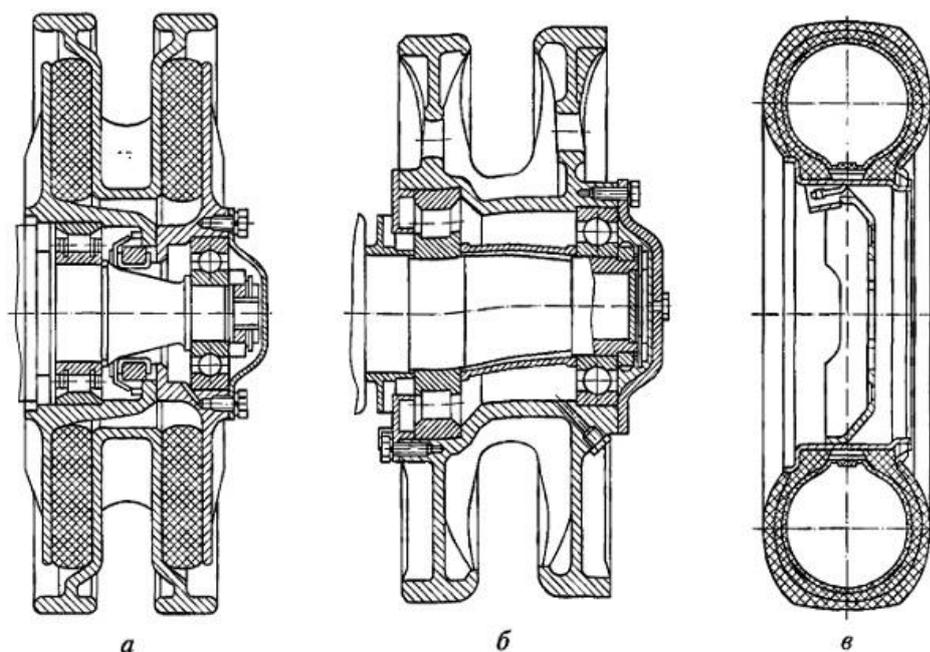


Рис. 1.8. Типы опорных катков [50]:

*а* — с внутренней амортизацией; *б* — цельнометаллические; *в* — эластичные

Жесткие опорные катки используются на тихоходных гусеничных машинах. Катки с наружной резиновой шиной снижают динамические нагрузки на гусеницу и каток, а также уменьшают шум при движении машины. Однако в резине из-за большого внутреннего трения при ее деформации выделяется большое количество теплоты, что приводит к расслаиванию шины или отслаиванию ее от обода катка. При слишком больших нагрузках на каток и скоростях движения применяются катки с внутренней амортизацией. Резина в этих катках работает, главным образом, на сдвиг, и работающая поверхность значительно больше, чем в наружных шинах [50, 88, 116].

Поддерживающие катки служат для поддержания верхней свободной ветви гусеничной цепи. Условия работы таких катков значительно легче, чем опорных, так как они нагружены лишь частью веса гусениц. На рисунке 1.9 представлена конструкция поддерживающего катка вместе с кронштейном крепления его к корпусу машины [50, 116].

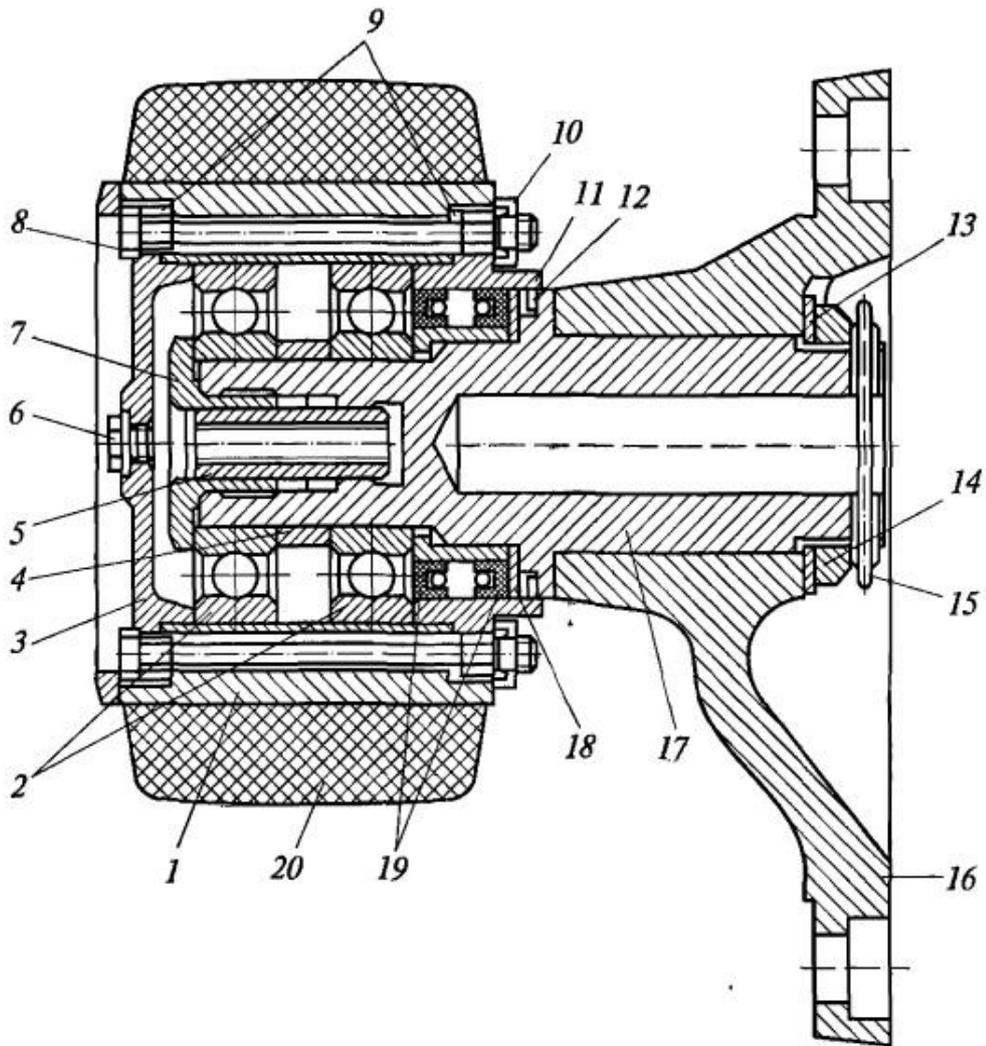


Рис. 1.9. Поддерживающий каток [50]:

1 — ступица; 2 — подшипники; 3 — крышка; 4 — втулка; 5 — стопорный палец;  
 6 — пробка; 7 — грибок; 8 — болт; 9 — прокладка; 10, 14 — гайки;  
 11 — крышка лабиринта; 12 — кольцо; 13, 18 — шайбы; 15 — шплинт; 16 — кронштейн; 17 —  
 ось; 19 — манжеты; 20 — шина

Для очистки беговых дорожек гусениц от снега служат снегоочистители, устанавливаемые в гусеничном движителе [88].

Установлено, что во время движения по снежной целине при некоторых метеорологических условиях происходит намерзание снега на беговых дорожках гусениц, что вызывает их чрезмерный натяг — происходит, так называемый, распор гусениц, в результате чего резко снижаются динамические характеристики экскаватора. Распор может вызвать спадание гусеницы, разрушение резиновой ошиповки опорных катков.

Скалывание льда с беговой дорожки верхней ветви гусеницы осуществляется при движении экскаватора специальной звездочкой, поджатой с помощью пружины

к беговой дорожке. Для улучшения скалывания льда зубья звездочки выполняют переменную ширину. При отсутствии льда на гусенице звездочки переводятся в нерабочее положение [116].

Самоочистка направляющего колеса от грязи и снега производится специальным приспособлением в виде изогнутой лопатки, установленной между венцами колеса и закрепленной на корпусе машины.

На экскаваторах применяют двух-, четырех- и восьмигусеничные системы ходовых тележек (рис. 1.10). Система гусеничного хода определяет число гусениц в схеме и их взаимное расположение [37, 47, 58, 107].

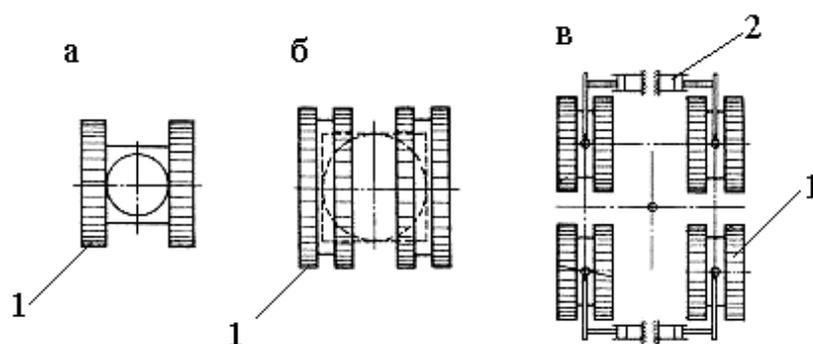


Рис. 1.10. Системы гусеничного хода  
а – двухгусеничная; б – четырехгусеничная; в – четырехопорная восьмигусеничная;  
1 – гусеница; 2 – гидроцилиндр

Движение экскаватора по кривой при двух гусеницах достигается затормаживанием одной гусеницы или сообщением правым и левым гусеницам различных скоростей [37, 47, 107]. Аналогично производится движение экскаватора при четырех гусеницах. При восьмигусеничной системе используют поворот всех гусениц с помощью гидроцилиндров, закрепленных одной стороной на базе ходовой рамы, а другой – на рычаге рамы ходовой тележки [37, 47, 107].

По способу передачи давления на грунт различают многоопорные и малоопорные гусеницы. Гусеницы называют многоопорными, если отношение числа опорных звеньев (траков), лежащих на земле, к числу опирающихся на них ведущих, опорных и направляющих колес меньше двух (рис. 1.11.а). В этом случае звенья между опорными катками почти не прогибаются и обеспечивают равномерное давление на грунт, как под катком, так и между ними [37, 47, 107].

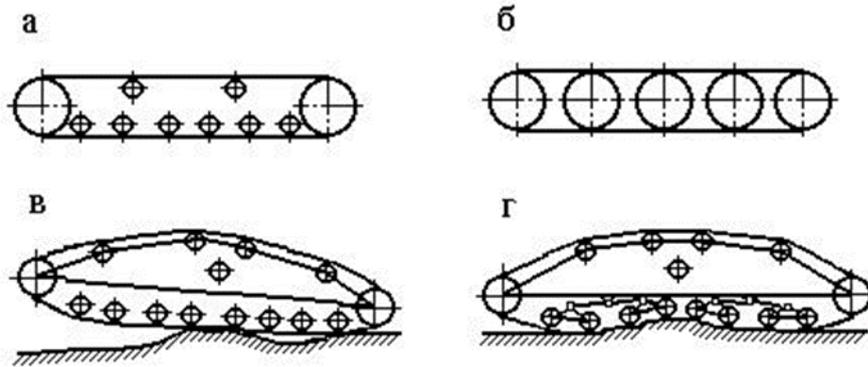


Рис. 1.11. Типы гусениц

а, в, г – многоопорные; б – малоопорная; а, б, в – жесткие; г – мягкая

У малоопорной гусеницы (рис. 1.11, б) это отношение больше двух: звенья легко прогибаются между катками, сгибаясь в шарнирах и образуя волнистую линию [47, 107]. При этом создается значительная разница между давлением под катками и между ними. На слабых породах малоопорная гусеница в большей степени погружается в почву, чем многоопорная, однако лучше переносит сосредоточенные нагрузки, возникающие при работе экскаватора на скальных породах, так как имеет более прочные большие катки [37]. Малоопорные гусеницы обычно снабжаются 4–5 катками большого диаметра, многоопорные – 6–8 катками небольшого диаметра [37, 47].

Показанные на схемах (рис. 1.11, в) гусеницы имеют жесткое крепление опорных катков к ходовой раме, в силу чего они плохо приспособляются к неровностям почвы [37, 107]. Для устранения этого недостатка применяют устройства, позволяющие гусеничной цепи деформироваться в вертикальном направлении (рис. 1.11, г) [37]. В этом случае опорные катки объединяют в балансирные тележки, шарнирно соединенные с ходовой рамой [47, 107].

Основные элементы гусеничного хода экскаватора: гусеницы (соединенные пальцами траки), поддерживающие и опорные катки, ведущее колесо. Ходовая тележка служит опорной конструкцией для всей вращающейся части экскаватора и состоит из нижней рамы сварной конструкции, механизмов индивидуального привода гусениц, зубчатого венца с роликовым кругом. Ходовая тележка предназначена для повышения устойчивости поворотной платформы и уменьшения трудоемкости технического обслуживания гусеничного хода.

## 1.2. Основные характеристики технического состояния ходового оборудования экскаватора

К основным характеристикам технического состояния ходового оборудования экскаватора относятся: натяжение гусеничных цепей, механические повреждения зубьев, износ траков и пальцев, зазоры в подшипниковых узлах, износ и состояние направляющих колес, опорных и поддерживающих катков, неправильная настройка натяжения гусениц, неправильно подобранная ширина гусениц, трещины на корпусе ходовой тележки; трещины гусеничных рам в районе натяжных окон, трещины на спицах больших опорных колес, износ кулаков ведущих колес, поломка звездочек, деформация катков [18, 50, 61, 80, 88].

Эффективность использования оборудования по критерию его работоспособности на большинстве горнодобывающих предприятий оценивается коэффициентом технической готовности  $K_{ТГ}$  [111, 113]. Коэффициент технической готовности показывает процент времени технически готового к эксплуатации оборудования в определенном периоде времени [120]. Коэффициент технической готовности определяется как отношение разности календарного фонда времени и фактического времени ремонтных простоев к календарному фонду времени оцениваемого периода [113]:

$$K_{ТГ} = \frac{T_{КФВ} - T_{Ф.РЕМ}}{T_{КФВ}}, \quad (1.1)$$

где  $K_{ТГ}$  — коэффициент технической готовности,  $T_{КФВ}$  — календарный фонд времени;  $T_{Ф.РЕМ}$  — фактическое время простоев экскаватора на ремонтах и в ожидании ремонтов [111, 113].

Периодический расчет коэффициента технической готовности и сопоставления его значения со временными промежутками исправного состояния и причинами выхода техники из строя позволяет прогнозировать и планировать постановку их на техническое обслуживание и ремонт [111]. Каждая деталь имеет срок службы, который прогнозируется с определённой точностью. Анализируя статистику поломок каждой единицы, можно заранее спрогнозировать необходимость заказа запасных частей, спланировать проведение ремонтных работ в периоды наименьшей загрузки. Плановая постановка на ремонт и техническое обслуживание

исключает внеплановые простои карьерной техники, которые влияют на плановую добычу руды в забое [2, 34].

### **1.3. Обзор и анализ проведенных исследований по техническому состоянию карьерных экскаваторов**

Изучению, исследованию и проведению анализа состояния металлоконструкций карьерных экскаваторов посвящены работы таких ученых как: Л. И. Андреева, А. П. Богданов, А. Ю. Болотнев, А. А. Гайнуллин, В. Н. Геращенко, С. Ю. Дрыгин, А. А. Ефимов, А. Б. Катанов, Е. Г. Кузин, Р. В. Левкович, Е. Б. Ломакин, Д. Е. Махно, Е. Е. Милосердов, Д. С. Наумов, К. Ю. Окулов, М. В. Павлов, В. Б. Перлин, В. Ю. Сергеев, А. А. Синяков, А. А. Томашевский, А. В. Шовкопляс. В этих работах рассмотрены либо в целом металлоконструкции карьерного экскаватора, либо их отдельные элементы. В основном авторы рассматривают рабочее оборудование экскаватора.

В своей диссертации [40] С. Ю. Дрыгин занимался созданием системы технического обслуживания и ремонта одноковшовых экскаваторов по фактическому техническому состоянию электромеханического оборудования [96]. В работе автор определяет признаки дефектов и прогнозирует их развитие по параметрам вибрации. Данные для диссертационного исследования автором получены при вибродиагностических обследованиях экскаваторного парка Кузбасса. Для оценки технического состояния и прогнозирования ресурса оборудования экскаватора С. Ю. Дрыгин предлагает систему мониторинга и диагностики, которая была успешно внедрена на ЗАО «Черниговец». В результате использования системы сократилось количество отказов и продолжительность простоев во внеплановых аварийных ремонтах на 20 % [41].

В диссертации [75] Е. Е. Милосердов разрабатывал методику оценки технического диагностирования основных узлов и металлоконструкций роторного экскаватора для повышения эффективности эксплуатации и продления срока эксплуатации, а также для снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций. Для этого автор проводит анализ проблем эксплуатации и надежности, исследует

внешние факторы, влияющие на работоспособность, разрабатывает модели процесса экскавации и передвижения, строит основные зависимости получаемых нагрузок, исследует диагностические параметры и характеристики технического состояния основных механизмов. В результате была разработана методика оценки технического состояния основных механизмов с истекшим сроком службы и внедрена в виде комплекса работ по контролю и диагностики роторного экскаватора на Березовском разрезе.

В диссертации [95] В. Ю. Сергеев разрабатывал технологию фирменного обслуживания карьерных экскаваторов, основанную на диагностике технического состояния узлов и металлоконструкций вибрационным и тепловым методами неразрушающего контроля для обеспечения гарантированного коэффициента технической готовности оборудования. Применение вибродиагностического метода позволило оценить техническое состояние вибрирующего элемента по частоте, а степень развития дефекта по амплитуде. Применение теплового метода показало тепловые картины изменения состояния подшипников, продемонстрировав динамику развития его дефектов. Результатом работы стала реализация специализированного диагностического центра в рамках предприятия ЗАО «Тяжмашсервис». При проведении ежемесячного обследования с применением методов неразрушающего контроля можно предупредить и выявить места развития дефектов и трещин в металлоконструкциях экскаватора [96].

В статьях [32, 33] проведен анализ состояния парка экскаваторной техники и подробно рассмотрены основные дефекты металлоконструкций карьерных экскаваторов на примере ЭКГ-10. Для исследований были выбраны машины с истекшим нормативным сроком эксплуатации, в результате проведения экспертизы промышленной безопасности, были выявлены 14 карьерных экскаваторов для наблюдения динамики развития дефектов. По результатам был сделан вывод, что 35 % занимают отказы металлоконструкций. Основным интерес исследования представляет информация по дефектам ходового механизма. У всех выбранных экскаваторов наблюдался износ кулаков ведущих колес, у половины машин были выявлены дефекты опорных колес. У двух ЭКГ были обнаружены трещины гусеничных рам в

районе натяжных окон, и у одного экскаватора были трещины на корпусе ходовой тележки [32, 33]. В результате проведенного исследования сделаны выводы и даны рекомендации для поддержания технического состояния карьерных экскаваторов, по уменьшению трещинообразования металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 [32, 33]. Одной из наиболее важных рекомендаций является необходимость «корректировать ремонтные нормативы для каждого отдельного экскаватора с учетом его технического состояния (определение оптимального количества плановых обслуживаний «по фактическому состоянию»)» [32, 33].

В своей статье [114] А. В. Шовкопляс рассматривает факторы, влияющие на изнашивание деталей гусеничного хода. Автор акцентирует внимание на внешних воздействиях, таких как нагрузка и трение, а также подчеркивает, что одной из главных причин потери работоспособности является абразивное изнашивание. Наблюдения за появлением износа на поверхностях основных сочленений деталей гусеничных ходовых устройств показали, что в определенных пределах изменения факторов, вид изнашивания сохраняется, а его значение изменяется пропорционально [114]. Автор сделал вывод, что изнашивание деталей гусеничного ходового оборудования экскаватора в основном происходит при разработке грунта, когда на поверхности трения деталей действует нагрузка, носящая циклический характер, а поверхности трения совершают возвратно поступательные перемещения [114].

Активно вопросами оптимизации системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) занимается Л. И. Андреева. В своих работах она рассматривает факторы повышения эффективности технической эксплуатации оборудования, и приводит обоснования для эффективного функционирования системы ТОиР [6, 7, 8]. Одним из вариантов является применение методов мониторинга технического обслуживания, в частности проведение диагностических обследований и, как следствие, планирование проведения ремонтных работ. Применение вибродиагностического метода позволяет исследовать элементы горных машин с вращающимися частями и оперативно выявлять возможные дефекты. Также эффективным является тепловизионный метод, на основании термограмм которого были обнаружены развивающиеся и критические дефекты. Выбор оптимальной стратегии ТОиР

сводится к обеспечению минимальных затрат при ремонте и простоях техники. Тем самым, Л. И. Андреева обосновывает необходимость планирования планово-предупредительного ремонта для подготовки необходимых ресурсов. Кроме того, подход к ТОиР должен быть индивидуальным к каждой машине и зависеть от параметров машин, условий эксплуатации, времени и интенсивности использования.

В некоторых статьях рассматриваются вопросы повышения надежности использования карьерных экскаваторов в условиях Севера. В этих работах авторы предлагают свои варианты совершенствования системы технического обслуживания и ремонта для повышения надежности и эффективности работы карьерных экскаваторов в условиях Севера. Авторы таких работ: А. Н. Авдеев, А. Ю. Болотнев, Д. Е. Махно, А. И. Шадрин, Е. И. Унагаев. Например, в статьях [1, 73] авторы приводят результаты исследования экскаватора, который эксплуатируется в условиях региона с холодным климатом. Авторы приходят к выводу, что наиболее чувствительно к неблагоприятным воздействиям климата рабочее оборудование (стрела, рукоять и ковш) экскаватора. Причина возникновения трещин заключается в том, что машина работает длительное время в условиях низких отрицательных температур при высоком уровне динамических нагрузок, которые вызывают критическую концентрацию напряжений в металле. Авторы применяют метод конечных элементов для моделирования различных условий работы, а также анализируют напряженно-деформированное состояние конструкции под переменным силовым и температурным воздействием. Было выявлено, что ремонт не всегда благоприятно влияет на конструкцию машины, тем самым, изменяя структуру конструкции, а характер распределения напряжений приводит к возникновению и развитию хрупких трещин. Используя такой метод, авторы сделали вывод, что он дает возможность обоснованно подходить к разработке технологии восстановления и ремонта базовых узлов карьерных экскаваторов снижая критические напряжения.

В нескольких диссертациях рассматриваются вопросы повышения надежности использования карьерных экскаваторов в условиях Севера. Авторы рассматривают данную проблему предлагая свои варианты ее решения. Например, в диссертации [16] А. Ю. Болотнев ставил перед собой такие задачи как: анализ причин

разрушений узлов металлоконструкций, выявление типовых отказов, влияние природно-климатических факторов, вызывающие изменение и оказывающие существенное воздействие на техническое состояние карьерного экскаватора [68]. В результате автор разработал методику оценки опасного роста, интенсивности напряжений и динамических нагрузок по сечениям базовых узлов машины, а также рекомендации и требования по выполнению технических мероприятий по защите металлоконструкций от хрупких разрушений в результате воздействия низких температур [83]. Для достижения результатов работы автор использует программный комплекс MSC для проведения расчетов, визуализации и обработки результатов напряженно-деформированного состояния базовых узлов металлоконструкция карьерного экскаватора [83].

В своей диссертации М. В. Павлов рассматривает повышение надежности карьерных экскаваторов, работающих в условиях Севера, путем снижения вероятности возникновения хрупких разрушений узлов и деталей металлоконструкций машин [83]. Он разработал математическую модель, определяющую предельные значения нагрузок, возникающих в металлоконструкциях экскаватора, в местах наиболее подверженных хрупким разрушениям. Такая модель позволяет исследовать загрузку приводов в зависимости от условий работы машины с учетом предельных значений динамических нагрузок [83]. Также в результате проведенного исследования был разработан алгоритм регулирования уровня загрузки приводов в зависимости от опасности воздействия температур. Его разработки могут быть применены на экскаваторах, работающих в условиях низких температур.

Также вопросом совершенствования системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) для повышения надежности карьерных экскаваторов в условиях Севера занимался А. А. Синяков. В своей диссертации [97] он поставил задачи разработать и обосновать комплекс мероприятий, направленных на совершенствование системы ТОиР, повышение коэффициента технического использования карьерных экскаваторов, а также разработать конструктивно-технические решения, которые могли бы снизить трудоемкость и затраты времени на ремонт отдельных узлов [97]. Особое внимание автор уделил проблеме намерзания горной массы на

элементы конструкции карьерного экскаватора, так как это приводит к возрастанию неплановых простоев карьерных экскаваторов. Для этого автор разработал модель процесса термоконтактного нагрева для тепловой очистки металлоконструкций. Предложенные автором разработки были внедрены в ОАО ХК «Якутуголь», в том числе комплекс мероприятий по повышению долговечности и ремонтной технологичности [97].

В статье [72] авторы поднимают проблему хладостойкости конструкции карьерных экскаваторов, работающих в регионах холодного климата. Авторы пришли к выводу, что регулирование режима загрузки приводов в периоды низких температур является основной защитой экскаватора от хрупких разрушений, поскольку причиной отказов являются динамические нагрузки. Также на хладостойкость элементов конструкции машины оказывает влияние форма конструкций наиболее ответственных узлов [71]. Это может быть достигнуто моделированием нагрузок методом конечных элементов.

Также, вопросами, связанными с ходовым оборудованием, занимается В. Н. Геращенко. В статьях [19, 20, 21] он рассматривает различные конструктивные исполнения гусеничного ходового оборудования и предлагает направления для конструктивного изменения узлов гусеничной тележки экскаватора, повышающие эффективность его работы. Его основные выводы заключаются в следующем: 1) механизмы натяжения гусеничных лент должны быть компактными с применением в качестве доминирующих элементов стандартных тарельчатых пружин; 2) особое внимание необходимо уделить смазке опорных и поддерживающих катков; 3) в ходовом оборудовании выгодно применять гусеничные ленты тракторного типа. Эти особенности конструкции ходового оборудования позволяют устранить недостатки, характерные для традиционных ходовых устройств, что позволит увеличить срок службы, надежность, способность выдерживать низкие температуры, обеспечивая эффективную защиту от проникновения пыли, грязи грунта в местах посадок [22, 23].

Различные аспекты исследовательской области, связанные с темой диссертационного исследования по оценке напряженно-деформированного состояния

металлоконструкций ходового оборудования карьерного экскаватора, раскрыты в литературе в недостаточной степени.

Материалы зарубежных авторов не являются исключением, к тому же многие из них написаны на английском языке авторами, не являющимися носителями этого языка. Поиск источников в доступных базах данных, размещенных в сети Интернет, позволяет выявить некоторое количество ресурсов, в основном затрагивающих область автоматизации и функционирования экскаватора [119, 123, 125, 127, 134, 136, 141], а также рабочему оборудованию экскаваторов [118, 124, 131, 137]. В этих статьях большое внимание уделяется анализу функционирования экскаваторов и их отдельных компонентов, что позволяет, с одной стороны, использовать имеющиеся наработки для реализации смежных целей, с другой – определить перспективные направления применения предполагаемых результатов исследований в рамках диссертационной работы и возможные пути их дальнейшего развития.

Однако вопросам изучения повышения функционирования ходового оборудования отводится лишь малая часть всех материалов по экскаваторам. Недостаточность раскрытия этой темы в зарубежных источниках доказывает актуальность поставленной проблемы.

В одной из зарубежных статей [142], авторы предлагают новый подход к оценке динамической нагрузки гусеничного ходового оборудования. В результате исследований были установлены критерии сходства между моделью транспортного средства и прототипом транспортного средства на основе конструктивных, эксплуатационных и контактных параметров гусеничного ходового оборудования. Были созданы имитационные модели жесткого и гибкого сцепления модельного транспортного средства и прототипа транспортного средства, соответственно. Точность имитационной модели модельного транспортного средства была проверена экспериментально, с помощью системы тестирования и анализа динамических сигналов DH5902N для сбора данных о виброускорении в реальном времени и системы DH5905N для сбора данных измерений механических напряжений, полученных в ходе эксперимента с модельным транспортным средством, что позволило получить

параметры контакта гусеницы с грунтом. Связи между моделью транспортного средства и прототипом транспортного средства были установлены на основе теории подобия. Это исследование помогает снизить стоимость испытаний и обеспечивает теоретическую основу для предварительных исследований техники. А полученные результаты, описанные в статье, показывают, что теория подобия применима для предварительного исследования гусеничной системы передвижения.

В статье [122], авторы предлагают гибридный подход для выявления неисправностей подшипников качения при переменной скорости в нестационарных условиях как с моделируемыми, так и с экспериментальными сигналами. Авторы утверждают, что предложенный метод эффективен как для смоделированных, так и для реально измеренных сигналов.

А в статье [130], авторы предоставляют серию процедур проверки надежности для обеспечения долговечности узла пружины растяжения 20-тонного экскаватора, которая поддерживает гусеницу ходовой части экскаватора. Авторами статьи объяснен весь процесс проверки узла на долговечность, включая полевые испытания при эквивалентной нагрузке, а также предлагаемый код испытаний, численное моделирование и испытания на долговечность. В результате проведенных исследований предложена модифицированная конструкция пружины растяжения, позволяющая снизить контактное усилие и повысить долговечность сборки.

#### **1.4. Методы регистрации и контроля деформаций и нагрузок, действующих на конструкцию ходового оборудования**

Для исследования надежности ходового оборудования карьерных экскаваторов используются различные методы контроля и диагностики [68, 59, 87]. Самоходная выемочно-погрузочная техника, работающая в карьерных условиях, такая как механическая лопата, включает в себя комплекс взаимозависимых друг от друга частей различной функциональности. Все они разнообразны по структуре, надежности, износу и сроку эксплуатации. Исправная работа этого устройства зависит от их согласованности и технического состояния. Именно поэтому крайне важно понимать, какой технический элемент в карьерном экскаваторе может выйти из строя в

первую очередь. Для этого необходим правильный выбор методологии диагностирования всех деталей механизма [59, 65].

Регистрация и контроль деформаций и нагрузок, действующих на конструкцию ходового оборудования, осуществляется с применением разных методов диагностирования металлоконструкций, таких как тензометрический, вибродиагностический, тепловизионный и метод твердометрии. Применение этих методов соответствует этапам технического обслуживания и ремонта ходового оборудования карьерных экскаваторов [59, 68].

*Тензометрирование* является одним из основных экспериментальных методов исследования напряженно-деформированного состояния при изучении поведения натуральных объектов в период пуска наладочных и эксплуатационных работ, а также исследования в лабораторных условиях напряженного состояния конструкций на моделях на стадии проектирования [59]. Применение тензометрического метода исследований позволяет определить механическое напряжение детали или конструкции для прогнозирования развития дефектов и дальнейшего планирования ремонтных работ [68]. Например, в статье [78] рассмотрены факторы, влияющие на скорость развития трещин в металлоконструкциях экскаватора и предложена методика, которая позволяет предсказывать время роста трещин. При применении тензометрического метода исследования для оценки долговечности металлоконструкции экскаватора ЭКГ-10 сделаны выводы о том, что разные категории блочности породы по-своему влияют на скачки напряжений, таким образом, установлены зависимости изменения числа циклов нагружения от гранулометрического состава взорванных пород. Применяя такие зависимости, можно создавать гистограммы нагружения исследуемого элемента конструкций, которые позволяют рассчитывать продолжительность роста трещины, что способствует прогнозированию развития трещин в металлоконструкциях, а соответственно, дает возможность предотвращать возможные аварии экскаватора.

Одним из эффективных способов диагностики карьерного экскаватора является *вибродиагностика* – метод неразрушающего контроля, основанный на измерении и анализе параметров вибраций, демонстрирующий высокую эффективность

диагностики машин и механизмов. Вибродиагностика широко используется учеными для обнаружения дефектов и неисправностей разных узлов и механизмов карьерных экскаваторов.

В работах И. Л. Абрамова, Б. Л. Герике, П. Б. Герике, [24, 26, 27, 101] применен и описан метод вибродиагностики для оценки состояния подшипников качения электромеханического оборудования карьерных экскаваторов. Рассмотрена проблема выхода подшипников из строя, что напрямую влияет на ресурс приводов карьерных экскаваторов [2]. Применение этого метода может быть полезным при проведении обследования первичных замеров механических колебаний на пике их мощности и определении параметров последующих регистраций механических колебаний в течении всего рабочего цикла. В результате проведенных испытаний получены графики, на которых заметно изменение уровня вибрации, которое могло быть вызвано смещением подшипникового узла на валу генератора. Осмотр демонтированного подшипника подтвердил наличие дефектов в узле. В результате проведенного исследования доказана эффективность применения метода для идентификации зарождающихся дефектов подшипниковых узлов.

В статье М. Ю. Дрыгина [38] рассмотрен вопрос качества применения метода, осложненного необходимостью диагностировать по параметрам, которые являются частью комплекса факторов, и отсутствием полной информации о кинематической схеме механизма. Проведены исследования и изучены возможные дефекты, связанные с вибрационными процессами, решена проблема наложения частот разных агрегатов, которые могут влиять на качество снимаемой амплитудно-частотной характеристики параметров, в результате чего обозначены условия для качественного проведения контроля и диагностики узлов и механизмов при использовании вибродиагностического метода исследования [39].

Еще одним методом для диагностики, выявления дефектов и устранения неисправностей является определение и контроль температуры – *тепловизионный метод*. Диагностика может проводиться с использованием пирометра, тепловизора, терморезисторов или термопары. Тепловизионная диагностика выполняется в процессе эксплуатации без отключения машины и временной приостановки работы.

Тепловизор может быть использован для решения актуальных задач диагностики, мониторинга и неразрушающего контроля металлоконструкций [59]. Он позволяет выявлять дефекты на ранней стадии зарождения, прогнозировать сроки и объем ремонтных работ. Применение тепловизора сокращает затраты на техническое обслуживание, повышает надежность и безопасность эксплуатации сложного оборудования. Пирометр применяют для дистанционного бесконтактного измерения температуры различных поверхностей. Прибор хорошо подходит для тех случаев, когда объект находится на расстоянии или доступ к нему затруднен. Дистанционные измерения являются единственным способом определения температуры сильно нагретых участков, физический контакт с которыми создает угрозу для оператора.

Использование терморезисторов – контактный метод, который основан на резисторах, изменяющих свое сопротивление в зависимости от температуры. Применение этого метода для мониторинга узлов экскаватора описывают И. Д. Богомолов и М. Ю. Дрыгин [15]. По результатам исследования сформирована и описана система контроля подшипниковых узлов и электрических систем. Используемая сеть качественно работает в условиях высоких электромагнитных помех, вибрации и перепада температур. Надежная система контроля и диагностики может позволить снизить аварийность машины.

Метод *твердометрии* является ключевым инструментом для оценки твердости элементов металлоконструкций, обеспечивая надежные данные о механических свойствах материалов. Этот метод основывается на измерении сопротивления материала к вдавливанию твердого тела, что позволяет определить его твердость с высокой точностью. В современных условиях, когда требования к качеству и надежности конструкций возрастают, твердометрия становится особенно актуальной.

Применение данных методов соответствует этапам технического обслуживания и ремонт рабочего оборудования. Для одноковшовых экскаваторов предусмотрены следующие виды технических обслуживаний: ежесменное (ЕО), еженедельное (НО), ежемесячное (МО) и сезонное (30) [47].

*Ежесменное техническое обслуживание* производится между сменами при приеме и сдаче экскаватора [47, 59].

*Еженедельное техническое обслуживание* осуществляется один раз в неделю, во время перерывов в работе, вызванных отсутствием транспорта, электроэнергии, неподготовленностью забоя, передвижкой путей и т. п. При интенсивной работе для осмотра экскаваторов должно выделяться особое время [47].

*Ежемесячное техническое обслуживание* проводится раз в месяц по графику. В объем этого обслуживания входят все работы еженедельного технического обслуживания, а также работы по устранению неисправностей путем замены или восстановления деталей [47].

*Сезонное обслуживание* проводится для подготовки машин к эксплуатации в весенне-летний и осенне-зимний периоды и включает замену смазочных масел на зимние сорта, утепление машин и комплекс мероприятий по ограничению нагрузок при работе в зимний период [47, 59].

Техническое обслуживание включает: наружное обслуживание механизмов; осмотр и проверку состояния узлов экскаватора; подтягивание креплений; замену или восстановление отдельных изношенных частей; регулировку механизмов; смазку механизмов; периодические работы по проверке обеспечения мер безопасности (срабатывание блокировок и ограничителей, контроль сопротивления изоляции, наличие и заправка огнетушителей, работа освещения и тормозов) [47, 59].

## **1.5. Постановка задач исследований**

На основании анализа теоретических и экспериментальных исследований в области надежности технического состояния карьерных экскаваторов, установлено, что большое количество работ посвящено анализу состояния либо в целом металлоконструкций, либо отдельных элементов экскаватора, при этом многие авторы рассматривают рабочее оборудование экскаватора.

Статистика отказов показывает, что на работоспособность карьерных экскаваторов оказывают влияние внеплановые простои, 37 % которых возникают из-за проблем с обслуживанием гусеничного ходового оборудования [68]. В случае

внеплановых простоев затраты на восстановление составляют в среднем 3000 руб./ч в зависимости от конструктивных элементов, подлежащих ремонту.

Так как различные аспекты исследовательской области по оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций ходового оборудования, раскрыты в литературе в недостаточной степени, то возникает необходимость оценить функционирование механизмов хода карьерного экскаватора.

Для исследования надежности карьерных экскаваторов применяются различные методы контроля и диагностики, позволяющие на ранней стадии регистрировать и контролировать деформации и нагрузки, действующие на металлоконструкции и оборудование [59, 65]. К таким методам относятся: тензометрический метод, метод магнитной памяти металла, вибродиагностический метод, тепловизионный и ультразвуковой методы. Применяя эти методы для оценки технического состояния гусеничного хода карьерного экскаватора, можно скорректировать этапы технического обслуживания и ремонта, что повысит надежность и эффективность работы экскаватора, а именно снизит затраты на ремонт и уменьшит время простоев карьерных экскаваторов.

Цель исследования – повышение эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора за счет снижения затрат на поддержание его работоспособного состояния.

Для достижения поставленной в работе цели, необходимо решение следующих задач:

- проанализировать случаи возникновения износа элементов ходового оборудования карьерных экскаваторов типа ЭКГ;
- исследовать влияние факторов, оказывающих существенное воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерных экскаваторов;
- определить количество натуральных экспериментов, необходимых для оценки напряженно-деформированного состояния элементов ходового оборудования;

- провести экспериментальные исследования по выявлению внешних и внутренних факторов возникновения напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции ходового оборудования карьерных экскаваторов;
- разработать конструкцию ведущего колеса на основе действия рабочих нагрузок и напряженно-деформированного состояния в металле, выбрать рациональный материал;
- разработать ремонтный цикл обслуживания ходового оборудования с включением диагностических методов исследования в промежутках между выполнением плановых ремонтов.

## 2. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью экспериментальных исследований является выявление закономерностей возникновения напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции ходового оборудования карьерных экскаваторов, и внедрение методов диагностирования в систему технического обслуживания и ремонта ходового оборудования, основываясь на тензометрическом методе исследования [49]. В связи с этим необходимо определить методику проведения активного эксперимента.

Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью [64, 79].

При проведении активного эксперимента информацию об исследуемом объекте – ходовое оборудование карьерного экскаватора мы получаем с применением искусственного воздействия. В этом случае исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций будет осуществляться в режимах, которые позволяют реализовать максимальные усилия на выходных звеньях карьерного экскаватора. Таким образом, будет происходить фиксация деформаций, которые возникают в момент реализации максимальных усилий в характерных силовых точках [51, 68].

Основной задачей планирования эксперимента является установление основных влияющих факторов, характеризующих количество отказов ходового оборудования.

Непосредственному планированию эксперимента предшествует анализ причин, оказывающих существенное воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерного экскаватора [9, 68].

### **1.2. Определение факторов, оказывающих воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерного экскаватора**

Согласно исследованиям отказы элементов ходового оборудования (рама гусеничной цепи, направляющие колеса, гусеничная цепь) составляют 37 %. В процессе эксплуатации под действием различных взаимосвязанных природно-

технических факторов непрерывно ухудшается техническое состояние оборудования. На отказы элементов гусеничного оборудования влияет: неправильная эксплуатация, неправильная регулировка, засорение грязью, перепады температуры, износ [68].

Факторы, вызывающие изменение и оказывающие существенное воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерного экскаватора (появление усталостных трещин и разрушение конструкций) могут быть разделены на следующие группы [45, 10, 11, 68]:

- эксплуатационные факторы,
- конструктивные факторы,
- функциональные факторы,
- технические факторы,
- эргономические факторы.

К эксплуатационным факторам относятся:

- горно-геологические условия (физико-механические свойства разрабатываемых горных пород, качество подготовки забоя и горной массы, факторы природно-техногенного воздействия и климатические условия – атмосферные осадки, высокие и низкие температуры, солнечная радиация) [18];

- воздействие газов, запыленность воздуха;
- биологическая среда – плесень, микроорганизмы, насекомые [2];
- стратегии технического обслуживания и ремонта, оказывающие значительное влияние на работоспособность карьерных экскаваторов и на остаточный ресурс [68].

Конструктивными факторами, влияющими на надежность и долговечность экскаватора в целом и его элементов, в частности, являются [68, 100]:

- форма и параметры деталей, от которых зависят удельные давления на их поверхности, концентрация напряжений, ударная и усталостная прочность металла;

- жесткость конструкции, т. е. способность деталей, особенно базовых и основных, незначительно деформироваться под воздействием воспринимаемых ими эксплуатационных нагрузок;
- точность взаимного расположения поверхностей и осей совместно работающих деталей;
- правильный выбор посадок, обеспечивающих надежную работу подвижных и неподвижных сопряжений.

Важнейшими функциональными факторами, определяющими его работоспособность, являются состояние гидравлической системы, качество трансмиссии и механических узлов, а также уровень износа тормозных систем. Гидравлическая система, обеспечивая передачу усилий, должна функционировать без утечек и с минимальным сопротивлением. Узлы трансмиссии, включая редукторы и цепи, требуют регулярной проверки на наличие повреждений и признаков износа, так как от них зависит скорость и маневренность экскаватора.

Также важным аспектом является профилактика и диагностика. Например, изношенные подшипники или нарушения в работе систем смазки могут привести к серьезным авариям. Регулярное техническое обслуживание, основанное на анализе имеющихся функциональных факторов, позволит значительно продлить срок службы ходового оборудования карьерного экскаватора типа «механическая лопата» и обеспечить его стабильную работу в условиях открытых горных работ.

Технические факторы – факторы, которые зависят от структуры карьерного экскаватора типа «механическая лопата» и его рабочих режимов, применения резервирования, организации контроля и восстановления после отказа, характеристик комплектующих элементов, защищенности элементов от неблагоприятных факторов, качества технологических процессов при изготовлении, степени приспособленности для эксплуатации [68].

Эргономические факторы – это факторы в системе «человек-машина-человек», к которым можно отнести управление экскаватором и организацию ведения экскавационных работ [43].

## 2.2. Планирование многофакторного эксперимента для исследования надежности ходового оборудования карьерного экскаватора

При планировании эксперимента для изучения технического объекта (в нашем случае это ходовое оборудование карьерного экскаватора типа «механическая лопата») предлагается использовать метод «черного ящика» [64]. Функциональная структура объекта рассматривается как «черный ящик». Главным в исследовании становится построение математической зависимости выходного параметра или параметров от значения варьируемых переменных или факторов по результатам эксперимента [Математическая теория планирования эксперимента [42, 64, 70].

План эксперимента определяет расположение экспериментальных точек в  $k$ -мерном факторном пространстве.

Обычно план задается в виде матрицы планирования, каждая строка которой определяет условия опыта, а каждый столбец значения контролируемых и управляемых параметров в исследуемом процессе, то есть значение факторов, соответствующих условию эксперимента [42].

Исзуемая система обычно представляется в виде схемы проведения традиционного эксперимента (рис. 2.1).

На рисунке 2.1 представлена система, о внутренней организации которой нет сведений, но существует возможность воздействовать на ее входы, и воспринимать воздействия ее выходов. На объект исследования влияет три группы факторов, в результате действия которых, находится некоторый выходной параметр – отклик – это результат, являющийся прогнозируемым вследствие проведения эксперимента [98].

Первая группа предикторов — это факторы  $N$  – управляемые параметры. При проведении активного эксперимента планируется рассматривать совместное действие пяти факторов [66]:

$N_1$  – фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя ( $d = 5 \dots 150$  мм) по толщине,

$N_2$  – коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя (для хризотил-асбеста  $f = 8 \dots 16$ ),

$N_3$  – скорость движения экскаватора ( $v = 0,1 \dots 0,19$  м/с),

$N_4$  – уклон рабочей площадки карьерного экскаватора ( $\alpha = 1 \dots 12^\circ$ ),

$N_5$  – коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора ( $K_y = 0,61 \dots 0,98$ ) [18, 48, 112].

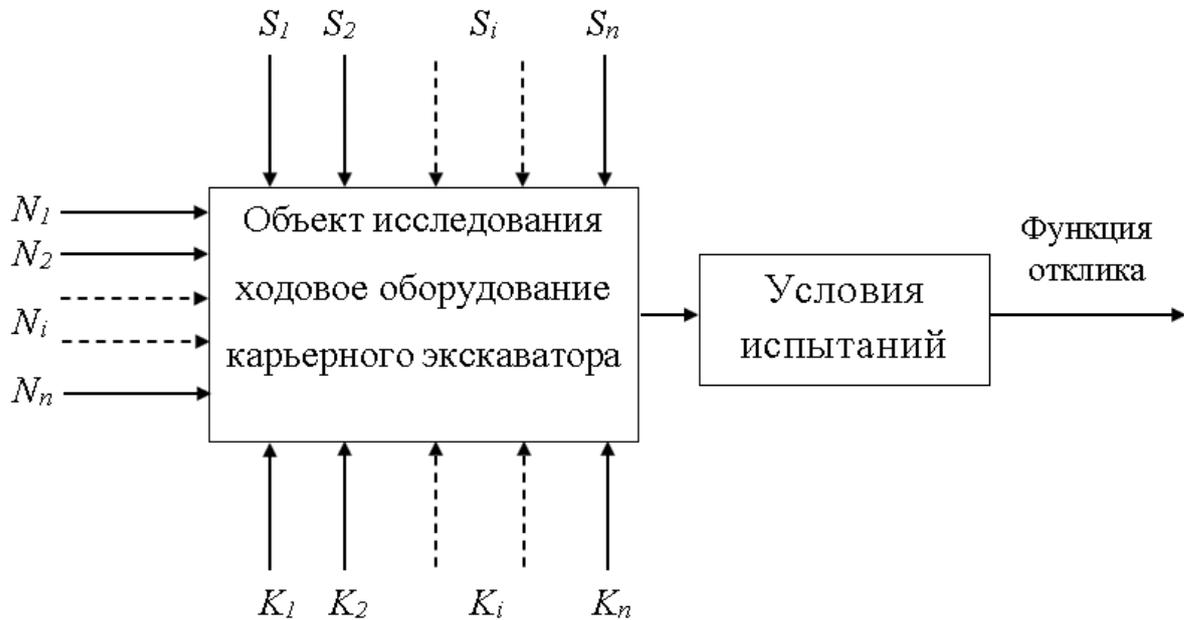


Рис. 2.1. Схема проведения активного эксперимента

Факторы  $N$  соответствуют следующим требованиям: факторы управляемы, они непосредственно действуют на ходовое оборудование карьерного экскаватора, являются совместимыми, поскольку комбинации уровней факторов могут быть осуществимы и при этом будут безопасны, а также факторы являются независимыми, так как позволяют устанавливать требуемый уровень любого фактора независимо от уровня другого фактора [53, 93].

Вторая группа факторов – это факторы  $K$  – контролируемые, но не управляемые параметры, характеризующие состояние функции отклика на операциях, предшествующих исследуемым испытаниям. К этим факторам можно отнести качество подготовки забоя (грансостав взорванного массива, когда содержание негабаритных кусков в отдельных случаях достигает 45 %; снижает ресурс узлов и агрегатов экскаватора). Возникающий сложный динамический характер нагружения в этом случае обуславливает значительные напряжения в элементах механизмов и конструкций карьерных механических лопат. Это приводит к увеличению количества

отказов и, как следствие, к увеличению продолжительности, трудоемкости и стоимости unplanned ремонтов [53, 93].

Третья группа факторов – это факторы  $S$  – неконтролируемые и неуправляемые входные параметры. Такие параметры оказывают случайные возмущающие воздействия на испытания. К этим предикторам можно отнести факторы природно-техногенного воздействия и климатические условия: атмосферные осадки, высокие и низкие температуры, солнечная радиация; воздействие газов, запыленность воздуха; биологическая среда - плесень, микроорганизмы, насекомые [10, 63, 68].

На выходе мы имеем отклик  $O$  – функция выходных параметров, в нашем случае это – напряжение металла в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора. Величина модуля главных напряжений во время силового нагружения металлоконструкций ходового оборудования не должна превышать допустимые значения напряжений металла (ожидаемая максимальная величина модуля главных напряжений 200 МПа). С увеличением напряжений и превышением допустимых значений будут развиваться трещины в металлоконструкциях и увеличиваться количество неисправностей в элементах ходового оборудования (поломка звездочек, искривление направляющих, деформация катков, ослабление натяжения цепей, трещины на корпусе ходовой тележки, износ кулаков ведущих колес, дефекты опорных колес, трещины гусеничных рам в районе натяжных окон, трещины на спицах больших опорных колес и т.д.), количество которых будет непосредственно влиять на число отказов [17, 18].

При исследовании процессов обычно работают с 1-й группой входных параметров ( $N$ ), но при интерпретации результатов также будут влиять другие входные предикторы. Факторы группы  $K$  и  $S$  не учитываются в модели, вследствие их незначительного влияния на объект исследования.

Математической основой теории планирования эксперимента является регрессионный анализ, сущность которого состоит в изучении статистической взаимосвязи между одной зависимой количественной переменной от одной или нескольких независимых количественных переменных [55]. Зависимая переменная в регрессионном анализе называется результирующей, а переменные факторы –

предикторами. Взаимосвязь между средним значением результирующей переменной и средними значениями предикторов, выражается в виде уравнения регрессии [98].

Математическая задача планирования эксперимента состоит в том, чтобы найти уравнение поверхности отклика. Целью многофакторного эксперимента является установление зависимости функции отклика от факторов 1-й группы [42, 98]:

$$O = f(N_1, N_2, \dots, N_n) \quad (2.1)$$

Таким образом, математическое планирование связано с изучением формы поверхности отклика; следовательно, оптимальному значению выхода соответствуют максимальные или минимальные точки этой поверхности [55].

Указанная функция отклика строится в виде полиномов. Для пятифакторного эксперимента уравнение множественной линейной регрессии будет иметь вид:

$$\begin{aligned} O = & b_0 + b_1N_1 + b_2N_2 + b_3N_3 + b_4N_4 + b_5N_5 + b_{12}N_1N_2 + b_{13}N_1N_3 + b_{14}N_1N_4 + \\ & b_{15}N_1N_5 + b_{23}N_2N_3 + b_{24}N_2N_4 + b_{25}N_2N_5 + b_{34}N_3N_4 + b_{35}N_3N_5 + b_{45}N_4N_5 + \\ & b_{123}N_1N_2N_3 + b_{124}N_1N_2N_4 + b_{125}N_1N_2N_5 + b_{134}N_1N_3N_4 + b_{234}N_2N_3N_4 + \\ & b_{135}N_1N_3N_5 + b_{235}N_2N_3N_5 + b_{145}N_1N_4N_5 + b_{245}N_2N_4N_5 + b_{345}N_3N_4N_5 + \\ & b_{1234}N_1N_2N_3N_4 + b_{1235}N_1N_2N_3N_5 + b_{1245}N_1N_2N_4N_5 + b_{1345}N_1N_3N_4N_5 + \\ & b_{2345}N_2N_3N_4N_5 + b_{12345}N_1N_2N_3N_4N_5 \end{aligned}$$

Для полнофакторного эксперимента число натуральных испытаний рассчитывается по формуле [31]:

$$A = 2^r, \quad (2.2)$$

где  $r$  – число факторов.

По этой формуле получается, что для каждой силовой точки расположения преобразователей необходимо провести не менее 32 испытаний. Полученный результат увеличивается в пять раз, чтобы рассмотреть все возможные вариации влияния факторов на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора.

При анализе результатов научных исследований на практике часто имеет место ситуация, когда количественное изменение изучаемой величины (функции

отклика) зависит не от одной величины, а от нескольких величин (факторов) [18, 17, 62].

Для решения применим модель линейной регрессии, с помощью которой можно установить зависимости переменной отклика от нескольких независимых предикторов с линейной функцией зависимости. Одним из базовых методов регрессионного анализа является метод наименьших квадратов [110]. Сущность метода заключается в нахождении таких значений параметров регрессии, при которых сумма квадратов отклонений начальной функции отклика и теоретических параметров, принимает минимальную величину [17, 18]:

$$S = \sum_{i=1}^k [O_i - f(N_i)]^2 \rightarrow \min \quad (2.3)$$

Оценка параметров регрессии:

$$S = \sum (O_i - O_{N_i})^2 = \sum (O - a - b \cdot N)^2 \quad (2.4)$$

Для нахождения экстремума функции нескольких переменных необходимо вычислить частные производные первого порядка по каждому из параметров и приравнять их к нулю [110]:

$$\frac{dS}{da} = -2 \sum O + 2 \cdot n \cdot a + 2 \cdot b \sum N = 0; \quad (2.5)$$

$$\frac{dS}{db} = -2 \sum O \cdot N + 2 \cdot a \sum N + 2 \cdot b \sum N^2 = 0. \quad (2.6)$$

После элементарных преобразований приходим к системе линейных нормальных уравнений для нахождения параметров уравнения линейной множественной регрессии [110]:

$$\begin{cases} n \cdot a + b \sum N = \sum O, \\ a \sum N + b \sum O^2 = \sum O \cdot N \end{cases} \quad (2.7)$$

$$a = \bar{O} - b \cdot \bar{N}, \quad (2.8)$$

$$b = \frac{\overline{O \cdot X} - \bar{O} \cdot \bar{N}}{\sigma^2_N}, \quad \sigma^2_N = \overline{N^2} - (\bar{N})^2 \quad (2.9)$$

Парные зависимости исследования лучше рассматривать с графической интерпретации результатов.

$$\begin{pmatrix} O_1 & N_{11} & N_{21} & N_{31} & \dots & N_{n1} \\ O_2 & N_{12} & N_{22} & N_{32} & \dots & N_{n2} \\ O_3 & N_{13} & N_{23} & N_{33} & \dots & N_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ O_n & N_{1k} & N_{2k} & N_{3k} & \dots & N_{nk} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

При изучении многофакторных зависимостей такая возможность практически исключается из-за ограниченности ощущаемой размерности пространства [17, 18]. Все исследования фактически проводятся в  $n + 1$  – мерном пространстве, где  $n$  – количество влияющих факторов, нашем случае рассматриваем влияние трех факторов, а  $k$  – количество испытаний:

$$O = f(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5) \quad (2.11)$$

где:

- $N_1$  – фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя ( $d = 5 \dots 150$  мм) по толщине,
- $N_2$  – коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя (для хризотил-асбеста  $f = 8 \dots 16$ ),
- $N_3$  – скорость движения экскаватора ( $v = 0,1 \dots 0,19$  м/с),
- $N_4$  – уклон рабочей площадки карьерного экскаватора ( $\alpha = 1 \dots 12^\circ$ ),
- $N_5$  – коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора ( $K_y = 0,61 \dots 0,98$ ) [18, 17, 48, 112],
- $O$  – отклик, функция выходных параметров - напряжение металла в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора величина (ожидаемая максимальная величина модуля главных напряжений 200 МПа).

Соответственно результатами наблюдений является матрица:

$$\begin{pmatrix} 22 & 30 & 8 & 0,11 & 2 & 0,93 \\ 64 & 80 & 10 & 0,13 & 4 & 0,87 \\ 31 & 40 & 9 & 0,11 & 3 & 0,94 \\ O_3 & N_{13} & N_{23} & N_{33} & N_{43} & N_{53} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 108 & 105 & 12 & 0,15 & 7 & 0,68 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Полная матрица данных влияния факторов на отклик для регрессионного анализа представлена в приложении 1.

Для оценки адекватности построенной эмпирической модели факторов, влияющих на напряжения в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора, а также для последующего прогнозирования и управления используют три статистических показателя:  $F$  – статистика Фишера,  $T$  – статистика Стьюдента,  $A$  – средняя относительная ошибка аппроксимации, и результаты анализа остатков [17, 18].

Для проведения анализа множественной регрессии применим программу Statistica. Statistica — программный пакет для статистического анализа, разработанный американской компанией StatSoft Inc., реализующий функции анализа данных, управления данными, добычи данных, визуализации данных с привлечением статистических методов [102]. Результаты проведения анализа представлены в таблицах 2.1 и 2.2, в которых красным цветом выделены статистически значимые значения коэффициентов корреляции на уровне 0,05.

Коэффициент множественной корреляции  $R$ , позволяет описать зависимости между переменными, может принимать значение от 0 до 1 и характеризует тесноту линейной связи между зависимой переменной (отклик) и всеми независимыми переменными (предикторы  $N$ ), и рассчитывается по формуле:

$$R_{O|N_1N_2\dots N_n} = \sqrt{1 - \frac{|R|}{R_{jj}}} \quad (2.13)$$

где  $|R|$  – определитель корреляционной матрицы,  $R_{jj}$  – алгебраическое дополнение  $jj$ -го элемента [94].

Коэффициент множественной корреляции  $R=0,99$  указывает на тесную связь напряжения в металлоконструкциях ходовой тележки карьерного экскаватора со всем комплексом влияющих предикторов.

Результаты множественной регрессии с учетом всех предикторов

Зав.перем.:Напряжение, МПа	Множест. R=0,99303623		F=2188,373	
	R <sup>2</sup> =0,98612096		сс=5,154, p=0,000000	
Число набл.:160	Скоррект.R <sup>2</sup> =0,98567034			
Стандартная ошибка оценки: 4,996252583				
Св.член: -25,84776435	Ст.ошибка: 8,620500	t(154) =-2,998	p=0,0032	
Фракция куска бета=0,074		Коэффициент крепости бета=0,185		
Скорость экскаватора бета=0,108		Уклон площадки бета=0,587		
Коэффициент управления бета=-0,07				

Таблица 2.2

Итоги регрессии для зависимой переменной: Напряжение, МПа

N=160		R=0,99303623 R <sup>2</sup> =0,98612096 Скоррект. R <sup>2</sup> =0,98567034 F(5,154)=2188,4, p<0,0000 Станд. ошибка оценки: 4,9963					
		БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(154)	p-знач.
Св.член				-25,8478	8,62050	-2,99841	0,003165
Фракция куска, мм	N <sub>1</sub>	0,074349	0,027106	0,0844	0,03077	2,74289	0,006813
Коэффициент крепости породы	N <sub>2</sub>	0,184506	0,028345	3,7235	0,57203	6,50923	0,000000
Скорость экскаватора, м/с	N <sub>3</sub>	0,107833	0,021564	182,8938	36,57448	5,00059	0,000002
Уклон площадки, °	N <sub>4</sub>	0,587378	0,036273	10,0908	0,62314	16,19343	0,000000
Коэффициент управления	N <sub>5</sub>	-0,073184	0,018748	-27,5085	7,04696	-3,90360	0,000141

Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) – это квадрат коэффициента множественной корреляции. Чем ближе коэффициент детерминации к единице, тем более тесная связь [106]. Функциональная связь возникает при значении равном 1, а отсутствие связи – 0. При значениях показателей тесноты связи меньше 0,7 величина коэффициента детерминации всегда будет ниже 50 %. Это означает, что на долю вариации факторных признаков приходится меньшая часть по сравнению с остальными неуточненными в модели факторами, влияющими на изменения резульативного показателя [106, 94]. Значение R- квадрат является индикатором степени подгонки модели к данным (значение близкое к 1, показывает, что модель объясняет

почти всю изменчивость соответствующих переменных) и рассчитывается по формуле:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = \frac{\sum(\widehat{O}_i - \bar{O})^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (2.14)$$

где  $ESS$  (Explained Sum of Squares) – объясненная с помощью регрессии сумма квадратов отклонений,  $TSS$  (Total Sum of Squares) – общая сумма квадратов отклонений зависимой переменной от среднего значения.

В построенной модели коэффициент равен  $R^2 = 0,98$ . По шкале Чеддока такая теснота связи соответствует весьма значительной силе связи. Полученная при этих условиях регрессионная модель имеет высокое практическое значение.

Если число независимых переменных равно числу наблюдений, то  $R^2 = 1$ . По мере добавления переменных в уравнение значение коэффициента растет, что ведет к предпочтению моделей с большим числом независимых переменных [106]. Из этого следует, что необходима поправка, которая учитывала бы число переменных и наблюдений. В результате получаем скорректированный коэффициент корреляции – скоррект.  $R^2$ :

$$\widehat{R}_{\text{скорр.}}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (2.15)$$

где  $n$  – число наблюдений,  $p$  – число переменных, вошедших в модель.

Критерий Фишера ( $F$ ) для оценки адекватности регрессионной модели, который определяет отношение дисперсии оценки модели к дисперсии остатка.  $F(5,154)=2188,4$ ,  $p < 0$  – в скобках при критерии Фишера указаны степени свободы 5 – число переменных и 154 – число наблюдений (число наблюдений минус число общих переменных) [106]. Для проверки существенности регрессионной зависимости можно сравнить рассчитанное значение критерия Фишера  $F(5,154)=2188,4$  с табличным значением критерия Фишера  $F(5,154)=2,27$  [106]. Так как фактическое значение критерия Фишера значительно больше табличного, то это свидетельствует о статистической значимости уравнения регрессии, его параметров и показателей тесноты связи в целом с учетом действия всех 5 факторов.

Станд. ошибка оценки – стандартная ошибка оценки, является мерой рассеяния наблюдаемых значений относительно регрессионной прямой.

БЕТА –  $\beta$  коэффициенты стандартизированные коэффициенты уравнения регрессии, которые применяют для сравнения влияния на зависимую переменную факторов, имеющих различную размерность. Так как независимые переменные имеют разные единицы измерения, то и коэффициенты регрессии в уравнении связи имеют разные единицы измерения, что делает их несопоставимыми. Поэтому для сравнительной оценки воздействия каждого независимого предиктора на результативный признак необходимо стандартизировать коэффициенты регрессии [106]. С этой целью все переменные выражают в долях среднеквадратического отклонения [58].

Ст.Ош. БЕТА – стандартизированные отклонения  $\beta$  коэффициентов.

$B$  – коэффициенты уравнения линейной множественной регрессии. Если  $b < 0$  – связь обратная, если  $b > 0$  – связь прямая.

Ст.Ош. $B$  – стандартные отклонения коэффициентов уравнения регрессии.

Критерий  $t$  для проверки гипотезы о равенстве нулю свободного члена уравнения.

В программе Statistica ( $p$ -знач.) введено для проверки нулевой гипотезы вместо табличного значения критерия Фишера приводятся вероятности значимости ( $p$ ) и красным цветом выделяются значимые показатели [106]. В нашем случае  $p$  значительно меньше заданного  $p$ -знач. 0,05, что также подтверждает значимость параметров множественной регрессии [106].

Учитывая вышесказанное, уравнение множественной линейной регрессии, будет иметь вид:

$$O = -25,84 + 0,08 * N_1 + 3,72 * N_2 + 182,89 * N_3 + 10,09 * N_4 - 27,51 * N_5 \quad (2.16)$$

Так как коэффициенты регрессии не могут позволить определить влияние каждого фактора на результат в отдельности, то для этого необходимо построить уравнение множественной регрессии в стандартизированном (нормированном) масштабе [17, 18].

$$t(O) = \beta_1 * t_{N_1} + \beta_2 * t_{N_2} + \beta_3 * t_{N_3} + \beta_4 * t_{N_4} + \beta_5 * t_{N_5} \quad (2.17)$$

Это означает, что все переменные, участвующие в регрессионной модели, стандартизируются с помощью специальных формул. Процесс стандартизации позволяет установить точкой отсчета для каждой нормированной переменной ее среднее значение по выборке. При этом единицей измерения стандартизированной переменной становится ее среднеквадратическое отклонение.

Стандартизованные коэффициенты регрессии:

$$t_O = \frac{O - \bar{O}}{\sigma_O}; t_{N_j} = \frac{N_j - \bar{N}_j}{\sigma_{N_j}}; \quad (2.18)$$

$$t_O = t_{N_j} = 0; \sigma_{t_O} = \sigma_{t_{N_j}} = 1 \quad (2.19)$$

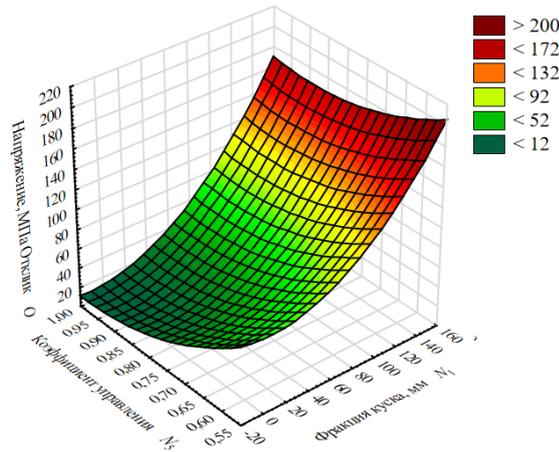
Стандартизованные коэффициенты регрессии показывают, насколько единиц изменится в среднем результат, если соответствующий фактор  $N_1$  – изменится на одну единицу при неизменном среднем уровне других факторов. Так как все переменные заданы как центрированные и нормированные, то стандартизованные коэффициенты регрессии можно сравнивать между собой. Сравнивая их друг с другом, можно ранжировать факторы по силе их воздействия на результат [110]. В этом заключается основное достоинство стандартизованных коэффициентов, поскольку коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии несравнимы между собой.

Уравнение линейной регрессии в стандартизованном масштабе будет иметь вид

$$t(O) = 0,074 * t_{N_1(0,027)} + 0,18 * t_{N_2(0,028)} + 0,108 * t_{N_3(0,021)} + 0,59 * t_{N_4(0,036)} - 0,073 * t_{N_5(0,019)} \quad (2.20)$$

где значения нижнего индекса — это стандартные ошибки оценки.

В приложении 2 представлены графики поверхности отклика зависимости выходной переменной от двух произвольных значимых факторов разработанной модели и их уравнения множественной линейной регрессии. Пример графика показан на рис. 2.2.



$$\text{Напряжение, МПа } O = 346,9112 - 0,2547 * N_1 - 687,8298 * N_5 + 0,0053 * N_1 * N_1 + 0,3912 * N_1 * N_5 + 353,092 * N_5 * N_5$$

Рис. 2.2. График поверхности влияния фракции куска породы  $N_1$  и коэффициента управления  $N_5$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора

Качество модели можно сравнить по нормальному вероятностному графику остатков [106]. Остатки – это разность между опытными и предсказанными значениями зависимой переменной в построенной регрессионной модели [106]. Чем меньше разброс значений остатков около линии регрессии, тем лучше прогноз [106].

Выборочные оценки дисперсий:

- общая дисперсия:

$$S^2_{TSS} = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (2.21)$$

- регрессионная дисперсия:

$$S^2_{ESS} = \frac{\sum(y_x - \bar{y})^2}{m} \quad (2.22)$$

- остаточная дисперсия:

$$S^2_{RSS} = \frac{\sum(y_i - y_x)^2}{n-m-1} \quad (2.23)$$

где  $TSS$  (Total Sum of Squares) - общая сумма квадратов отклонений зависимой переменной от среднего значения  $TSS = \sum(O - \bar{O})^2$ ,  $ESS$  (Explained Sum of Squares) – объясненная с помощью регрессии сумма квадратов отклонений  $ESS = \sum(\hat{O} - \bar{O})^2$ ,  $RSS$  (Residual Sum of Squares) – сумма квадратов остатков  $\sum e^2$ .

Оценка адекватности модели по остаткам представлена в приложении 3.

Графические характеристики статистической значимости полученной линейной регрессии представлены в таблице 2.3, 2.4, 2.5 и приложении 4.

Таблица 2.3

Итоговые зависимости наиболее значимых факторов, влияющих на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора

Предикторы $N$	Уравнение зависимости	Величина достоверности аппроксимации $R^2$
Уклон площадки, °	$O=16,9535N_4-9,1520$	0,9739
Коэффициент крепости породы	$O=19,259N_2-136,2$	0,9107
Фракция куска, мм	$O=1,0614N_1-12,949$	0,8745
Скорость экскаватора, м/с	$O=1532,5N_3-135,75$	0,8165
Коэффициент управления	$O=-325,8N_5+327,92$	0,7513

Проанализировав, полученные графики зависимости можно составить таблицу (табл. 2.5) соответствия значения влияющих внутренних и внешних факторов на состояния ходового оборудования.

Таблица соответствия влияния факторов на ходовое оборудование

Состояние ходового оборудования карьерного экскаватора	Значение внешних и внутренних факторов
<b>Хорошее</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- трещины на правой и левой гусеничных рамах отсутствуют,</li> <li>- износ кулачков ведущих колес: номинальный размер кулачка 100 мм,</li> <li>- сколы и выкрашивание колес: допускаются отдельные глубиной до 5 мм,</li> <li>- износ по ободу, нарушение профиля колес: отсутствуют.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя <math>d = 5 \dots 60</math> мм по толщине,</li> <li>• коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя <math>f = 8 \dots 10</math>,</li> <li>• скорость движения экскаватора <math>v = 0,1 \dots 0,12</math> м/с,</li> <li>• уклон рабочей площадки карьерного экскаватора <math>\alpha = 1 \dots 4^\circ</math>,</li> <li>• коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора <math>K_y = 0,9 \dots 0,98</math>.</li> </ul>
<b>Удовлетворительное</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- трещины на правой и левой гусеничных рамах до 500 мм,</li> <li>- износ кулачков ведущих колес: размер кулачка от 90 до 100 мм,</li> <li>- сколы и выкрашивание колес: не более 5 мм поверхности,</li> <li>- износ по ободу, нарушение профиля колес: до 20 мм – исправить профиль проточкой в пределах допустимого износа.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя <math>d = 60 \dots 120</math> мм по толщине,</li> <li>• коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя <math>f = 10 \dots 13</math>,</li> <li>• скорость движения экскаватора <math>v = 0,13 \dots 0,17</math> м/с,</li> <li>• уклон рабочей площадки карьерного экскаватора <math>\alpha = 4 \dots 8^\circ</math>,</li> <li>• коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора <math>K_y = 0,7 \dots 0,89</math>.</li> </ul>
<b>Неудовлетворительное</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- трещины на правой и левой гусеничных рамах более 500 мм,</li> <li>- износ кулачков ведущих колес: размер кулачка менее 90 мм,</li> <li>- сколы и выкрашивание колес: более 10 % поверхности,</li> <li>- износ по ободу, нарушение профиля колес: более 20 мм – колесо заменить.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя <math>d = 120 \dots 150</math> мм по толщине,</li> <li>• коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя <math>f = 13 \dots 16</math>,</li> <li>• скорость движения экскаватора <math>v = 0,18 \dots 0,19</math> м/с,</li> <li>• уклон рабочей площадки карьерного экскаватора <math>\alpha = 8 \dots 12^\circ</math>,</li> <li>• коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора <math>K_y = 0,61 \dots 0,69</math>.</li> </ul>

Графические характеристики статистической значимости полученной линейной множественной регрессии наиболее значимых факторов, влияющих на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора

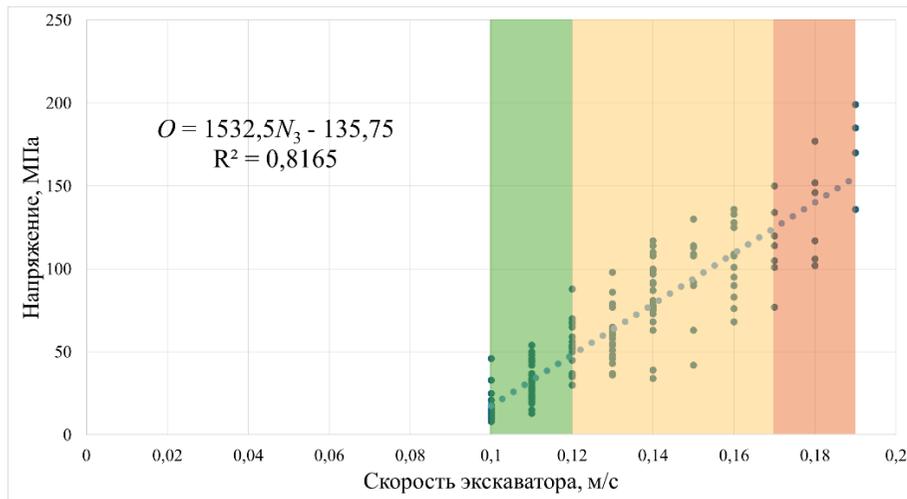


График зависимости напряжения от скорости экскаватора

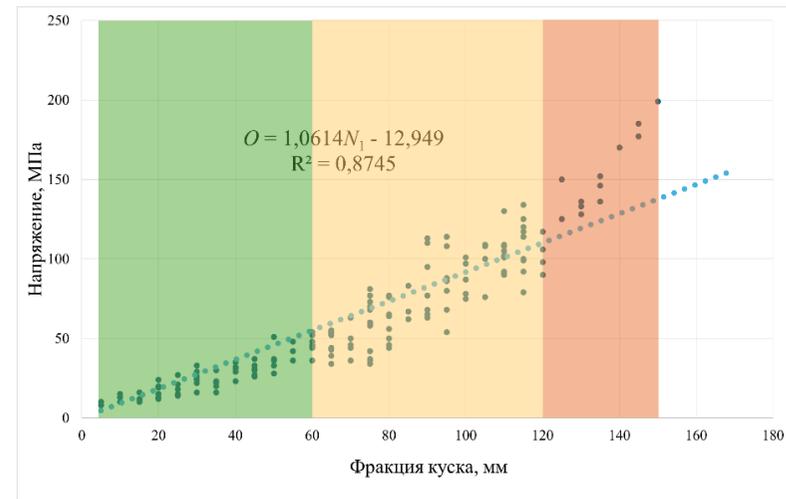


График зависимости напряжения от фракции куска

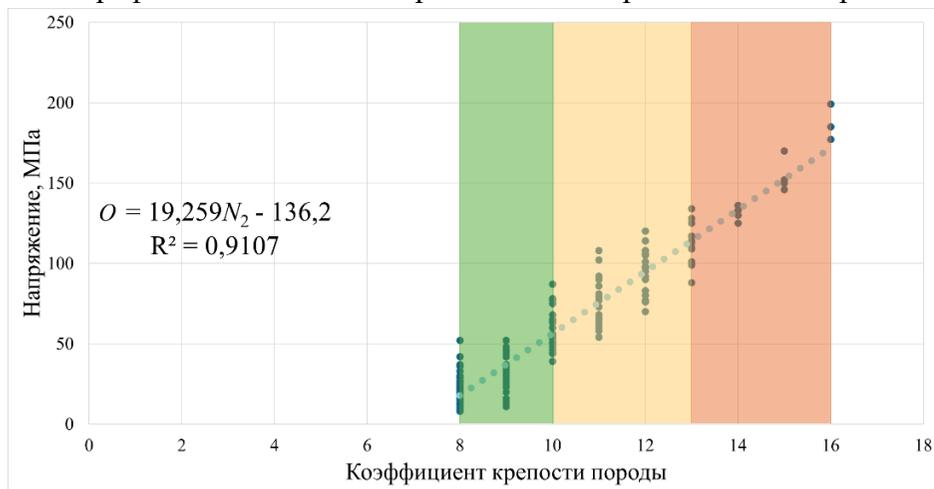


График зависимости напряжения от коэффициента крепости породы

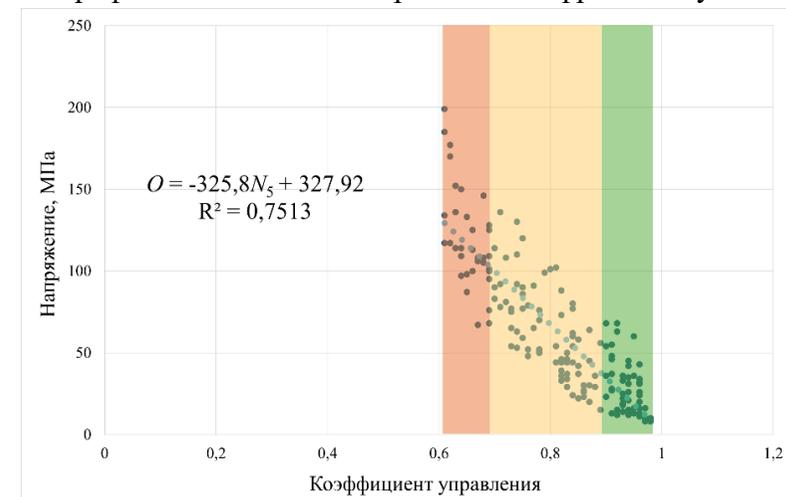
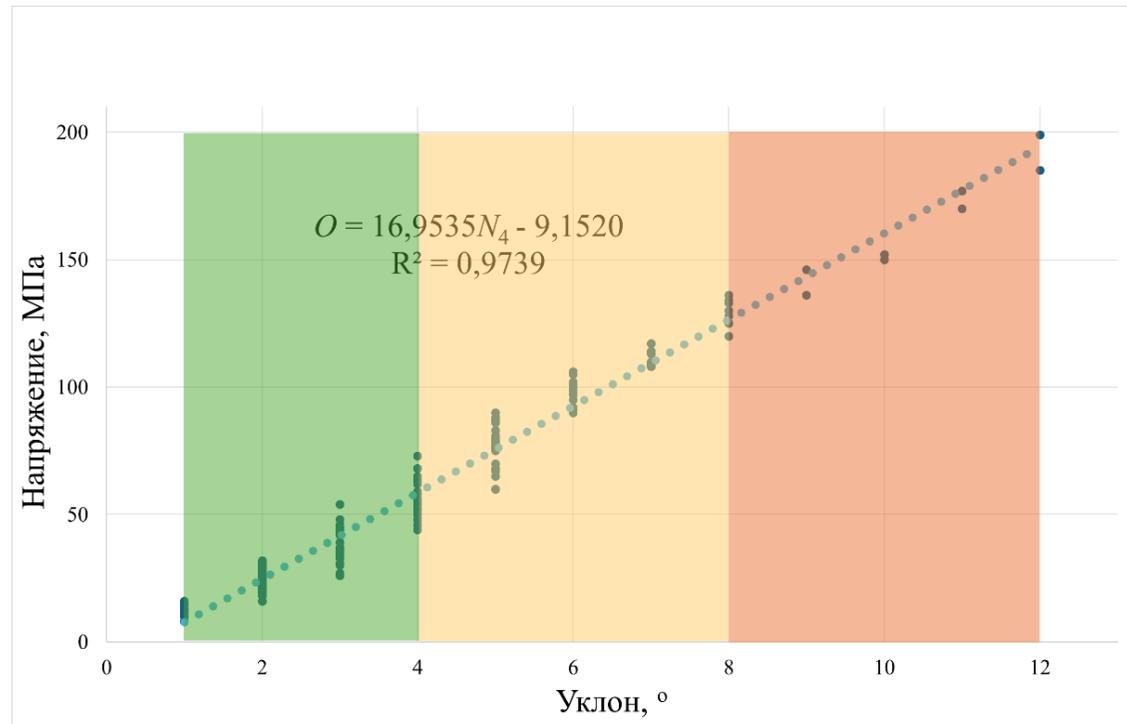


График зависимости напряжения от коэффициента управления



Зависимость напряжения от уклона площадки

### 2.3. Последовательность проведения эксперимента

Перед проведением эксперимента автором был проведен информационный поиск обзорных материалов по исследуемой теме.

Следующим шагом определяем объем экспериментальной работы. Для этого решаем задачу оптимизации, чтобы получить максимально достоверные данные с минимальными экономическими и временными затратам [55]. Необходимо, чтобы число опытных данных не было недостаточным или чрезмерно большим [55].

Ориентировочное время  $t$  определяется по формуле

$$t = n \cdot \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i \quad (2.24)$$

где  $n = 32$  – количество серий испытаний (32 – минимальное количество испытаний для пятифакторного эксперимента);  $p_i$  – повторяемость каждого опыта ( $p_i = 7$  – количество циклов загрузки одного большегрузного автосамосвала грузоподъемностью 55 тонн);  $m$  – количество различных опытов ( $m = 2$  – количество мест для установки тензорезисторов);  $t_i$  – время проведения одного опыта ( $t_i = 26$  – продолжительность цикла экскавации карьерного экскаватора ЭКГ-10), с. Минимальное время проведения испытаний ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 составит 3,23 часов.

Тогда трудоемкость  $Q$  определяется произведением времени на один опыт, на количество работников  $z_i = 4$ :

$$Q = n \cdot \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i \cdot z_i \quad (2.25)$$

Трудоемкость составит 12,94 человеко-часов.

Полученные значения  $t$  и  $Q$  следует увеличить в несколько раз, так как в них не учтены затраты на вспомогательные организационные работы.

### 2.4. Применение экспериментальной механики при проведении натуральных испытаний

С целью снижения материалоемкости конструкций и обеспечения ресурса и надежности машин разрабатываются новые расчетно-экспериментальные методы и средства, модернизируются методологии создания и эксплуатации машин и механизмов. Сформировалась потребность в одновременном применении

экспериментальных и численных методов, особенно при создании новых машин и механизмов – с одной стороны, при современном уровне развития компьютерных технологий и методологий значительную роль играет вычислительный эксперимент, с другой стороны, нельзя обойтись без проведения натуральных испытаний. Все это касается и типичных представителей тяжёлого машиностроения – машин для открытых горных работ, в том числе карьерных экскаваторов. В основу экспериментальных работ легли натурные испытания первых образцов отечественных экскаваторов на открытых горных работах, выполнявшиеся методом тензометрирования, который развивается в своем внутреннем наполнении и технической базе, при этом сохраняет содержательность и важность и в наше время [54, 105, 115, 117]. Одной из таких форм экспериментов является фиксация напряжения и деформаций в несущих металлоконструкциях и узлах их крепления с целью выявления их нагруженности. Это является частью исследования надежности карьерных экскаваторов, а также способствует совершенствованию их конструктивных и расчетных форм [132].

При планировании и проведении натуральных экспериментов по отношению к карьерным экскаваторам используются методы и средства экспериментальной механики, которые применяются на начальных этапах решения задач определения деформаций, напряжений и перемещений в элементах машин, воспринимающих нагрузки [68]. В целом, экспериментальная механика – раздел механики деформируемого твердого тела, в котором изучаются методы экспериментального исследования напряжений, деформаций, перемещений с целью оценки прочности и деформируемости различных материалов, элементов машин и сооружений, натуральных конструкций и их моделей [56, 68, 126, 128, 132, 135].

При планировании эксперимента, как уже говорилось ранее, факторы, влияющие на отклик, должны быть управляемы и между ними не должно быть корреляции [29, 121, 129, 133, 138, 139]. Для натуральных исследований карьерных экскаваторов в реальных условиях их эксплуатации в части оценки их нагруженности – замеров упругих деформаций в несущих металлоконструкциях, выполнения этих требований представляется невозможным. В нашем случае теория планирования

эксперимента применима для исследования надежности ходового оборудования карьерного экскаватора [132].

Рассмотрим известные подходы к оценке числа и/или длительности испытаний карьерных экскаваторов.

Техническая документация, например ГОСТ 17510-79 «Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений» описывает, как можно определить минимальное число  $F$  объектов наблюдений при известном законе распределения. Если закон распределения неизвестен, то предлагается использовать нормальное распределение для коэффициента вариации меньше или равного трем или распределение Вейбулла в противном случае [132].

Однако перед началом испытаний нет никаких научно обоснованных предположений о законе распределения (о коэффициенте вариации); чисто формально изучение различных нюансов надёжности чаще всего отличается от натурных испытаний карьерного экскаватора (что не отменяет и многих похожих черт – иными словами, множество испытаний пересекаются, но не совпадают).

В работе В. А. Черкасова показан самый простой из известных видов формулы для оценки числа объектов наблюдения при неизвестном виде закона распределения значений показателя надёжности  $F$

$$F = \frac{\ln(1-\beta)}{\ln P(t)}, \quad (2.26)$$

где  $\beta$  – доверительная вероятность;  $P(t)$  – минимальная величина вероятности безотказной работы машины.

В случае, когда приняты достаточно естественные предположения, а именно, что  $\beta = 0,95$  и  $P(t) = 0,95$  – получим, округляя в большую сторону,  $F \approx 59$ .

Очевидно, что приведенная формула имеет отношение к дискретной процедуре и может быть использована и за пределами теории надёжности. Значительным плюсом такого соотношения является необходимость задавать всего два параметра, которые могут быть получены из опыта эксплуатации существующих подобных объектов.

В ряде работ д.т.н., проф. А.А. Дёмина в 70-ые годы прошлого века показано, что для определения числа опытов (замеров) в ряде задач экспериментальной механики карьерных экскаваторов можно использовать формулу вида (используется при сравнении выборочной дисперсии с известной генеральной выборкой):

$$F = 1,5 + 0,5 \cdot \left[ \frac{Z_{1-\beta} \cdot (1 + \Delta\sigma) + Z_{1-0,5\alpha}}{\Delta\sigma} \right]^2, \quad (2.27)$$

где  $\Delta\sigma$  – предельная относительная ошибка при определении среднего квадратичного отклонения;  $\alpha$  и  $\beta$  – вероятности ошибок первого и второго рода соответственно;  $Z_{1-\beta}$  и  $Z_{1-0,5\alpha}$  – квантили, соответствующие заданным уровням вероятности.

Для конкретного использования этой формулы в рамках экспериментальной механики карьерных экскаваторов известна рекомендация выбирать  $\Delta\sigma$  в пределах 0,1 – 0,5 ( $\alpha = 0,05 - 0,1$  и  $\beta = 0,05 - 0,1$ ).

В случае, когда  $\beta = 0,1$ ,  $\alpha = 0,1$  и  $\Delta\sigma = 0,25$  имеем значения квантилей  $Z_{0,9} = 1,28$  и  $Z_{0,95} = 1,64$ . Тогда получим, округляя в большую сторону число опытов  $F \approx 88$ .

Такая формула имеет отношение к дискретной оценке и может быть использована и за пределами теории надёжности. Минусом этого соотношения является необходимость задавать уже три параметра, а также факт того, что формула (2.27) обычно рассматривается при числе опытов более четырнадцати. Кроме того, А.А. Дёмин использовал её не при тензометрировании.

Достаточно широко известна также формула вида:

$$F = 1,5 + 0,5 \cdot \left[ \frac{Z_{1-0,5\alpha}}{2 \cdot \Delta\sigma} \right]^2, \quad (2.28)$$

С теми же исходными данными, что и ранее получим, округляя в большую сторону,  $F \approx 7$ .

Наиболее часто в экспериментальных работах, посвященных карьерным экскаваторам, встречается формула следующего вида:

$$F = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{\Delta^2}, \quad (2.29)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение исследуемой величины (квадрат этой величины – дисперсия);  $t$  – нормированное отклонение среднего значения определяемое доверительной вероятностью  $P(t)$  с помощью функции Лапласа (значение  $P(t)$  необходимо задать);  $\Delta$  – заданная допускаемая погрешность измерения [18].

Заметим, что в рамках этого подхода число опытов быстро растёт с увеличением размаха исследуемой величины  $\sigma$ , желаемой точности (уменьшение  $\Delta$ ) и надежности результата  $P(t)$ .

Среднеквадратичные отклонения для исследуемых параметров карьерного экскаватора (особенно для операции копания) зависят от характеристики разрабатываемых грунтов и увеличиваются с повышением их неоднородности, твёрдости и количества негабаритов при разработке взорванных пород. Величина  $\sigma$  для основных исследуемых параметров изменяется в пределах примерно от 0,1 и до 0,55. Исходя от этого, считается, что степень надёжности нужно брать 0,95, а допустимая погрешность должна быть меньше или равна пяти процентам.

То есть и эта формула имеет отношение к дискретной оценке и может быть использована за пределами теории надёжности. Минусом этого соотношения является, во-первых, то, что получена она только для нормального закона распределения, а во-вторых, имеет место необходимость задавать три исходных параметра. Кроме того, рекомендуют уточнять значения параметров потребные для этой формулы через небольшие предварительные эксперименты (не менее десяти испытаний – циклов), что далеко не всегда возможно. Однако эта формула не требует знать дисперсию.

У формулы (2.29) есть и другой вид записи, которую в 70-ых годах прошлого века для некоторых задач экспериментальной механики карьерных экскаваторов рекомендовал применять д.т.н., проф. В.А. Ряхин:

$$F = \frac{v^2 \cdot t_\beta^2}{\Delta_\beta^2}, \quad (2.30)$$

где  $v$  – коэффициент вариации;  $\Delta_\alpha$  – допустимая максимальная погрешность;  $t_\varphi$  – значение квантили нормального распределения.

Эта формула также не предполагает знание величины дисперсии. Для этого соотношения известна рекомендация по использованию односторонних доверительных вероятностей (0,90 – 0,99). В случае, когда  $\beta = 0,99$ ,  $\nu = 10$  и  $\Delta\sigma = 2$ , имеем значения квантиля -  $Z_{0,9} = 2,576$ . Округляя в большую сторону, получим  $F \approx 166$ .

Известны немногие работы, в которых оценивается не только число опытов, а еще и длительность непрерывной записи (реализации) процесса, то есть продолжительность одного опыта (которую можно выразить и в числе рабочих циклов машины).

Существует следующее соотношение оценки времени записи  $T$  для нормального случайного процесса из условия обеспечения допустимой погрешности математического ожидания:

$$T = \frac{\sigma^2 \cdot t_\beta^2}{\Delta m^2} \cdot \tau = \frac{\sigma^2 \cdot t_\beta^2}{m_x^2 \cdot \delta_m^2} \cdot \tau = \frac{\nu^2 \cdot t_\beta^2}{\delta_m^2} \cdot \tau, \quad (2.31)$$

где  $\tau$  – время спада корреляционной функции случайного процесса, определяемое, как правило, из условия равенства нормированной корреляционной функции величине 0,1 – 0,05 ( $\tau = 1,0$  – 3,0 секунды);  $t_\beta$  – значение квантиля нормального распределения;  $\beta$  – доверительная вероятность;  $\sigma$  – среднее квадратическое отношение случайного процесса;  $\Delta m$  – абсолютная ошибка для математического ожидания;  $m_x$  – математическое ожидание;  $\delta_m$  – относительная погрешность в определении математического ожидания;  $\nu$  – коэффициент вариации ( $\nu = 0,2$  – 0,35).

Продолжительность записи одной реализации исходя из допустимой погрешности среднее квадратическое отклонения:

$$T = \frac{t_\beta^2}{\delta_\delta^2} \cdot \frac{\tau}{2} \quad (2.32)$$

где  $\delta_\delta$  – относительная погрешность определения среднее квадратическое отклонения.

Исходя из допустимой погрешности корреляционной функции случайного процесса продолжительность записи одной реализации:

$$T = \frac{1}{\delta_K^2} \cdot \tau, \quad (2.33)$$

где  $\delta_K$  – относительная погрешность.

Число независимых измерений здесь оценивают по формуле:

$$F = \frac{T}{\tau}. \quad (2.34)$$

Отметим, что из работ польских исследователей (д.т.н., проф. К. Круль и др.) известно, что у них время записи одного опыта принимается в диапазоне 950...2200 секунд (с учетом разных подсистем) – для типового цикла одноковшового гидравлического экскаватора.

Д. П. Волков отмечал, что число опытов должно быть порядка 140, а В. А. Ряхин предполагал, что число опытов может быть в диапазоне от 100 до 120. Однако значительный пул исследований в нашей стране проводился с числом натуральных экспериментов в диапазоне от 10 до 40.

Из всего выше сказанного видно, что:

- нет единого и научно обоснованного подхода к определению числа экспериментов и /или длины записи одной реализации;
- существующие формулы дают различные численные значения при одних и тех же исходных данных, и при разных требованиях к числу и виду исходных данных, часто нужны предварительные испытания;
- не решен вопрос о непрерывном и прерывном.

Кроме этого, нет учёта и анализа дневной и ночной специфики работы карьерных экскаваторов, и, как следствие, влияния человеческого и климатического факторов на проведение экспериментов [86]. Нет достаточного понимания того, что такое рабочий цикл карьерного экскаватора, а ведь он может быть выбран различным образом. Например, в зависимости от условий экскавации вместо привычного всем малого цикла (внедрение в породу зубьев ковша экскаватора, подъем и заполнение ковша, поворот груженого ковша, разгрузка, поворот порожнего ковша и опускание), можно рассматривать большой цикл, когда удобно ориентироваться на время погрузки единичного состава и т.д.

**Результат анализа формул для расчета числа циклов.** Проанализировав вышеприведенные формулы по определению числа опытов, предлагаем оригинальный подход и новую формулу по расчету числа циклов. В качестве исходных

данных принимаем следующие параметры:  $K_\sigma$  – эффективный коэффициент концентрации напряжений в исследуемом элементе металлоконструкции (МК);  $\sigma_{\text{СТ}}$  – статическое напряжение в элементе МК от конструкционных нагрузок и собственного веса элемента;  $\sigma_{\text{Д}}$  – динамические напряжения в элементе МК от рабочих и инерционных нагрузок в рамках обычных условий эксплуатации;  $\sigma_{-1}$  и  $\sigma_{\text{В}}$  – характеристики стали (предел выносливости стали при симметричном цикле нагружения; предел прочности стали);  $n$  – число режимов в процессе нагружения исследуемого элемента;  $\alpha_i$  – относительное время работы машины в эксплуатационной ситуации ( $\sum \alpha_i = 1$ );  $i$  – число уровней рабочего времени (в зависимости от типа грунта); марка стали;  $Z_1$  и  $Z_2$  – квантили;  $\alpha$  и  $\beta$  – вероятности ошибки первого и второго рода [132].

Значения коэффициента приведения расчётного  $i$  – ого режима, устанавливаемого по уровню статических и динамических нагрузок, можно определить по формуле вида:

$$\phi_i = \left( 1 + \left[ \frac{\sigma_{\text{СТ}} + \frac{\sigma_{\text{Д}}^i}{2}}{K_\sigma \cdot \frac{\sigma_{\text{Д}}^i}{2}} \right] \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{В}}} \right). \quad (2.35)$$

Приведенные эквивалентные напряжения для конкретного режима  $i$ , соответствующие типовым эксплуатационным условиям, оговоренным в технической документации, найдем следующим образом:

$$\sigma_{\text{Э}} = \frac{\phi \cdot \sigma_{\text{Д}} \cdot K_\sigma}{2}. \quad (2.36)$$

За математическое ожидание приведенных эквивалентных напряжений на стадии "планирования" эксперимента принимаем среднее арифметическое эквивалентных напряжений, оцениваемое в том случае, когда нет информации о распределении времени работ в эксплуатационных ситуациях, следующим выражением:

$$\bar{\sigma}_{\text{Э}} = K_\sigma \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{\text{Д}}^i}{2 \cdot n} \cdot \left( 1 + \frac{(2 \cdot \sigma_{\text{СТ}} + \sigma_{\text{Д}}^i)}{K_\sigma \cdot \sigma_{\text{Д}}^i} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{В}}} \right). \quad (2.37)$$

В том случае, когда расчетами оговариваются эксплуатационные ситуации и дается распределение относительного времени работы в каждой из них, эта формула принимает вид:

$$\bar{\sigma}_{\text{Э}} = K_{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{\text{Д}}^i}{2} \cdot \alpha_i \cdot \left( 1 + \frac{(2 \cdot \sigma_{\text{СТ}} + \sigma_{\text{Д}}^i)}{K_{\sigma} \cdot \sigma_{\text{Д}}^i} \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{В}}} \right). \quad (2.38)$$

Дисперсия приведенных эквивалентных напряжений – это дисперсия эквивалентных амплитуд напряжений, определяемая с учетом паспортных режимов работы экскаватора так:

$$\sigma_{\text{Э}}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{\sigma}_{\text{Э}} - \sigma_{\text{Э}}^i)^2, \quad (2.39)$$

где математическое ожидание можно найти, после ряда упрощений, из соотношения вида:

$$\bar{\sigma}_{\text{Э}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \sigma_{\text{Э}}^i. \quad (2.40)$$

Число рабочих циклов, на протяжении которых необходимо осуществлять тензометрирование можно определить по формуле [132]:

$$F = \left[ \frac{\sqrt{\sigma_{\text{Э}}^2 \cdot (Z_1 + Z_2)}}{0,1 \cdot \bar{\sigma}_{\text{Э}}} \right]^2. \quad (2.41)$$

Формула записана из условия, что ошибка оценки среднего значения напряжений не превышает десяти процентов от уровня расчётного среднего напряжения:

$$\Delta \sigma_{\text{ПР}} = 0,1 \cdot \Delta \bar{\sigma}_{\text{Э}}. \quad (2.42)$$

Распределение установленного числа рабочих циклов карьерного экскаватора, в течение которых осуществляется регистрация процесса нагружения исследуемого элемента, должно осуществляться пропорционально времени работы машины в каждой из возможных рабочих ситуаций. Если заранее известны параметры  $\alpha_i$  и  $i$ , то число записей рабочих циклов может быть определено по формуле:

$$n_i = n \cdot \alpha_i. \quad (2.43)$$

Предлагаемый подход к оценке необходимого числа натуральных тензометрических измерений напряжений не претендует на исчерпывающую полноту и абсолютную точность. Такой подход является всего лишь частным примером выявленной глобальной проблемы экскаваторостроения и нацелен исключительно на применение в условиях эксплуатации ходового оборудования карьерного экскаватора при минимальном уровне доступных исходных данных и теоретических возможностей инженеров, эксплуатирующих технику (одно из требований к подходу – простота и

доступность исходных данных). Задачей является определение рационального, а не оптимального значения числа потребных испытаний, что заведомо лучше интуитивного выбора их числа при планировании эксперимента. Это позволит выполнить то число экспериментов, которое будет хотя бы не меньше допустимой величины, что важно. Особенно важно это в условиях эксплуатации, когда некоторые элементы металлоконструкций (МК) карьерных экскаваторов подвергаются модернизации и ремонту, и могут менять картину силовых потоков в МК (особенно для экскаваторов с превышенным сроком эксплуатации) [132].

Проведен расчет формулы (2.41). В качестве исходных данных приняты следующие значения:  $\sigma_3^2$  – дисперсия приведенных эквивалентных напряжений, рассчитанное по формуле (2.39) -  $\sigma_3 = 96150,81$ ;  $Z_1 = 1,96$  и  $Z_2 = 1,64$  – квантили;  $\bar{\sigma}_3$  - математическое ожидание приведенных эквивалентных напряжений, рассчитанное по формуле (2.40) -  $\bar{\sigma}_3 = 151,14$  [136].

Применяя предложенную формулу, необходимо  $F = 55$  натуральных экспериментов [132].

Планирование объема эксперимента в нашем случае проводится на основе методов теории выборочных распределений. При этом наш подход построен на допущении нормального распределения приведённых нормальных напряжений с известными начальными моментами. За математическое ожидание распределения приведённых эквивалентных напряжений (в роли выборочного среднего) принимаем эквивалентное напряжение, установленное по уровню статических и динамических напряжений (из технической документации). Математическое ожидание распределения приведенных эквивалентных напряжений описывается известным соотношением – в соответствии с теорией приведения исследуемого стационарного процесса изменения напряжений к симметричному [132].

Проведен регрессионный анализ с учетом 55 натуральных экспериментов. Результаты множественной регрессии представлены в таблицах 2.6 и 2.7.

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что расчет по предлагаемой формуле дает необходимое и достаточное число натуральных экспериментов. Это открывает новые горизонты для дальнейшего углубленного анализа, который

позволяет не только подтвердить первоначальные гипотезы, но и выявить новые закономерности, ранее не поддававшиеся исследованию.

Таблица 2.6

## Результаты множественной регрессии с учетом всех предикторов

Зав.перем.:Напряжение, МПа		Множест. R=0,99691862		F=1582,50	
		R <sup>2</sup> =0,99384673		сс=5,49, p=0,000000	
Число набл.:55		Скоррект.R <sup>2</sup> =0,98567034			
Стандартная ошибка оценки: 4,371686752					
Св.член: -17,2084	Ст.ошибка: 24,84579	t(154) =-0,69261	p=0,049		
Фракция куска бета=0,1 Коэффициент крепости бета=0,167 Скорость экскаватора бета=0,168 Уклон площадки бета=0,476 Коэффициент управления бета=-0,1					

Таблица 2.7

## Итоги регрессии для зависимой переменной: Напряжение, МПа

N=55		R=0,99691862 R <sup>2</sup> =0,99384673 Скоррект. R <sup>2</sup> =0,99321885 F(5,49)=1582,9, p<0,0000 Станд. ошибка оценки: 4,3717					
		БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(49)	p-знач.
Св.член				-17,2084	24,84579	-0,69261	0,0491825
Фракция куска, мм	N <sub>1</sub>	0,100495	0,042362	0,1208	0,05091	2,37231	0,021648
Коэффициент крепости породы	N <sub>2</sub>	0,166712	0,050563	3,4570	1,04850	3,29713	0,001822
Скорость экскаватора, м/с	N <sub>3</sub>	0,167558	0,044910	309,6234	82,98800	3,73094	0,000496
Уклон площадки, °	N <sub>5</sub>	0,476435	0,064116	8,0282	1,08038	7,43087	0,000000
Коэффициент управления	N <sub>1</sub>	-0,101235	0,048572	-44,1667	21,19111	-2,08421	0,042376

Важно отметить, что применённая методология демонстрирует высокую степень точности, что способствует уменьшению вероятности возникновения ошибок, а также позволяет в значительной мере оптимизировать затраты на проведение эксперимента.

## 2.5. Итоги планирования эксперимента

В результате планирования эксперимента:

1. Выявлены факторы, оказывающие существенное воздействие на количество отказов ходового оборудования карьерного экскаватора.

2. Для многофакторного эксперимента установлена зависимость функции отклика от предикторов 1 группы – управляемые параметры:

$$O = f(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5)$$

3. Определены наиболее значимые факторы для создания модели: фракция куска, коэффициент крепости породы, скорость экскаватора, уклон рабочей площадки карьерного экскаватора, коэффициент управления.

4. Построена регрессионная модель со стандартной ошибкой оценки 5%.

5. Получен коэффициент детерминации, объясняющий функциональную связь между факторами и функцией отклика  $R^2 = 0,98$ . По шкале Чеддока такая теснота связи соответствует весьма значительной силе связи и означает, что модель имеет высокое практическое значение.

6. Получены:

- уравнение множественной линейной регрессии:

$$O = -25,84 + 0,08 * N_1 + 3,72 * N_2 + 182,89 * N_3 + 10,09 * N_4 - 27,51 * N_5$$

- уравнение линейной регрессии в стандартизированном масштабе:

$$t(O) = 0,074 * t_{N_1(0,027)} + 0,18 * t_{N_2(0,028)} + 0,108 * t_{N_3(0,021)} + 0,59 * t_{N_4(0,036)} - 0,073 * t_{N_5(0,019)}$$

7. Определены зависимости наиболее значимых факторов, влияющих на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора:

- от фракции куска  $O = 1,0614N_1 - 12,949$ ;

- от коэффициента крепости породы  $O = 19,259N_2 - 136,2$ ;

- от скорости экскаватора  $O = 1532,5N_3 - 135,75$ ;

- от уклона площадки  $O = 16,9535N_4 - 9,1520$ ;

- коэффициента управления  $O = -325,8N_5 + 327,92$ .

8. В рамках решения задачи оптимизации для проведения испытаний ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10:

- минимальное необходимое время 6,47 часов,
- трудоемкость - 25,88 человеко-часов.

9. Определено какое число натуральных экспериментов необходимо провести (какова должна быть продолжительность непрерывной записи) для оценки напряженно-деформированного состояния того или иного элемента карьерного экскаватора. Проведен анализ известных теоретических подходов к этому вопросу, выявлены достоинства и недостатки этих подходов. Предложен оригинальный подход и выведена формула для определения числа натуральных экспериментов  $F$  [132]:

$$F = \left[ \frac{\sqrt{\sigma_{\bar{z}}^2 \cdot (Z_1 + Z_2)}}{0,1 \cdot \bar{\sigma}_{\bar{z}}} \right]^2 .$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рациональным путем оценки напряженно-деформированного состояния элементов ходовой части является проведение экспериментальных исследований непосредственно на карьерном экскаваторе в рабочем режиме. Цель – разработка основных методических положений для проведения экспериментальных исследований в области процессов появления или зарождения дефектов ходового оборудования карьерного экскаватора с последующей оценкой напряженно-деформированного состояния металлоконструкций.

Надежность работы ходового оборудования карьерного экскаватора будет определяться, с одной стороны – величиной и характером действующих нагрузок на ходовом оборудовании, с другой стороны – прочностью узлов и деталей.

Так, например, корпуса редукторов хода в процессе эксплуатации экскаватора будут испытывать значительные деформации, при этом изменятся статические и динамические параметры и характер напряженного состояния деталей редукторов (распределение напряжений по ширине зубьев колес, величина и направление реакций подшипниковых опор, прогибы валов и так далее) [25, 52]. Специфические требования, предъявляемые к конструкциям карьерных экскаваторов, приводят к разработке разветвленных кинематических схем, что обуславливает сложное конструктивное исполнение и приводит к снижению надежности в эксплуатации корпусов редукторов (трещины стенок, износ посадочных поверхностей), а также нарушение заданных условий и точности взаимного расположения узлов и деталей.

Исследование напряженного состояния корпусных деталей машин проводятся в трех направлениях [52]:

- теоретическое исследование жесткости корпусов;
- исследование на моделях из материалов с низким модулем упругости;
- исследование на натуральных образцах.

Наиболее точным будет применение последнего направления исследования, но для него требуется большое количество тензометрической и измерительной аппаратуры, которая позволяет наиболее точно учесть схему нагружения корпуса,

получив значение его деформации без пересчета модели. В таких исследованиях нагружение корпуса машины осуществляется в эксплуатационных условиях, а замеры обычно производятся с помощью датчиков, устанавливаемых в различных точках корпуса. Получаемые при этом величины деформаций, оказываются на порядок больше учитываемых обычно в расчетах деформаций валов и подшипниковых опор.

Таким образом, исследования нагруженности отдельных узлов и деталей ходового оборудования экскаватора при различных деформациях корпуса позволит оценить напряженно-деформированное состояние металлоконструкций корпуса редуктора и его влияние на формирование нагрузок в ходовом оборудовании.

Для исследования надежности редукторов гусеничного хода были применены вибродиагностический и тензометрический методы.

Также был применен метод твердометрии для оценки элементов гусеничного хода карьерного экскаватора, а именно ведущих, опорных и натяжных колес. Гусеничный ход имеет малоопорный открытый тип, что обеспечивает свободный доступ к элементам в процессе эксплуатации, однако при этом элементы подвергаются интенсивному изнашиванию. Износа деталей невозможно избежать даже с учетом разработки наилучшей конструкции и при использовании материалов высочайшего качества. Износ возникает за счет двух факторов: первый – при взаимодействии деталей путем взаимного трения, скольжения или качения, а второй связан со средой, в которой эксплуатируется ходовое оборудование экскаватора. Различные условия эксплуатации могут привести к различной степени износа, в основном это абразивный износ элементов гусеничного хода.

### **3.1. Карьерный экскаватор ЭКГ-10 №333 ПАО «УРАЛАСБЕСТ»**

Экспериментальные исследования проводились на карьерном экскаваторе ЭКГ-10 № 333 предприятия ПАО «Ураласбест» (рис. 3.1) [80]:

- год изготовления – 2003 г.;
- завод изготовитель – г. Колпино, Ижорский завод, ООО "ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова";

- место установки (стояния) – Центральный горный цех, Рудуправление;
- введен в эксплуатацию – 28 января 2004 года.



Рис. 3.1. Карьерный экскаватор ЭКГ-10 № 333 ПАО "Ураласбест"

Технические характеристики экскаватора представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Технические характеристики экскаватора ЭКГ-10 [47, 107]

Параметры	ЭКГ 10
Вместимость ковша, м <sup>3</sup>	10,0
Рабочая масса, кг	395000
Конструктивная масса, кг	334000
Масса основного ковша, кг	16200
Длина стрелы, м	13,8
Длина рукояти, м	11,1
Угол наклона стрелы, град	45
Наибольшая высота разгрузки, м	8,6
Наибольший радиус разгрузки, м	16,3
Наибольшая высота копания, м	13,5
Наибольший радиус копания, м	18,4
Наибольший радиус копания на уровне стояния, м	12,6
Просвет под поворотной платформой, м	2,7
Высота по кабине, м	8,6
Расстояние от оси пяты стрелы до центра вращения, м	2,4
Среднее давление на грунт при передвижении, кПа	216
Наибольшее усилие на подвес ковша, кН	0,8
Номинальная мощность:	
- сетевого двигателя, кВт	800
- трансформатора, кВт	160
Расчетная продолжительность цикла, с	26
Скорость передвижения по горизонтальной площадке, км/ч	0,7
Длина гусеничного хода, м	8,2

По данным рудоуправления предприятия ПАО «Ураласбест» в период с 01.01.2020 по 01.04.2022 из отчета по затратам на ремонт (приложение 5) продолжительность технического обслуживания и ремонтов ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 составило 966,34 часа (рис. 3.2). Из них:

- 657,34 часа отводилось на ремонт генератора напора-хода (мелкий ремонт с заменой или ремонтом щеточного аппарата), ремонт муфты генератора, демонтаж и монтаж генератора напора-хода, отцентровка генератора вращения-хода;
- 182 часа заняла ревизия главных приводов и двигателей хода;
- 84 часа было затрачено на демонтаж и монтаж колпака опорного колеса;
- 43 часа было отведено на осмотр металлоконструкций механизмов передвижения, тормозов с опробыванием их действия, смазку колес, срез раскатов кулачков ведущих колес, крепеж клиньев замков гусеничных рам [80].

По сумме финансовые затраты на комплектующие составили 313284,97 руб., трудозатраты составили 114830 руб.



Рис. 3.2. Диаграмма продолжительности технического обслуживания и ремонтов ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 №333 в период с 01.01.2020 по 01.04.2022, в часах

В период с 01.01.2022 по 31.08.2023 по видам дефектов ходового оборудования (приложение 5, рис. 3.3) [80]:

- механические дефекты 4,5 часа: неисправность бортового редуктора левой гусеничной рамы (дефект устраняется на месте) и износ колодок тормоза левого редуктора хода (требуется ремонт) [80];

- электрические дефекты 39 часов: замыкание обмотки на корпус в якоре правого двигателя хода (требуется ремонт) [80].

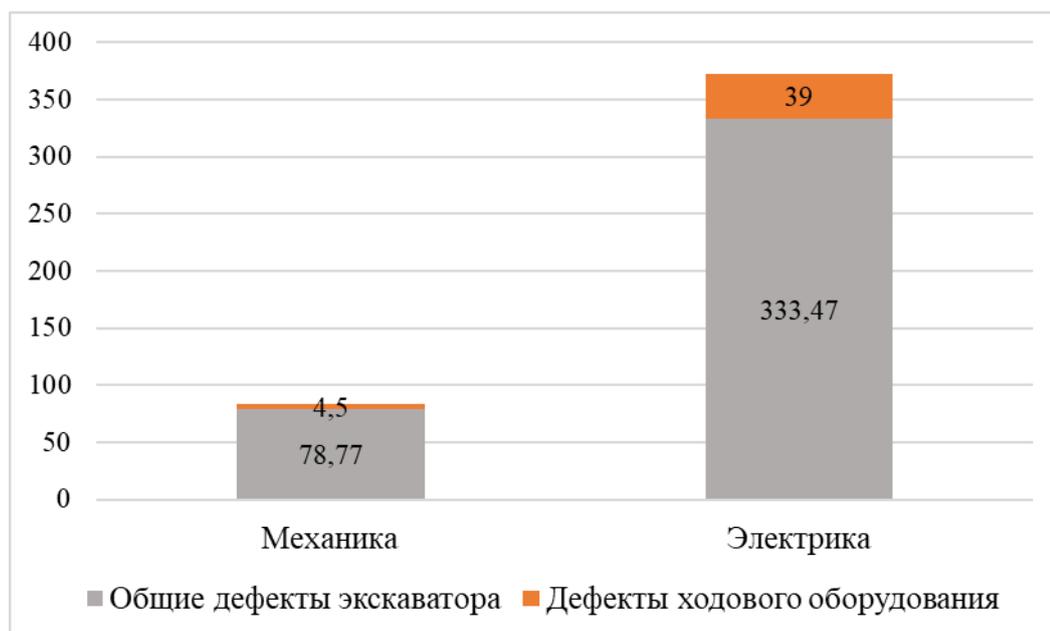


Рис. 3.3. Продолжительность устранения дефектов по видам в период с 01.04.2022 по 31.08.2023, в часах

За период с 01.01.2022 по 31.08.2023 для экскаватора ЭКГ-10 № 333 было проведено 5 операций по внеплановому ремонту и 57 по техническому обслуживанию, из них по ходовому оборудованию 4 операции относятся к внеплановому ремонту правого двигателя хода, один внеплановый ремонт левого редуктора хода по замене тормозных дисков, и 22 операции по техническому обслуживанию ходового оборудования (натяжка гусеничных лент на правой и левой гусеничной раме, замена тормозных дисков левого редуктора хода, крепеж клиньев замков правой и левой гусеничной рамы, демонтаж и монтаж колпака опорного колеса левой гусеничной рамы, крепеж левого и правого редукторов хода, сверление маслоходов в бронзовых втулках).

По сумме финансовые затраты на внеплановые ремонты и техническое обслуживание ходового оборудования составили:

на комплектующие - 51367,54 руб.,

трудозатраты - 33619,57 руб.

Общая продолжительность ремонтов экскаватора 399,83 часа (рис. 3.4), из них на внеплановые ремонты и техническое обслуживание ходового оборудования приходится 269,49 часа.

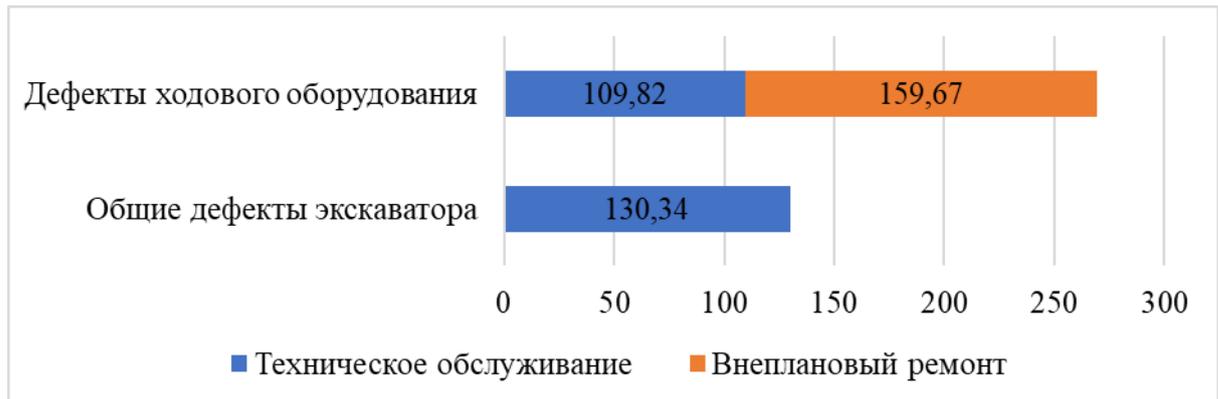


Рис. 3.4. Затраты по видам ремонта в зависимости от продолжительности устранения дефектов по видам в период с 01.04.2022 по 31.08.2023 в часах

Проанализировав отчеты, предоставленные рудоуправлением ПАО «Ураласбест», можно сделать следующие выводы:

- за период с 01.04.2022 по 31.08.2023 на различные виды ремонтов ходового оборудования экскаватора было затрачено 67,4 % времени;

- большинство операций относится к ремонту редукторов хода.

### 3.2. Применение вибродиагностического метода исследования

Одним из методов неразрушающего контроля, который был применён при оценке технического состояния ходового редуктора экскаватора ЭКГ-10 на ПАО «Ураласбест», был метод вибродиагностики [25, 28, 36, 40]. Использование такого метода неслучайно, так как он является одним из двух методов неразрушающего контроля, который позволяет оценить техническое состояние оборудования в процессе его эксплуатации без остановки производственного цикла [81].

Вибродиагностический метод является единственным методом, позволяющим локализовать с точностью до узла зону возникновения дефекта в агрегате [81].

Метод вибродиагностики основан на измерении процесса перемещения агрегата при механических колебаниях от положения равновесия системы. Для описания технического состояния системы есть три главных параметра (колебательные величины) вибрационного состояния и около десяти дополнительных параметров вибрации, которые учитываются при выполнении вибрационного анализа данных. Мгновенное значение координаты положения точки относительно положения своего равновесия называют виброперемещением  $s(t)$ . Если по вертикальной оси графика отложить положение объекта, испытывающего простые гармонические колебания, а по горизонтальной шкале – время, то результатом будет синусоида, описываемая уравнением [81, 84]:

$$s = S \times \sin(\omega \times t) \quad (3.1)$$

где  $s$  – мгновенное смещение;  $S$  – максимальное смещение;  $\omega = 2\pi F$  – угловая частота.

Параметр виброперемещения в большинстве технических задач измеряется в мкм и отражает динамику передвижения измеряемой точки в процессе вибрации. Измерение виброперемещения выполняют по амплитуде или по размаху. Основным параметром вибрационного состояния является виброскорость. Чтобы определить скорость измерения положения тела относительно точки равновесия необходимо получить первую производную по времени от виброперемещения. При дифференцировании получим уравнение:

$$V = ds/dt = \omega \times S \times \cos(\omega \times t) \quad (3.2)$$

где  $V$  – мгновенная скорость.

Виброскорость измеряется в мм/с. В нормативной документации пороговые уставки предельных уровней вибрации заданы именно по величине виброскорости. Третьим главным параметром вибрационного состояния оборудования является виброускорение. Его получают путём взятия второй производной по времени от виброперемещения. Этот параметр характеризует динамику изменения скорости объекта и показывает потенциальную энергию вибрационной системы.

$$A = dv/dt = \omega^2 \times S \times \sin(\omega \times t) \quad (3.3)$$

где  $A$  – мгновенное ускорение

Виброускорение измеряется в  $\text{м/с}^2$ . Из приведённых формул видно, что скорость пропорциональна смещению, умноженному на частоту, а ускорение – смещению, умноженному на квадрат частоты. Это означает, что большие смещения на высоких частотах сопровождаются очень большими скоростями и чрезвычайно большими ускорениями. Например, если объект испытывает смещение 1 мм с частотой 100 Гц, максимальная скорость такого колебания будет равна смещению, умноженному на частоту, то есть  $V = 100$  мм/с, а ускорение  $A = 10$   $\text{м/с}^2$ . При увеличении частоты до 1000 Гц получаем  $V = 1$  м/с, а ускорение  $A = 1000$   $\text{м/с}^2$  [81, 84, 85].

Таким образом, высокие частоты не могут сопровождаться большими смещениями, поскольку возникающие в этом случае огромные ускорения приведут к разрушению системы [81, 84].

При контроле параметров вибрации во времени происходит усреднение показателей, но при этом используется не среднее значение, а среднее квадратическое значение (СКЗ) колебательной величины. Оно вычисляется, как корень квадратный из суммы квадратов всех мгновенных значений колебательной величины за период и математически записывается:

$$X_{\text{СКЗ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_t^{1+T} [x(t)]^2 \times dt} \quad (3.4)$$

где  $X_{\text{СКЗ}}$  – параметр вибрационного сигнала;  $T$  – период колебания;

В соответствии с ГОСТ 10816-3-2002 допустимый уровень вибрации для редуктора хода принимаем соответствующий классу 2, имеющему податливые опоры. Уровень «Предупреждение» принят уровень СКЗ виброскорости соответствующий переходу оборудования из зоны В в зону С – 4,5 мм/с. Уровень «Авария» принят уровень СКЗ виброскорости соответствующий переходу оборудования из зоны С в зону D – 7,1 мм/с. Скорости вращения ступеней редуктора приведены в таблице 3.2.

Скорости вращения ступеней редуктора

Ступень редуктора/ передаточное число	Скорость вращения, об/мин = частота, Гц
Ведущий вал	750 об/мин = 12,5 Гц
1 / 4,61	162 об/мин = 2,7 Гц
2 / 4,56	35,5 об/мин = 0,59 Гц
3 / 6,18	17,04 об/мин = 0,28 Гц
Выходной вал	5,7 об/мин = 0,01 Гц

Схема контроля приведена на рисунке 3.5. Полученные значения вибрации СКЗ виброскорости, в сравнении с допустимыми уровнями вибрации приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Значения вибрации СКЗ виброскорости

Агрегат	Точка контроля	Параметр СКЗ виброскорости, мм/с	Отбраковочная величина «Предупреждение»	Отбраковочная величина «Авария»	Результат
Правый редуктор хода	T1	1,88	4,5	7,1	Норма
	T2	4,95			Предупрежд.
	T3	2,14			Норма
	T4	2,91			Норма
	T5	2,45			Норма
	T6	3,67			Норма
	T7	3,11			Норма
Левый редуктор хода	T1	7,67	4,5	7,1	Авария
	T2	2,29			Норма
	T3	2,99			Норма
	T4	2,73			Норма
	T5	5,83			Предупрежд.
	T6	2,35			Норма
	T7	4,47			Норма

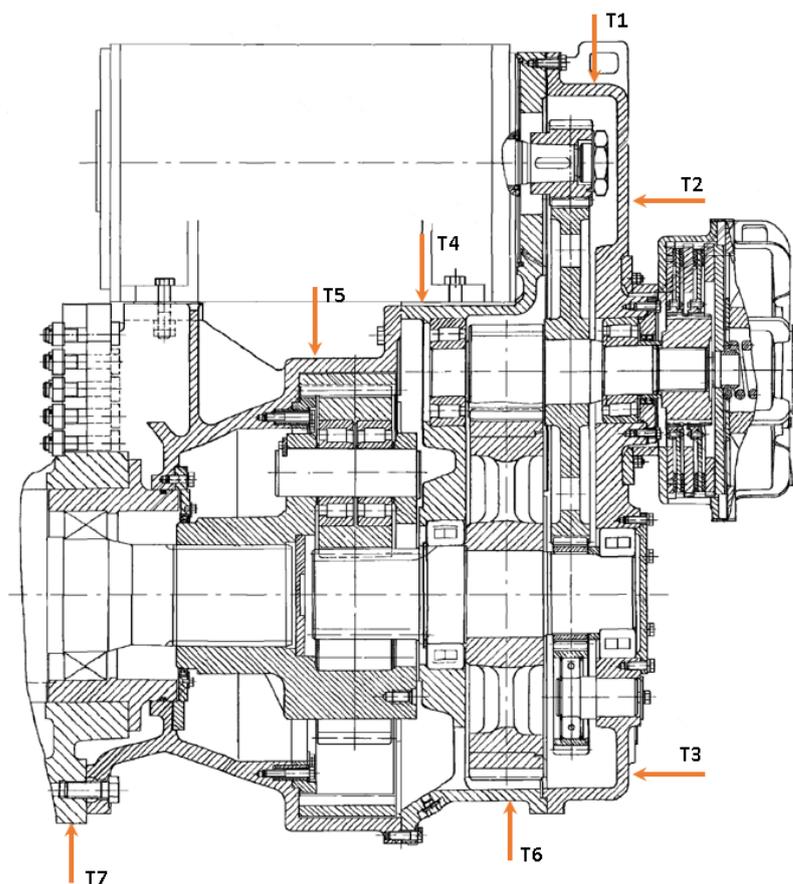


Рис. 3.5. Точки контроля вибрации на редукторе хода

Общий уровень вибрации правого редуктора хода находится в зоне «предупреждение», а общий уровень вибрации левого редуктора превышает значение «Авария», установленные ГОСТ 10816-3-2002.

Полученные значения вибрации СКЗ виброускорения приведены в таблице 3.4. На параметр виброускорения нет фиксированных предельных значений, поэтому мы будем использовать сравнение показателей двух редукторов друг с другом.

Общий уровень вибрации даёт понимание о наличии или отсутствии в системе критических проблем, но не позволяет определить источник повышенной вибрации, а также реагирует увеличением своего уровня только, когда дефект имеет значительный уровень развития дефекта. Для определения источников повышенной вибрации необходимо производить анализ спектров параметров вибрации и анализ формы сигнала.

Значения вибрации СКЗ виброускорения

Агрегат	Точка контроля	Параметр СКЗ виброускорения, м/с <sup>2</sup>	Отклонение от значений правого редуктора	Результат
Правый редуктор хода	T1	1,18	-	Норма
	T2	2,12	-	Норма
	T3	1,95	-	Норма
	T4	6,82	-	Норма
	T5	2,67	-	Норма
	T6	15,03	-	Прогноз отказа
	T7	2,23	-	Норма
Левый редуктор хода	T1	5,21	4,03	Норма
	T2	2,79	0,67	Норма
	T3	2,93	0,98	Норма
	T4	4,33	-2,49	Норма
	T5	4,67	2	Норма
	T6	4,66	-10,37	Норма
	T7	3,34	1,11	Норма

Общий уровень вибрации даёт понимание о наличии или отсутствии в системе критических проблем, но не позволяет определить источник повышенной вибрации, а также реагирует увеличением своего уровня только, когда дефект имеет значительный уровень развития дефекта. Для определения источников повышенной вибрации необходимо производить анализ спектров параметров вибрации и анализ формы сигнала. Измерения проводились российским прибором производства ООО Производственно – внедренческая фирма «Вибро-Центр» - виброметром марки ViPen (рис. 3.6) [81, 140], который позволяет проводить сбор данных об уровне вибрации и температуре, позволяет получить спектр виброускорения с диапазоном частот от 10 до 1,5 кГц с количеством линий – 400, ширина линий 3,72 Гц. Для получения более детального спектра необходимо использовать более совершенные виброметры и виброручки, такие как ViPen2 или STD-510. Хранение данных и анализ спектров производился в программном обеспечении Safe Plant.



Рис.3.6. Виброметр марки ViPen

Анализ спектров виброскорости и виброускорения правого редуктора показывает.

1. Повышенный уровень виброскорости в Т2 не нашёл подтверждения наличия дефекта по спектру виброскорости и виброускорения. В спектрах виброскорости (рис. 3.7) не обнаружены гармонические ряды, что свидетельствует о том, что повышенный уровень вибрации не является в данном случае признаком дефекта, а является следствием воздействия случайных ударных нагрузок, вызванных нормальной работой оборудования.

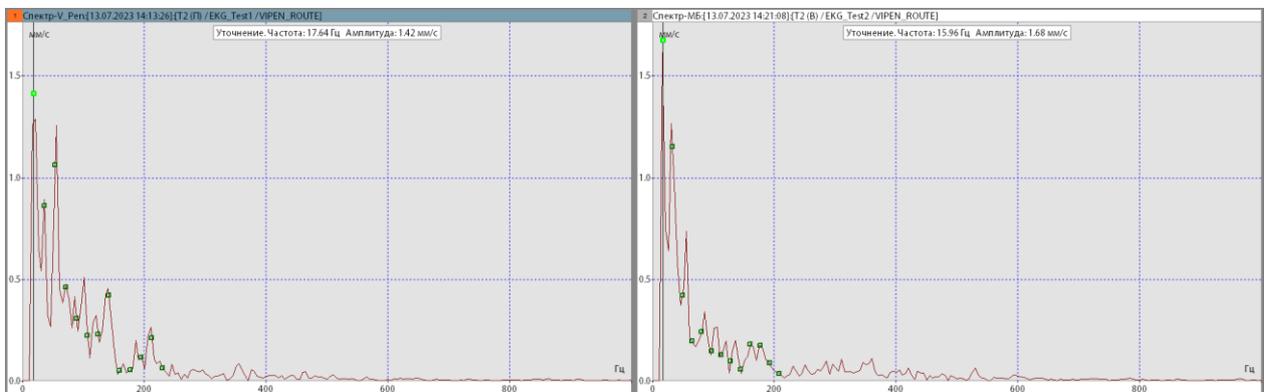


Рис. 3.7. Спектры виброскорости в Т2 правого редуктора хода

В спектре виброускорения (рис. 3.8) максимальная величина не превышает  $0,57 \text{ м/с}^2$ , и отсутствуют признаки гармонических рядов, что свидетельствует также об отсутствии признаков дефектов в оборудовании.

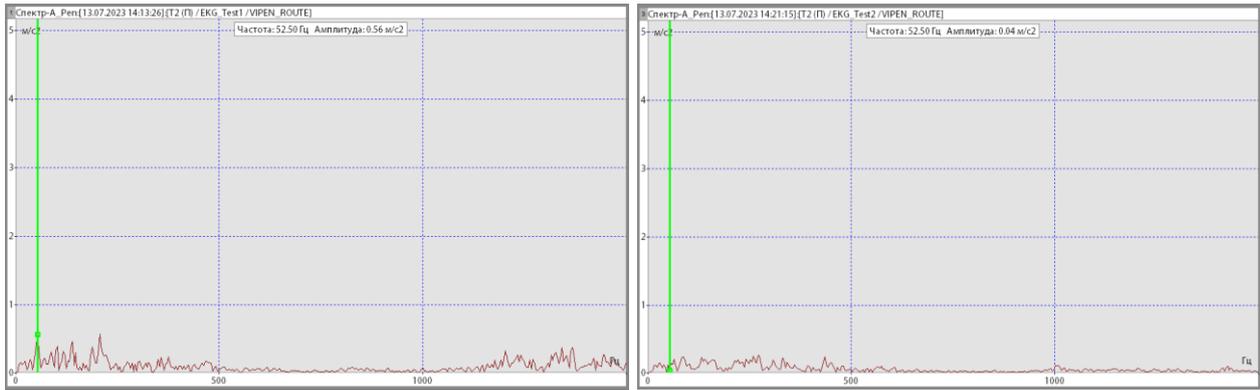


Рис. 3.8. Спектры виброускорения в T2 правого редуктора хода

2. Наибольший вклад в повышенный уровень вибрации в спектре виброускорения в точке T6 (рис. 3.9) вносит модуляционный ряд на частоте 431,25 Гц с полосой частот около 11,25 Гц. По форме модуляционного ряда он похож на дефект износа зубчатого колеса.

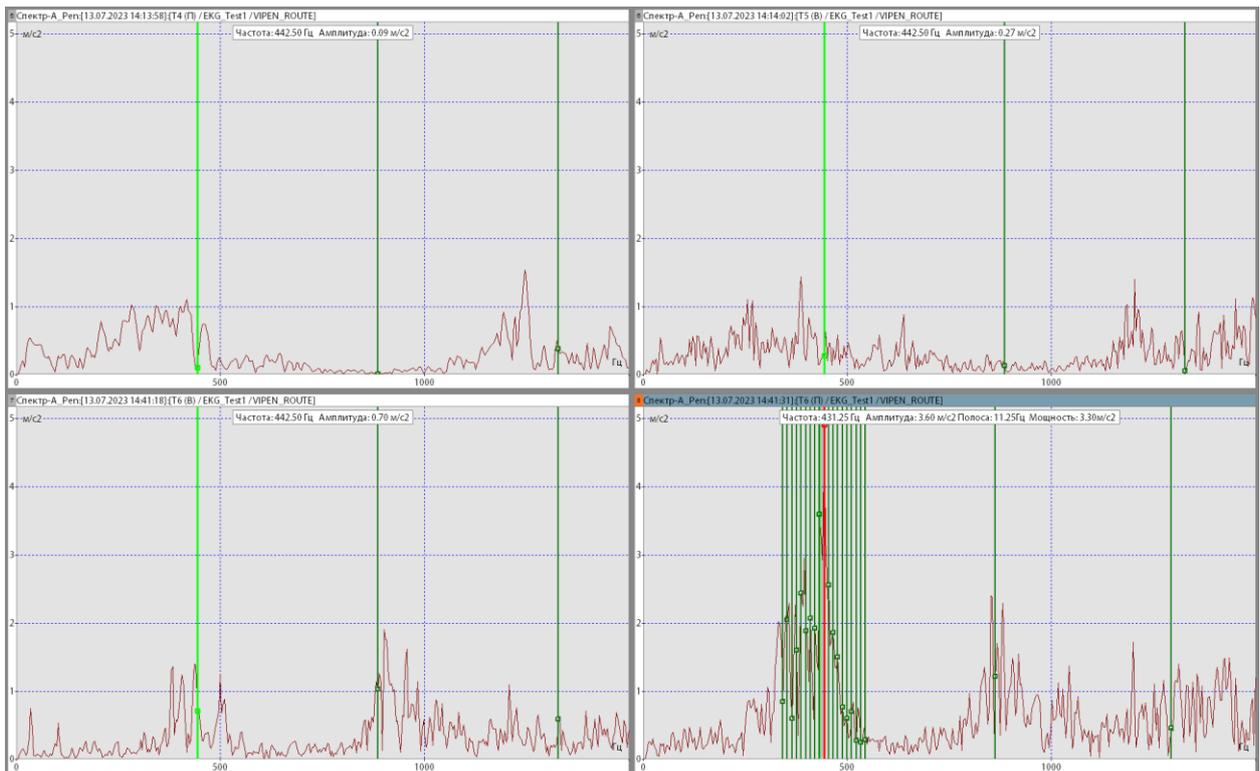


Рис. 3.9. Спектры виброускорения в T6 правого редуктора хода

Аналогичный модуляционный ряд можно встретить на спектре виброскорости в данной точке (рис. 3.10). Наличие на двух разных спектрах одного и того же модуляционного ряда, с учётом погрешности вызванной низкой разрешающей

способностью прибора, свидетельствует о действительном наличии определённого износа в элементах редуктора.

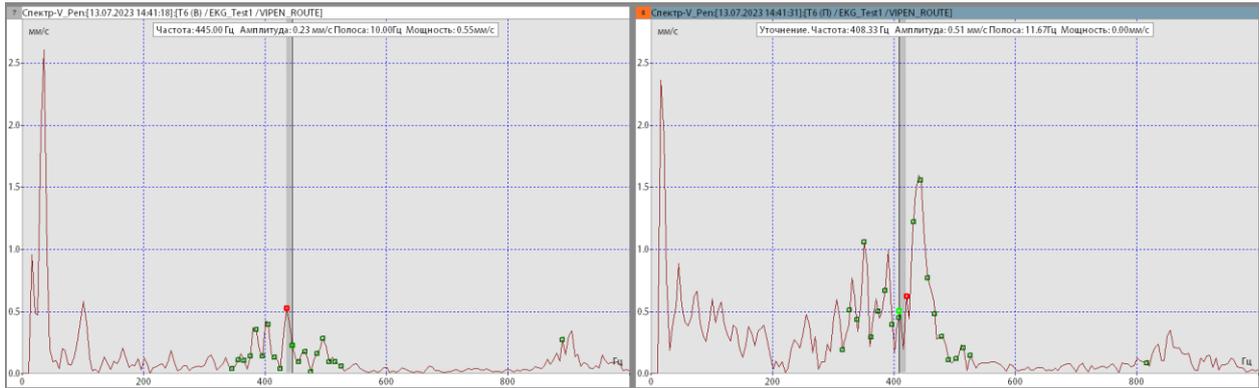


Рис. 3.10. Спектры виброскорости в Т6 правого редуктора хода

Анализ спектров виброскорости и виброускорения левого редуктора показывает.

1. На спектре виброскорости Т1 (рис. 3.11) нет явных признаков значительных дефектов. Максимальная амплитуда не превышает 1,19 мм/с. На спектре виброускорения Т1 (рис. 3.12) максимальная амплитуда не превышает  $1,22 \text{ м/с}^2$ , однако при этом в спектре ярко выраженные высокочастотные вибрации (более 1000 Гц), что может быть признаком недостаточного объема масла в редукторе или деградацией смазочных свойств масла. Однако аварийное состояние анализом спектров не подтверждено.

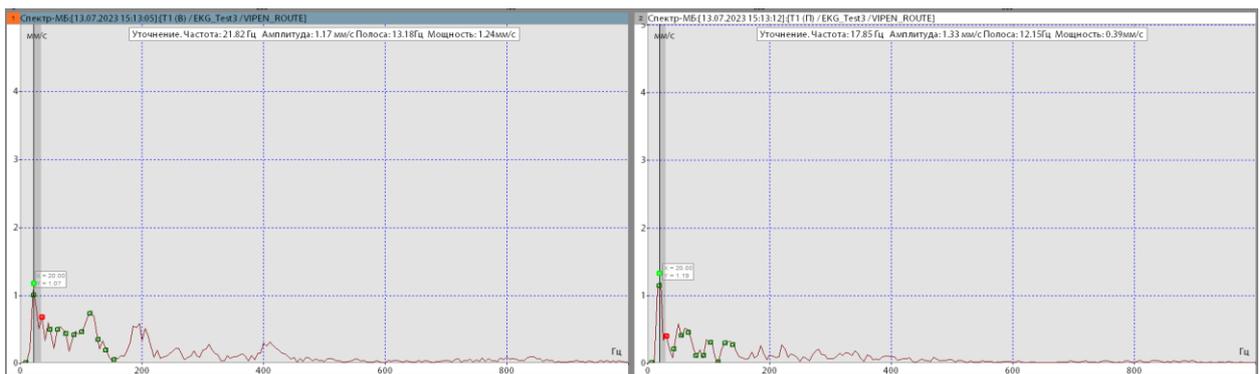


Рис. 3.11 Спектры виброскорости в Т1 левого редуктора хода

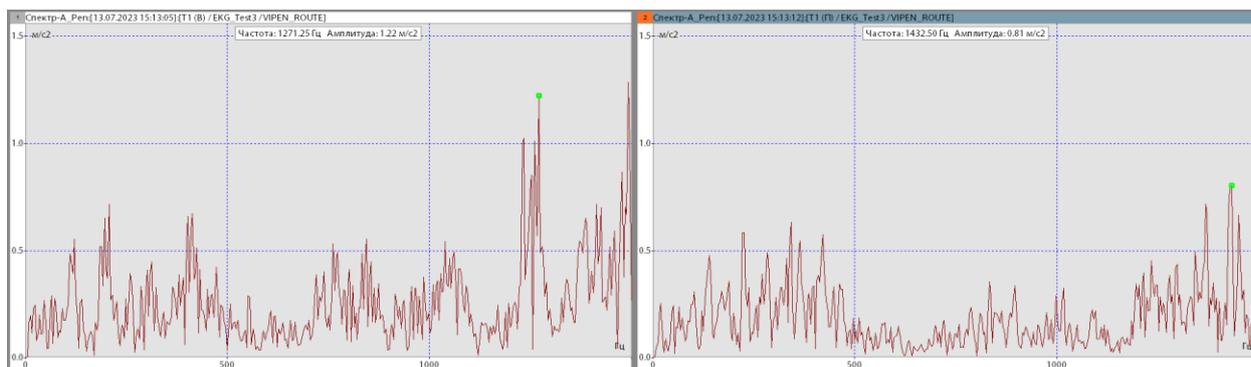


Рис. 3.12 Спектры виброускорения в Т1 левого редуктора хода

2. На спектре виброскорости Т5 (рис. 3.13) также отсутствуют признаки дефектов. Максимальная амплитуда не превышает 0,75 мм/с. На спектре виброускорения Т5 (рис. 3.14) максимальная амплитуда не превышает 1,15 м/с<sup>2</sup>, однако при этом в спектре достаточно большой вклад вносят высокочастотные вибрации (более 1000 Гц), что может быть признаком недостаточного объема масла в редукторе или деградацией смазочных свойств масла. Однако аварийное состояние анализом спектров не подтверждено.

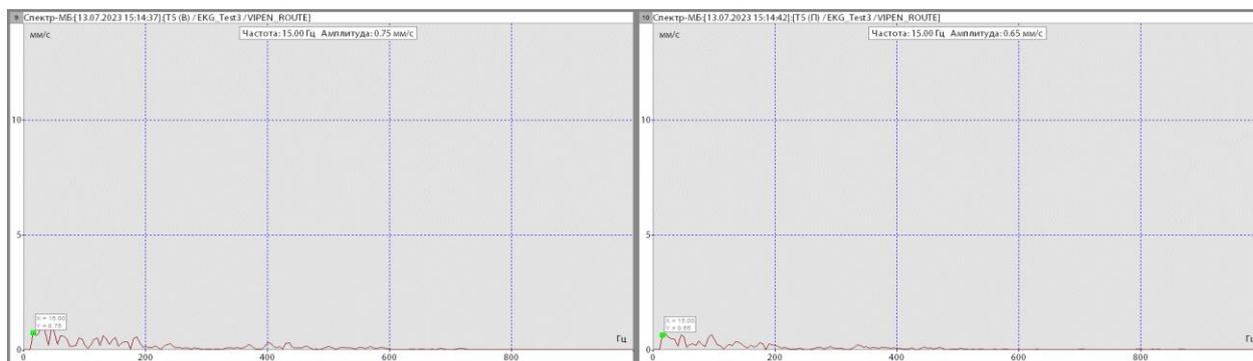


Рис. 3.13. Спектры виброскорости в Т5 левого редуктора хода

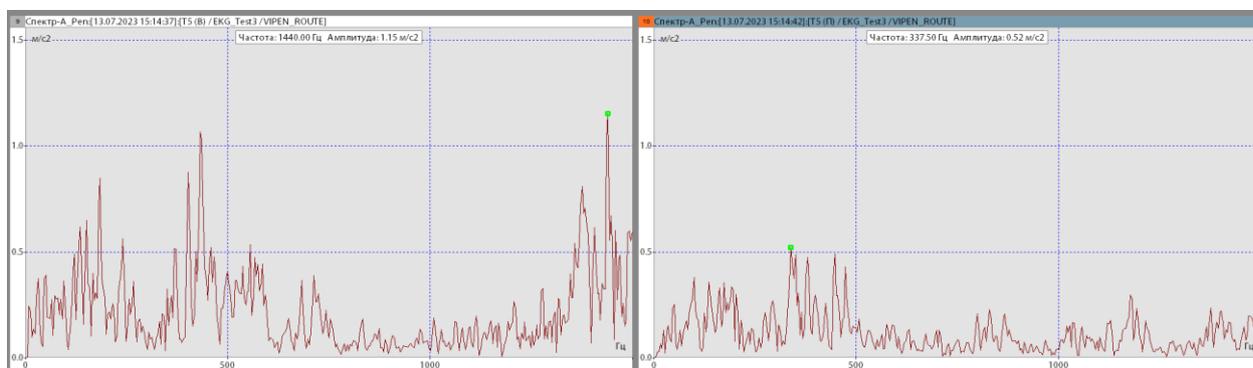


Рис. 3.14. Спектры виброускорения в Т5 левого редуктора хода

### 3.3. Тензометрические испытания редукторов хода

Задачами тензометрических испытаний являются определение и фиксация напряжений, возникающих в металлоконструкциях, узлах и деталях ходовой тележки карьерного экскаватора [68].

Цель проведения тензометрических испытаний – это оценка соответствия горных машины условиям и требованиям эксплуатации, определение ресурса до капитального ремонта и накопление данных по надёжности машины и её узлов, уточнение показателей эксплуатационной технологичности и ремонтпригодности [43, 68, 74]. А также определение и уточнение расхода запасных частей, эксплуатационных материалов, стоимости ремонтных воздействий в зависимости от величины наработки и условий эксплуатации [13, 68].

Комплексная задача экспериментальных исследований включает оценку напряженно-деформированного состояния элементов и деталей ходовой части горных машин при работе в карьере [74].

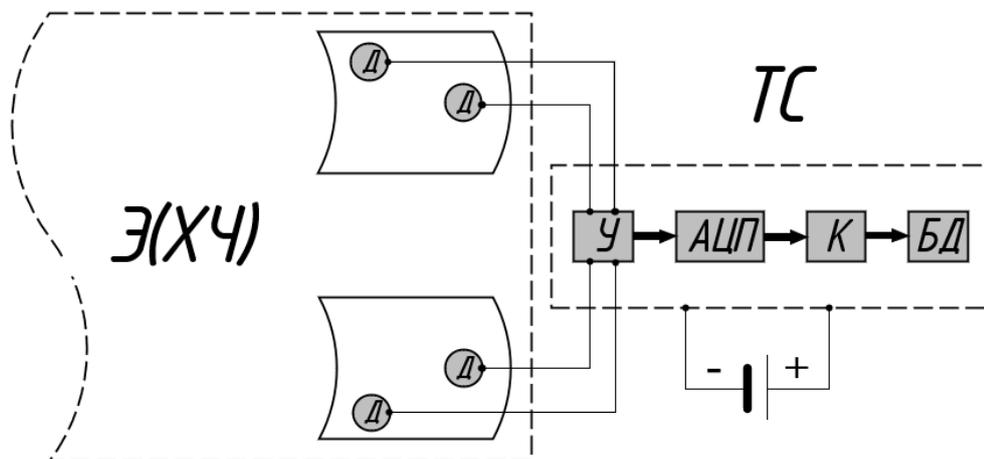
Первый этап экспериментальных исследований включает следующие вопросы [74]:

- выбор горной машины и ее элемента, как объекта исследования;
- разработка методики проведения экспериментальных исследований;
- замер деформаций на опытной горной машине в реальных условиях работы;
- определение значения напряжений.

Проведение измерений величин динамических нагрузок ходового оборудования карьерного экскаватора в рабочем режиме является весьма сложным и небезопасным с технической точки зрения мероприятием. Измерительная аппаратура, размещённая на ходовой части, должна снимать показания в процессе работы, трансформировать и фиксировать их в условиях воздействия множества внешних факторов. Поэтому для проведения экспериментальных исследований выбран метод, основанный на электротензометрии - измерении деформаций с помощью проволочных датчиков-тензорезисторов [43, 59, 68].

Для реализации метода создана специальная информационно-измерительная система (ИИС), принципиальная схема которой приведена на рис. 3.15.

Объектом исследования выбрана ходовая тележка карьерного экскаватора ЭКГ-10 предприятия ПАО «Ураласбест», место проведения исследований - карьер Баженовского месторождения хризотил-асбеста. Тензорезисторы были установлены на корпусах правого и левого редукторов гусеничного хода (рис. 3.16).



*Условные обозначения:*

*Э(ХЧ) - ходовая часть экскаватора; ТС - тензостанция; Д - датчик-тензорезистор;*

*У - усилитель аналогового сигнала; АЦП - аналогово-цифровой преобразователь;*

*К - контроллер; БД - база данных*

Рис. 3.15. Принципиальная схема информационно-измерительной системы (ИИС)

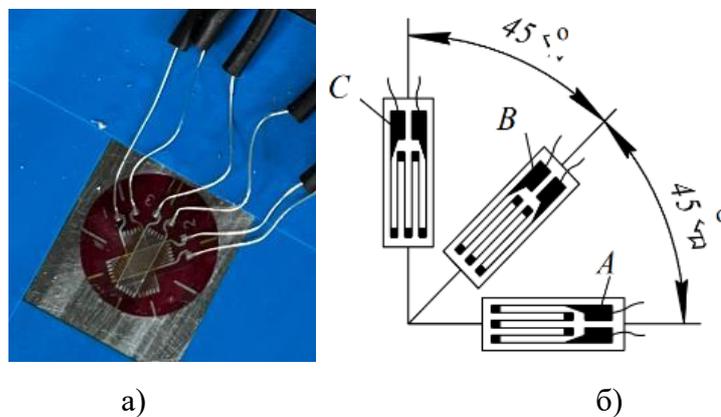


Рис. 3.16. Места установки датчиков-тензорезисторов

Все приборы и устройства ИИС размещаются непосредственно на экскаваторе, тензостанция имеет автономное питание. Датчики-тензорезисторы (Д), установленные на ходовой тележке, измеряют величину деформации. Полученные аналоговые сигналы преобразуются по величине усилителем (У). Аналогово-цифровой

преобразователь (АЦП) изменяет тип сигнала. Далее информация уже в цифровом представлении фиксируется контроллером (К) и записывается в базу данных (БД).

Для измерения напряжений в металлоконструкциях использовались датчики фольговые 3-х осевые FRB-5-11 (рис. 3.17). Датчики предназначены для измерения деформаций деталей машин и конструкций или для использования в качестве чувствительных элементов измерительных преобразователей. Тензорезисторы применяются для определения механического напряжения, вызванного деформацией, и запаса прочности материала или конструктивного элемента, в котором используется материал. Датчик представляет трехэлементную прямоугольную розетку, в которой тензорезисторы расположены под углами  $45^\circ$  друг к другу (рис. 3.17) [104].



а – внешний вид тензорезистора FRB-5-11;

б - прямоугольная трехэлементная тензорозетка

Рис. 3.17. Датчики и их расположение для проведения исследований

Трехэлементные прямоугольные розетки используют в тех случаях, когда хотя бы приблизительно известно направление главных напряжений на поверхности детали [5, 104]. Датчики А и С ориентируют по этим направлениям. Для прямоугольной трехэлементной розетки в соответствии с рис. 3.17 угловые направления датчиков имеют следующие значения  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $\gamma = 90^\circ$  [104].

Наклейка тензорезисторов выполнялась в соответствии с рекомендациями от производителя в несколько этапов:

1. С поверхности была удалена краска, пыль и другие посторонние загрязнения.
2. Было зачищено место установки тензорезистора наждачной бумагой #120, #320 и #1500.

3. Подготовленную поверхность протерли тканью, смоченной небольшим количеством универсального обезжиривателя.

4. С помощью твердого карандаша на подготовленную поверхность была нанесена разметка под тензорезистор.

5. Далее на место была наклеена изолента на поверхности, попадания клея на которых было нежелательно.

После подготовки поверхности приступили к наклейке датчиков. Необходимое количество однокомпонентного клея CN на основе цианокрилата было нанесено на обратную сторону подложки тензорезистора. Расположили его на подготовленную поверхность, для лучшего сцепления накрыли тензорезистор специальной тефлоновой прокладкой и прижали.

Тензорезисторы размещали по четвертьмостовой схеме с 2-проводным подключением (рис. 3.18). Один тензорезистор подключали к одному каналу. Соответственно, для подключения прямоугольной трехэлементной тензорозетки необходимо одновременно задействовать три канала подключения к тензометрической станции [104].

Тензометрические исследования осуществлялись в режимах, которые позволяют реализовать максимальные усилия на выходных звеньях экскаватора, при этом происходит фиксация деформаций, которые возникают в момент реализации максимальных усилий в характерных силовых точках металлоконструкции экскаватора [68].

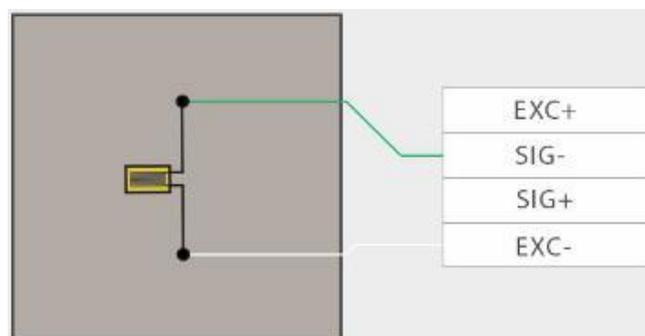


Рис. 3.18. Четвертьмостовая схема

Схема подключения тензометрических датчиков исключает влияние температурных изменений на измеряемые параметры. Параметр «Время» синхронизирован

с соответствующим параметром контрольно-измерительной аппаратуры экскаватора ЭКГ-10. Измеряемые параметры фиксировались на протяжении каждого полного цикла нагружения [5, 57, 60, 77, 91].

В качестве контрольно-измерительной аппаратуры используется отечественный аппарат на программный комплекс компании ZETLAB, на базе 8 канального контроллера сбора данных ZET 017-T8 (рис. 3.19) [5] и программного обеспечения ZETLAB TENZO [5, 57, 60, 77, 91]. Комплекс позволяет вести фиксацию параметров одновременно по 8 измерительным каналам в режиме реального времени, а программное обеспечение позволяет передавать регистрируемые параметры на компьютер и настраивать работу системы в различных режимах.

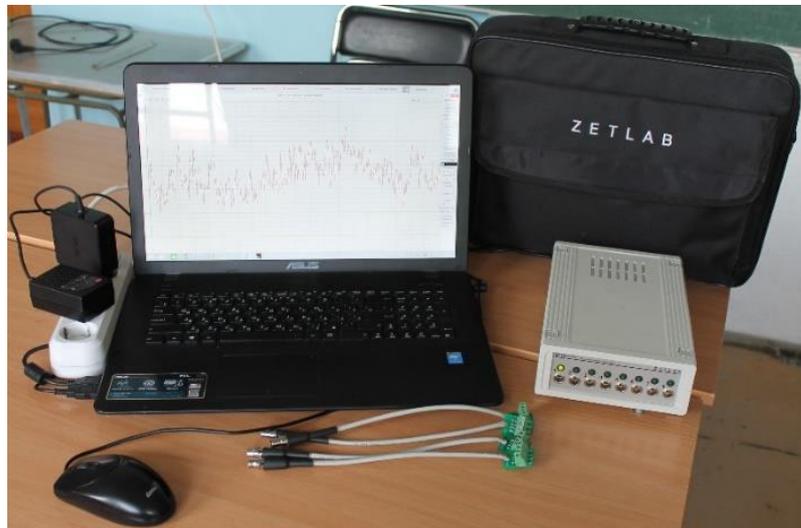


Рис.3.19. Тензостанция ZET 017-T8, производство компании ZETLAB

Запись сигналов осуществлялась с помощью программы «Автономный регистратор» (рис. 3.20). В автономном режиме по заданному сценарию устройство записывает на встроенный накопитель оцифрованные временные реализации сигналов [91].

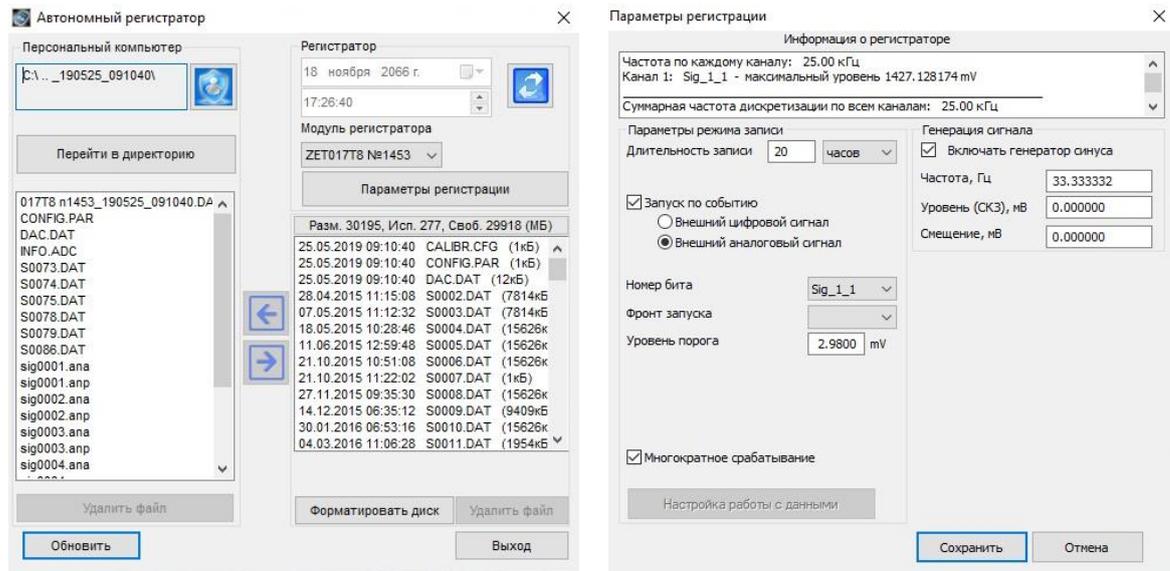


Рис. 3.20. Программа «автономный регистратор» и вкладка «Параметры регистрации»

Во вкладке «Сервисные» через «Диспетчер устройств» (рис. 3.21) можно отредактировать показатели измеряемого сигнала: название сигнала, единицу измерения, чувствительность, опорное значение, интегральный уровень сигнала и смещение для каждого подключенного канала. Для каждого канала были установлены следующие значения параметров[5, 91]:

- единица измерения – mV;
- чувствительность – 0,01 В/ед.изм.;
- опорное значение – 0,001;
- смещение – 0;
- коэффициент внешнего усилителя – 1;
- интегральный уровень сигнала - 1400 mV.

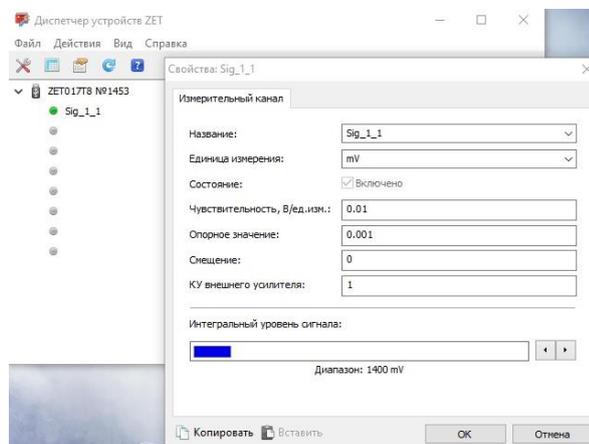


Рис. 3.21. Настройка измерительных каналов

С использованием предложенной ИИС были проведены предварительные исследования, в процессе которых проверена её работоспособность и произведены необходимые настройки. Получены осциллограммы (рис. 3.22 и рис 3.23) и данные, которые подтвердили адекватность результатов процессам деформации, характерных для работающего экскаватора.

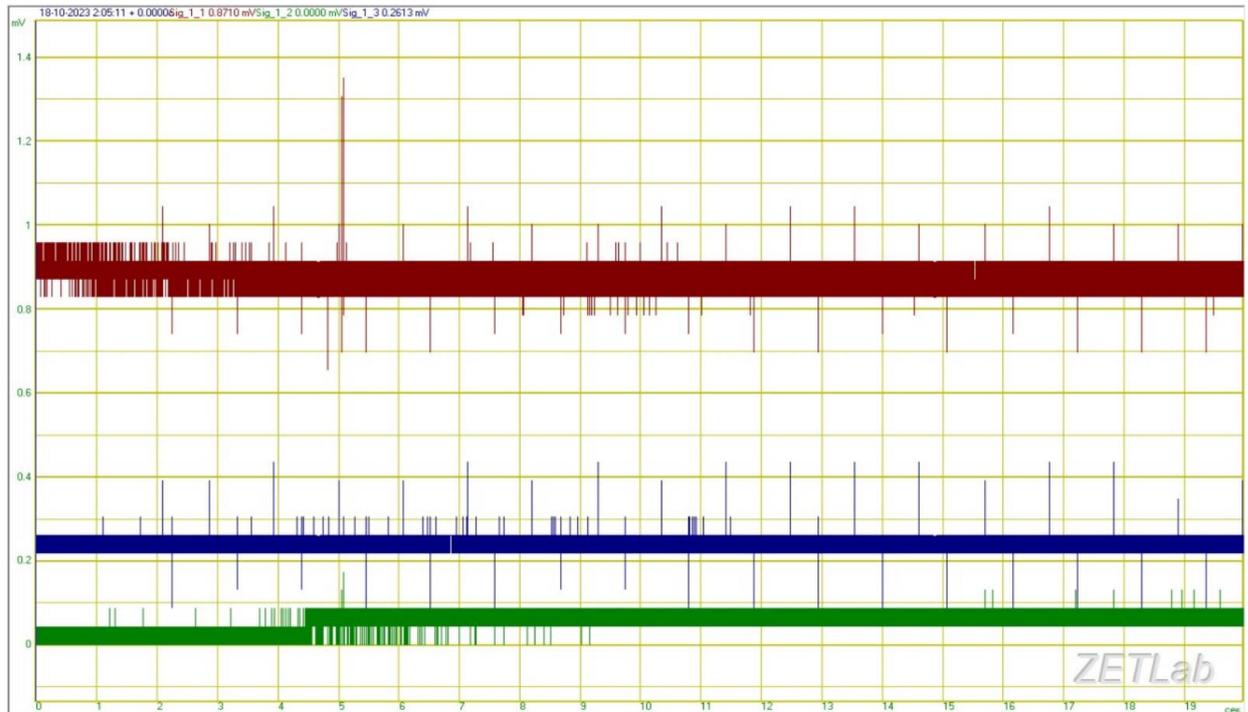


Рис. 3.22. Осциллограмма точек правого редуктора, полученная в программе ZETLAB

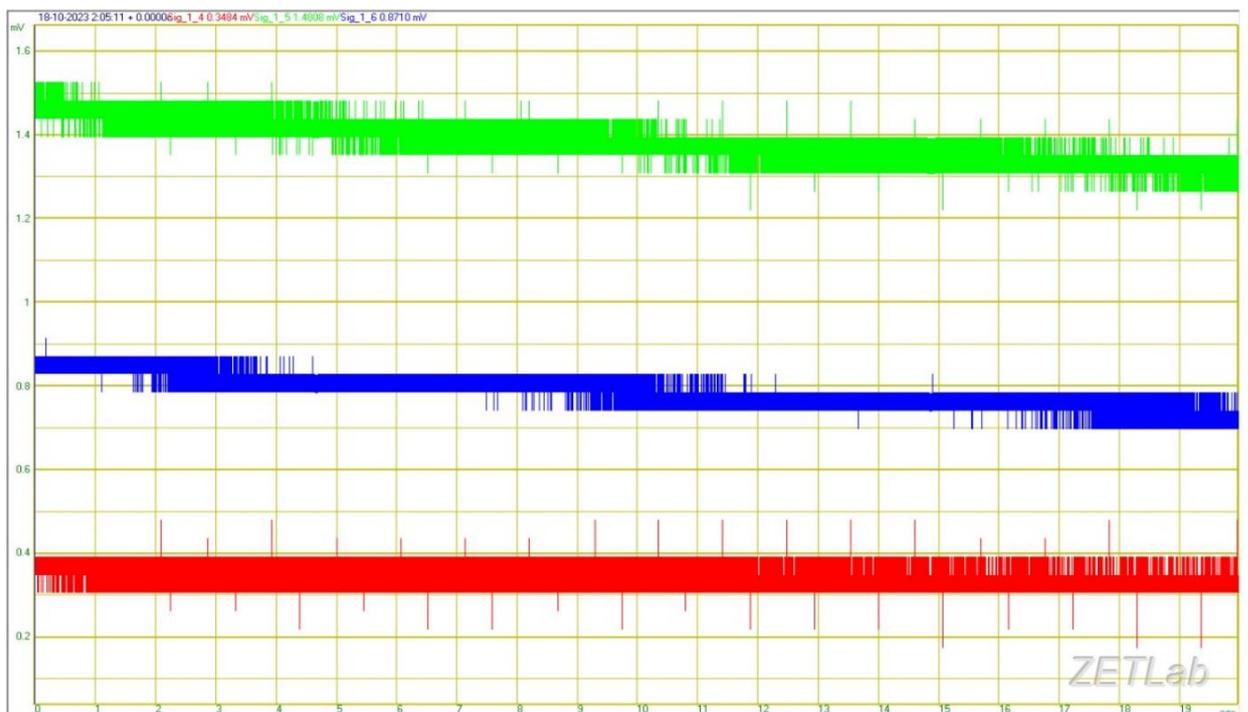


Рис. 3.23. Осциллограмма точек левого редуктора, полученная в программе ZETLAB

Обработка показаний трехэлементной тензорозетки. Трехэлементные прямоугольные тензорозетки (рис. 3.17, б) используются в тех случаях, когда хотя бы приблизительно известно направление главных напряжений на поверхности детали [104]. Датчики А и С ориентируют по этим направлениям. Для такого типа расположения тензорезисторов угловые направления датчиков имеют следующие значения  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 45$ ,  $\gamma = 90$ .

Определим место установки тензорезистора в точке на правом редукторе хода как точка 1, а место установки в точке на левом редукторе хода как точка 2. Первым этапом по результатам анализа данных определяются максимальные значения деформации по каждому датчику (для каждого канала) (табл. 3.5, ст. 3). Также записываем значения деформаций, соответствующих показанию времени 0 секунд (табл. 3.5, ст. 4). От полученных максимальных значений вычитаем значения деформации, соответствующих показанию времени 0 секунд. Таким образом, значения деформаций, используемые для дальнейших расчетов представлены в таблице 3.5, столбец 5.

Таблица 3.5

Показания деформации по каждой точке, мВ

Точка	Угол	Максимальное значение деформации $\varepsilon_{max}$	Значения деформации, соответствующих показанию времени 0 с. $\varepsilon(0)$	$\varepsilon_{max} - \varepsilon(0)$
1	2	3	4	5
1	$\varepsilon_{45}$	0,000391972	0,000217762	0,00017421
	$\varepsilon_0$	0,001263022	0,00104526	0,000217762
	$\varepsilon_{90}$	0,000130657	0,000043552	0,000087105
2	$\varepsilon_{45}$	0,001132365	0,001088812	0,000043553
	$\varepsilon_0$	0,00052263	0,00034842	0,00017421
	$\varepsilon_{90}$	0,001698547	0,001611442	0,00008711

Далее определяется направление главных напряжений для каждой точки по формуле [104]:

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \quad (3.5)$$

Для точки 1 результат  $\operatorname{tg} 2\varphi = 0,33$ , что соответствует значению углу  $18^\circ$ , что

означает, что направление главных напряжений в точке 1 будет отличаться от первоначального направления осей датчиков на  $18^\circ$ .

Для точки 2 результат  $\operatorname{tg} 2\varphi = -2$ , что соответствует значению углу  $116^\circ$ , что означает, что направление главных напряжений в точке 1 будет отличаться от первоначального направления осей датчиков на  $116^\circ$ .

Следующим этапом определяем главные относительные деформации для каждой точки по формулам:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{\min} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \quad (3.7)$$

Для точки 1:  $\varepsilon_{\max} = 0,00015244$  мВ,  $\varepsilon_{\min} = 0,00015243$  мВ.

Для точки 2:  $\varepsilon_{\max} = 0,00013067$  мВ,  $\varepsilon_{\min} = 0,00013064$  мВ.

Вычисляем главные напряжения для каждой точки по формулам:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\max} + \mu \cdot \varepsilon_{\min}) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{\min} + \mu \cdot \varepsilon_{\max}) \quad (3.9)$$

где  $E$  – модуль упругости для стали 210000 МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона, применяя к грунтам  $\mu = 0,27$  для крупнообломочных грунтов.

Для точки 1:  $\sigma_{\max} = 43,852$  МПа,  $\sigma_{\min} = 43,850$  МПа.

Для точки 2:  $\sigma_{\max} = 37,589$  МПа,  $\sigma_{\min} = 37,584$  МПа.

Последним этапом вычисляем максимальные касательные напряжения для каждой точки по формуле:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (3.10)$$

Для точки 1  $\tau_{\max} = 0,0011$  МПа, для точки 2  $\tau_{\max} = 0,022$  МПа.

### 3.4. Применение твердометрии для оценки элементов гусеничного хода карьерного экскаватора

Тяжелые условия эксплуатации карьерных экскаваторов, при которых возникают значительные динамические нагрузки на ходовое оборудование, предъявляют особые требования к их проектированию [59]. Выбор материала – один из этапов

проектирования. Каждый элемент экскаватора изготавливается из определенного материала, который должен обладать соответствующими свойствами. Одним из основных механических свойств материала является твердость. Твердость – свойство материала оказывать сопротивление при воздействии другого более твердого объекта. Измерение твердости – популярное исследование, оно необходимо, чтобы оценить качество материала, его прочность, износостойкость и особенности эксплуатации при различных условиях работы.

Одним из приборов, который можно использовать для регистрации и контроля деформаций и нагрузок, действующих на конструкцию ходового оборудования, является твердомер. Твердометрия – это метод неразрушающего контроля твердости материалов. Для экспериментальных исследований применялся твердомер модификации ТКМ-459С (рис. 3.33). Твердомер предназначен для оперативного измерения твердости металлов и металлических изделий в основных шкалах твердости – Бринелля (НВ), Роквелла (HRC), Виккерса (HV) динамическим методом [4, 67, 103].



Рис. 3.24. Ультразвуковой твердомер ТКМ-459С

Принцип действия твердомера основан на методе измерения ультразвукового контактного импеданса (UCI – ultra-sonic impedance). Основными составляющими твердомера являются датчик и электронный блок преобразования сигналов с датчика и обработки результатов измерений (рис. 3.33) [4, 67, 103]. На конце металлического стержня, входящего в состав датчика твердомера, закреплен алмазный

наконечник. Стержень колеблется на собственной резонансной частоте. При создании нагрузки рукой пользователя, алмазный наконечник внедряется в материал и изменяет резонансную частоту стержня. Изменение собственной резонансной частоты стержня пропорционально глубине внедрения наконечников в материал. Поскольку глубина внедрения наконечника в материал является показателем твердости, то существует зависимость между изменением резонансной частоты стержня  $F$  и твердостью материал  $H$ :

$$H = f(F) \quad (3.11)$$

Электронный блок твердомера осуществляет прием частотного сигнала с датчика прибора, преобразовывая его к единице твердости. Вывод результатов измерения осуществляется на дисплей. Прибор может моментально провести статистическую обработку данных, а также сохранить результат измерения твердости в память прибора, а специальное программное обеспечение Hardness позволяет вывести сохраненные блоки данных и сформировать отчет о проведении контроля твердости [4, 67, 103].

Обследование ходового оборудования ЭКГ-10 проводили в предполагаемых точках восприятия наибольших нагрузок. Рассмотрим результаты проведения эксперимента на ведущем, опорном и натяжном колесах правой гусеницы экскаватора. Места установки преобразователей показаны на рис. 3.34. Колеса ЭКГ-10 изготовлено из легированной хладостойкой стали для отливок 35ХМЛ. Такая сталь применяется для изготовления ответственных деталей, работающих под действием статических и динамических нагрузок и требующих повышенной твердости, в частности, для изготовления деталей горнометаллургического оборудования [69]. В таблице 1 приведены средние значения твердости по 15 проведенным замерам в каждой точке, показанной на рис. 3.34, по шкалам Роквелла HRC и Бринелля HB [4, 67, 103].



Рис. 3.25 Места установки преобразователей на колесах

Таблица 3.6

Результаты измерений твердости по шкалам Роквелла С, HRC и Бринелля HB

Точка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
По шкале Роквелла С, HRC	16,6	20,4	24,6	12,8	2,5	7,2	15,3	17,6	14,1
По шкале Бринелля HB, МПа	213	228	250	198	161	175	217	219	213
Точка	10	11	12	13	14	15	16	17	
По шкале Роквелла С, HRC	30,1	12,1	5,4	19,8	13,7	26,8	31,4	20,4	
По шкале Бринелля HB, МПа	262	194	168	223	197	260	269	228	

Справочная величина твердости стали 35ХМЛ по шкале Бринелля HB  $10^{-1} = 207 — 269$  МПа. По полученным результатам можно сделать вывод, что значения в точках 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16 и 17 в пределах допустимых значений твердости. А в точках 4, 11, 12 и 14 значения ниже справочных, что может говорить о снижении твердости в результате деформации колес в этих зонах [9].

А точки 5 и 6, расположенные на кулаках ведущего колеса, соответствуют зонам концентрации напряжений, что приводит к значительному механическому износу, который происходит при взаимном обкатывании двух поверхностей под нагрузкой, а также вследствие ударов [37]. В результате обкатывания или ударов на поверхности деталей появляются микро- и макротрещины с последующим

развитием их на глубину, что в дальнейшем приводит к выкрашиванию и отслаиванию металла [37]. Механической износ деталей происходит неравномерно. Детали, соприкасающейся между собой при большой скорости движения при перегоне и большой переменной нагрузке изнашиваются быстрее деталей, работающих в благоприятных условиях работы [37].

Полученные результаты соответствуют действительному состоянию элементов хода карьерного экскаватора, представленных на рис. 3.26 и в приложении 6.



Износ кулаков ведущих колес



Сколы обода ведущих колес



Износ опорных колес

Рис. 3.26. Фотофиксация абразивного изнашивания колес карьерного экскаватора ЭКГ-10 №333 ПАО «Ураласбест»

### 3.5. Определение показателей надежности ходового оборудования карьерных экскаваторов

Для оценки технической возможности и показателей работы карьерных экскаваторов по статистическим данным определяются показатели надежности [14, 30, 46, 82]:

- вероятность безотказной работы в течение требуемого времени  $P(t)$ ;
- средняя наработка до отказа  $T_0$ ;
- среднее время восстановления  $T_B$ ;
- коэффициент технического использования  $K_{Т.и.}$ ;
- коэффициент технической готовности  $K_{ТГ.}$ .

Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что технический объект не откажет в течение требуемого времени или что время  $\varepsilon$  работы до отказа объекта больше времени его функционирования [30, 82]:

$$P(t) = P(\varepsilon > t) \quad (3.12)$$

По данным об отказах, полученным из опыта эксплуатации, вероятность безотказной работы  $P(t)$  определяется по статистической оценке:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (3.13)$$

где  $N_0$  – общее число образцов, находящихся на испытании;  $N(t)$  – число исправно работающих образцов в момент времени  $t$ ,  $n(t)$  – число отказавших образцов в течение времени  $t$ . Знак \* обозначает статистическую оценку соответствующих показателей надежности [30, 82].

Основной количественной характеристикой надежности элементов является интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . В период нормальной эксплуатации машин интенсивность отказов является постоянной величиной. В этом случае вероятность безотказной работы определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.14)$$

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до отказа, по статистическим данным определяется как [14]:

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi} \quad (3.15)$$

где  $\sum_{i=1}^N t_{pi}$  – суммарное время безотказной работы (наработка) за рассматриваемый период времени эксплуатации,  $t_{pi}$  – наработка до  $i$  – го отказа (время работы между двумя отказами или между двумя периодами времени восстановления работоспособности).

Среднее время восстановления – это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта после отказа:

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N t_{vi} \quad (3.16)$$

где  $\sum_{i=1}^N t_{vi}$  – суммарное время восстановления работоспособности за рассматриваемый период эксплуатации,  $n$  – общее число отказов за период наблюдений,  $i$  – порядковый номер отказа,  $t_{vi}$  – время восстановления работоспособности машины после  $i$  – го отказа [109].

Коэффициент технического использования – это отношение к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период [30].

$$K_{т.и.} = \frac{t_{сум}}{t_{сум} + t_{обсл} + t_{рем}} \quad (3.17)$$

где  $t_{сум}$  – суммарная наработка всех наблюдаемых объектов,  $t_{обсл}$  – суммарное время простоев из-за технического обслуживания,  $t_{рем}$  – суммарное время простоев из-за ремонта.

Основным показателем, характеризующим надежность горнотранспортных машин, является коэффициент технической готовности. Коэффициент технической готовности отражает процент времени, в течение которого оборудование готово к использованию в определенный период времени. Такой коэффициент является ключевым для оценки эффективности производства или обслуживания оборудования. Он позволяет оперативно отслеживать состояние техники и предотвращать возможные простои или сбои в работе. Высокий коэффициент технической готовности свидетельствует о хорошем уровне поддержки техники, а также организованности и профессионализме персонала, занимающегося обслуживанием.

Для горнотранспортного оборудования коэффициент технической готовности отражает процент времени, в течение которого машина находится в рабочем состоянии и не требует ремонта или замены деталей, и определяется как отношение разности календарного фонда времени и фактического времени ремонтных простоев к календарному фонду времени оцениваемого периода [111, 113]:

$$K_{\text{ТГ}} = \frac{T_{\text{КФВ}} - T_{\text{Ф.РЕМ}}}{T_{\text{КФВ}}} \quad (3.18)$$

где  $K_{\text{ТГ}}$  — коэффициент технической готовности,  $T_{\text{КФВ}}$  — календарный фонд времени;  $T_{\text{Ф.РЕМ}}$  — фактическое время простоев экскаватора на ремонтах и в ожидании ремонтов.

По данным рудоуправления предприятия ПАО Ураласбест из отчета по затратам на ремонт карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 определены коэффициенты готовности. Результаты приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Значения коэффициента технической готовности карьерно экскаватора ЭКГ-10 № 333 по ходовому оборудованию

Период	Календарный фонд времени, ч, $T_{\text{КФВ}}$	Фактическое время простоев экскаватора, ч, $T_{\text{Ф.РЕМ}}$	Коэффициент технической готовности, $K_{\text{ТГ}}$
С 01.01.2020 по 01.04. 2022 г. г.	17974	265,83	0,985
С 01.04.2022 по 31.08. 2023 г. г.	10758	126,66	0,988

Графики зависимостей коэффициентов технической готовности ходового оборудования за каждый период времени (рис. 3.27, 3.28) построены с использованием приложения, входящего в пакет прикладных программ Microsoft Office, а именно табличного процессора Excel. Анализ построенных зависимостей показал, что наибольшая величина достоверности аппроксимации  $R^2$  будет при полиномиальной зависимости пятой степени за оба рассмотренных временных периода (табл. 3.8).

Итоговые зависимости коэффициентов технической готовности  
ходового оборудования от времени работы

Период	Уравнение зависимости	Величина достоверности аппроксимации $R^2$
С 01.01.2020 по 01.04.2022 г. г.	$K_{ТГ} = -2E - 10T_{КФВ}^2 + 1E - 0,6T_{КФВ} + 0,9914$	0,7016
С 01.04.2022 по 31.08.2023 г. г.	$K_{ТГ} = -3E - 10T_{КФВ}^2 + 1E - 0,0003x + 0,9976$	1

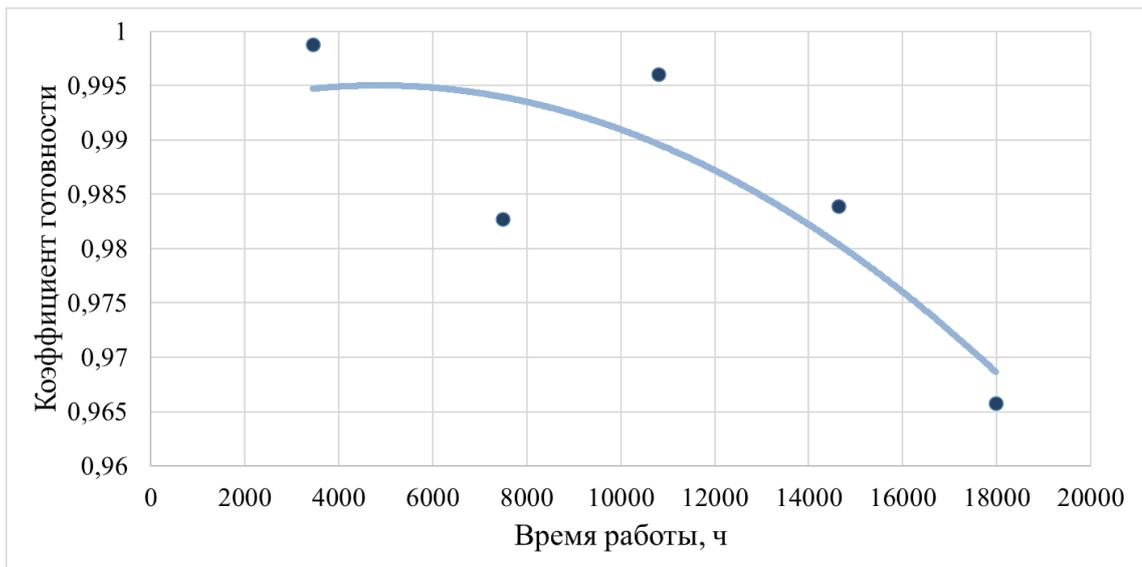


Рис. 3.27. Зависимость коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.01.2020 по 01.04.2022 г. г.

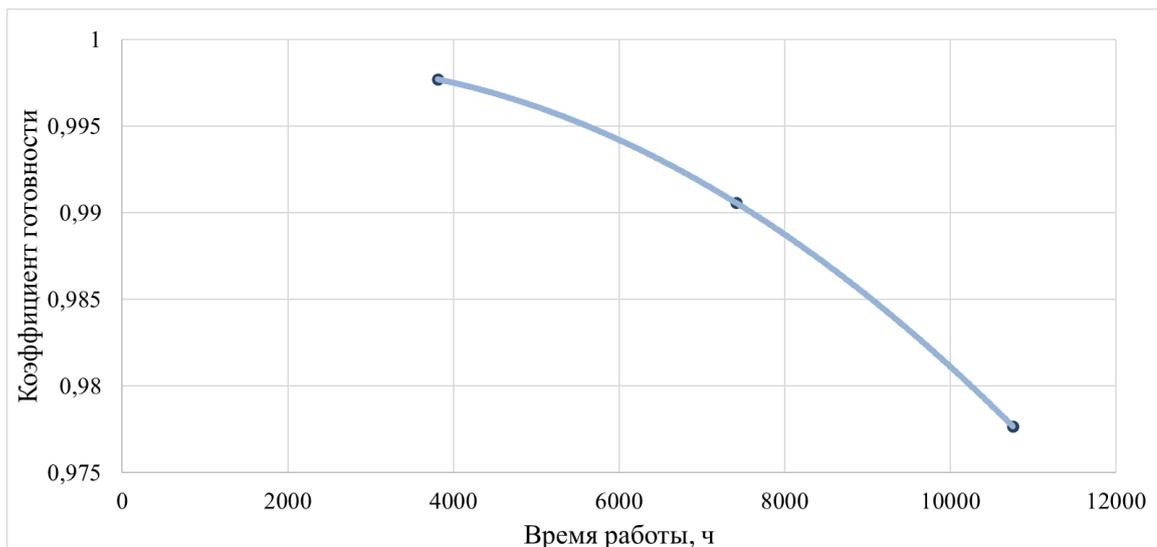


Рис. 3.28. Зависимость коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.04.2022 по 31.08.2023 г. г.

Коэффициент технической готовности может быть повышен путем внедрения современных технологий мониторинга и диагностики оборудования, а также обучение персонала по эффективному использованию и обслуживанию техники, что позволит поднять эффективность работы предприятия, снизить затраты на ремонт, а также улучшить качество производства.

Повышение эффективности функционирования карьерного экскаватора напрямую зависит от производительности. Под производительностью понимается объем горной массы, перемещаемой из забоя в отвал или погруженной в транспортное средство в единицу времени. Для увеличения производительности экскаватора необходимо обеспечить его надежную работу, своевременное техническое обслуживание и оперативное устранение неисправностей.

Производительность экскаватора с учетом простоев, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом экскаватора, определяется по формуле:

$$W_{\text{экспл}} = \frac{(T_{\text{КФВ}} - T_{\text{Ф.РЕМ}}) \cdot E \cdot K_{\text{н}}}{T_{\text{ц}} \cdot K_{\text{р}}}, \text{ м}^3/\text{час} \quad (3.19)$$

где:  $E = 10$  – вместимость ковша карьерного экскаватора ЭКГ-10,  $\text{м}^3$ ;  $K_{\text{н}} = 0,84$  – коэффициент наполнения ковша;  $T_{\text{ц}} = 26$  – длительность цикла карьерного экскаватора ЭКГ-10, с;  $K_{\text{р}} = 1,5$  – коэффициент разрыхления породы в ковше [2, 47].

По данным рудоуправления предприятия ПАО Ураласбест из отчета по затратам на ремонт карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 определены производительность за каждый рассматриваемый период. Результаты приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9

Производительность карьерно экскаватора ЭКГ-10 № 333 по ходовому оборудованию

Период	Календарный фонд времени, ч $T_{\text{КФВ}}$	Фактическое время простоев экскаватора, ч $T_{\text{Ф.РЕМ}}$	Производительность, $\text{м}^3/\text{период}$
С 01.01.2020 по 01.04. 2022 г. г.	17974	265,83	510421
С 01.04.2022 по 31.08. 2023 г. г.	10758	126,66	309127

Графики зависимости производительности от коэффициентов технической готовности ходового оборудования за каждый период примут вид, показанный на

рис. 3.29, 3.30. Анализ построенных зависимостей показал, что наибольшая величина достоверности аппроксимации  $R^2$  будет при линейной зависимости за оба рассматриваемых периода (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Итоговые зависимости коэффициентов технической готовности ходового оборудования за каждый рассматриваемый период

Период	Уравнение зависимости	Величина достоверности аппроксимации $R^2$
С 01.01.2020 по 01.04. 2022 г. г.	$W_{\text{экспл}} = 3E + 07K_{\text{тг}}^2 - 7E + 07K_{\text{тг}} + 3E + 07$	0,996
С 01.04.2022 по 31.08. 2023 г. г.	$W_{\text{экспл}} = 3E + 06K_{\text{тг}}^2 - 6E + 06K_{\text{тг}} + 3E + 06$	1

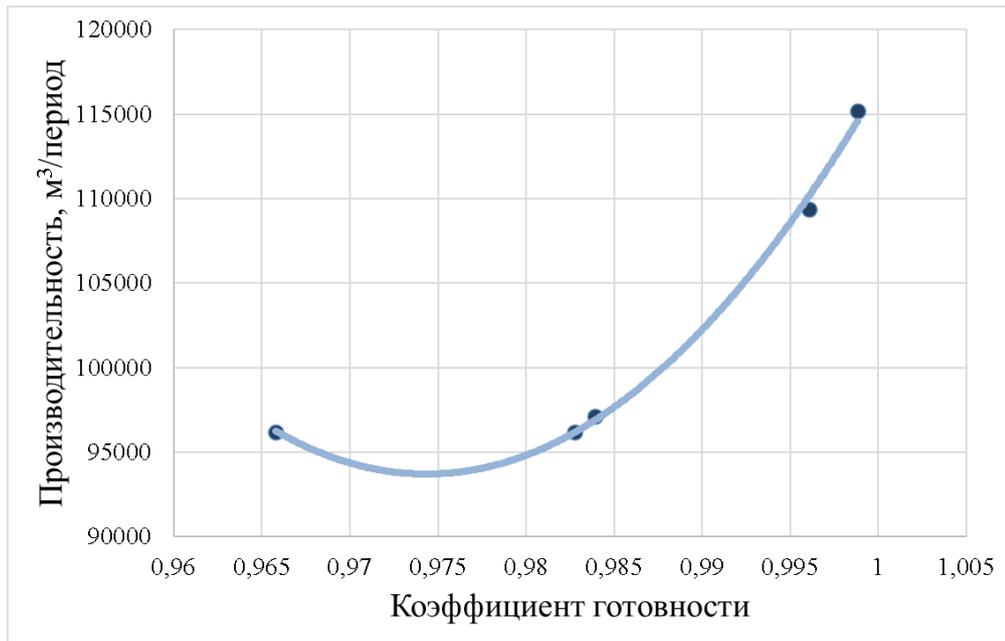


Рис. 3.29. Зависимость производительности от коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.01.2020 по 01.04.2022 г. г.

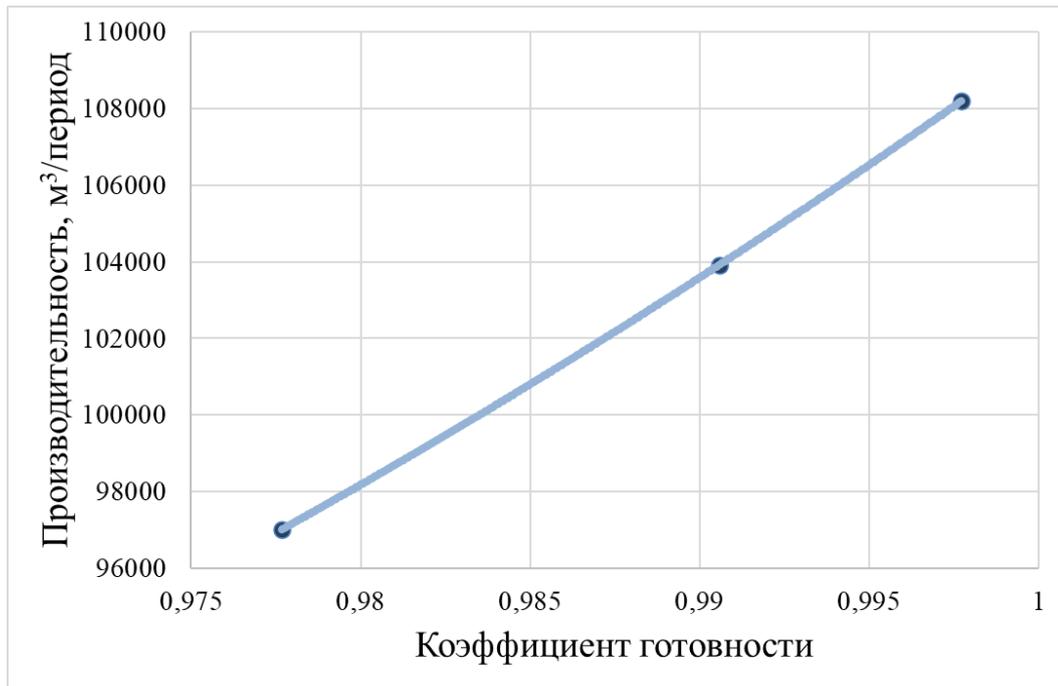


Рис. 3.30. Зависимость производительности от коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.04.2022 по 31.08.2023 г. г.

Таким образом, производительность карьерного экскаватора зависит от коэффициента технической готовности и возрастает с увеличением межремонтного периода ходового оборудования карьерного экскаватора.

Для повышения надежности работы экскаваторов необходимо проводить профилактические и предупредительные ремонтные работы во время простоев, а также в периоды ожидания загрузки, которые являются основной частью запланированных простоев.

Одним из способов повышения надежности карьерного экскаватора, повышение его работоспособности, а также обеспечения высокой производительности является регулярное проведение системы технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) в соответствии с системой планово-предупредительных ремонтов и ремонтным циклом. Основные цели ТОиР:

- обеспечение безопасной эксплуатации оборудования,
- предотвращение отказов, преждевременного износа, аварий и простоев оборудования и профилактика,
- рациональная минимизация затрат в процессе эксплуатации и ремонта.

Для карьерных одноковшовых экскаваторов предусмотрена следующая структура технического обслуживания и ремонтного цикла [44, 90]:

В – ТО – Т1 – ТО – Т1 – ТО – Т1 – ТО – Т2 – ТО – Т1 – ТО – Т1 – ТО – Т1  
– ТО – Т3 ... К

где В – введение в эксплуатацию экскаватора; ТО – межремонтное техническое обслуживание, включающее ежесменное (ЕО), еженедельное (НО), ежемесячное (МО) и сезонное (30); Т1 – текущий ремонт № 1; Т2 – текущий ремонт № 2; Т3 – текущий ремонт № 3; К – капитальный ремонт [47].

Рассмотрен годовой график для проведения технического обслуживания и ремонта, рекомендованный заводом-изготовителем:

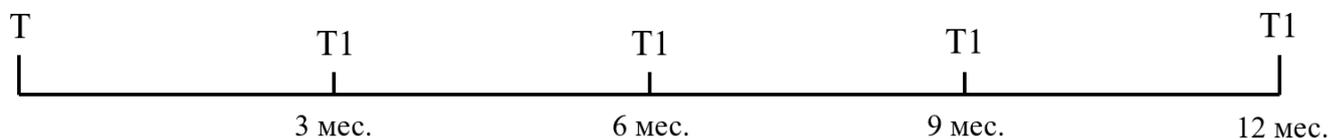


Рис. 3.31. Годовой график ТОиР карьерного экскаватора

Для того чтобы предприятия могли максимально эффективно использовать экскаваторы и продлить их срок службы, необходимо строго соблюдать все рекомендации завода-изготовителя по эксплуатации и обслуживанию оборудования и руководствоваться регламентирующей документацией. Это включает в себя проведение регулярных технических осмотров, проведение диагностики методами неразрушающего контроля, своевременную замену изношенных деталей, использование высококачественных смазочных материалов и технических жидкостей.

Но, сложившаяся практика эксплуатирующих карьерные экскаваторы предприятий, показывает, что предприятия зачастую проводят ТО с учетом интенсивности рабочего процесса, изнашивания деталей и механизмов экскаватора, что не соответствует регламенту и рекомендациям завода-изготовителя. Как итог, это приводит к преждевременному износу и поломкам оборудования, а также к увеличению затрат на техническое обслуживание и ремонт. Важно понимать, что карьерные экскаваторы — это сложная техническая система, которая требует грамотного ухода и обслуживания [47].

Поэтому автором предлагается новая структура ремонтного цикла:

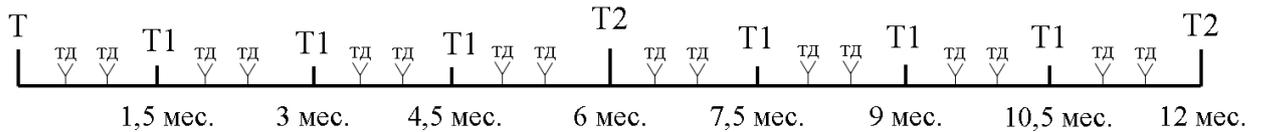


Рис. 3.32. Предлагаемый годовой график ТОиР карьерного экскаватора:

T1 – текущий ремонт № 1; T2 – текущий ремонт № 2;

тд – проведение технической диагностики

Также предлагается внедрить в структуру ТОиР применение методов неразрушающего контроля для быстрой диагностики дефектов в элементах ходового оборудования. Например, рекомендуется каждые три недели использовать вибродиагностический метод для оценки эффективной работоспособности редукторов хода карьерного экскаватора, а также метод твердометрии для контроля твердости материала колес, предупреждая о развитии напряжений в металле.

### 3.6. Результаты проведения экспериментальных исследований

На основании планирования эксперимента по результатам известных методик, рассмотренных во второй главе, были проведены экспериментальные исследования на ходовом оборудовании карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 предприятия ПАО «Ураласбест».

Для исследования надежности ходового оборудования карьерного экскаватора были применены:

- вибродиагностический и тензометрический методы для оценки надежности редукторов гусеничного хода;
- метод твердометрии для оценки ведущих, опорных и натяжных колес.

По результаты **вибродиагностического метода** было выявлено:

- уровень виброскорости и виброускорения в спектрах левого редуктора свидетельствует о недостаточности объема масла в редукторе или о деградации смазочных свойств масла, однако аварийное состояние анализом спектра не подтверждено;
- в спектрах правого редуктора в замерной точке Т6 замечен повышенный уровень вибрации с модуляционным рядом частотой 431,25 Гц с полосой частот

около 11,25 Гц, по форме модуляционного ряда он указывает на дефект износа зубчатого колеса.

Анализ спектров показал, что разрешающей способности прибора ViPen недостаточно для проведения детального анализа спектров вибрационных показателей. Для конкретизации корневых причин повышенной вибрации оборудования необходимо проведение дополнительных измерений с использованием приборов с повышенной разрешающей способностью, имеющих не менее 1600 линий в диапазоне от 2 до 1000 Гц, что позволит уменьшить ширину линий в спектре до 0,62 Гц и повысит детализацию получаемых сигналов. Ширина линии использованного прибора ViPen меньше скорости вращения элементов второй ступени редуктора (3,72 Гц и 2,7 Гц соответственно) поэтому определение виброметром ViPen дефектов в элементах далее 2-й ступени редуктора возможно только путём мониторинга определённой полосы частот, характерной для выявленного дефекта и мониторинга общего уровня вибрации в агрегате [81].

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что только в одном случае из четырёх высокий уровень СКЗ параметра вибрации нашёл подтверждение при анализе спектров. Несмотря на низкую разрешающую способность принятого прибора, такой результат свидетельствует о необходимости использовать не только замеры скалярных показателей, таких как виброскорость, виброускорение, но и производить анализ спектров параметров вибрации с максимально возможной разрешающей способностью оборудования [81].

По результатам проведения **тензометрических испытаний** наибольшее значение главных напряжений  $\sigma_{\max} = 43,85$  МПа было выявлено в точке правого редуктора хода. Результаты были получены в условиях, аналогичных тем, которые были приняты при планировании эксперимента:

- фракция куска породы внутрикарьерной дороги на рабочей площадке экскаваторного забоя от 50 до 80 мм по толщине;
- коэффициент крепости породы внутрикарьерной дороги на рабочей площадке экскаваторного забоя, в месте проведения эксперимента от 8 до 11 по шкале Протоdjяконова;

- скорость движения экскаватора во время проведения экскаватора была от 0,1 до 0,14 м/с;
- уклон рабочей площадки от 2 до 4 °;
- опыт и практические навыки машиниста экскаватора определялись коэффициентом управления от 0,81 до 0,94.

Для определения величин деформаций (напряжений) в элементах ходового оборудования карьерного экскаватора разработана методика экспериментальных исследований (рис. 3.33) и предложена информационно-измерительная система подключения трехэлементных тензорозеток к тензометрической станции с автономным источником питания (рис. 3.15).

По результатам экспериментальных исследований определены векторы главных напряжений и максимальные касательные напряжения, измеренные на редукторах правого и левого гусеничного хода. Установлено, что основной причиной силовой нагруженности ходовой части являются места концентрации напряжений в металле, приобретенные в процессе изготовления и увеличивается при функционировании экскаватора в процессе экскавации горных пород. Важными элементами, влияющими на нагрузку ходового оборудования, являются планировка экскаваторной площадки в соответствии с паспортом забоя, формирование и сооружение внутрикарьерных дорог в соответствии с правилами безопасности, а также учет физико-механических свойств полезного ископаемого и вмещающих горных пород [68].

При выемке горных пород карьерным экскаватором с рабочим оборудованием типа прямая лопата напряженно-деформированное состояние металлоконструкций ходовой тележки существенно изменяются в пределах рабочих режимов экскаватора, что обусловлено, в основном, как ростом усилия подъема, так и увеличением нагрузки в моменты разворота рабочего оборудования экскаватора [60, 77].

Проведенные экспериментальные исследования редукторов хода левой и правой гусеничных рам с применением методов тензометрии и вибродиагностики показали, что присутствует дефект износа зубчатого колеса правого редуктора

хода, что согласуется с результатами данных предприятия ПАО «Ураласбест», на котором в январе 2023 года проводился ремонт левого редуктора хода, поэтому не было зафиксировано дефектов. Обнаруженный дефект в редукторе правой гусеничной рамы говорит о необходимости проведения ремонтных воздействий.

**Метод твердометрии** для оценки состояния колес гусеничного хода карьерного, показал результаты, соответствующие их действительному состоянию. Следовательно, целесообразно применять метод для определения срока службы и прогнозирования технического обслуживания колес и элементов металлоконструкций карьерных экскаваторов.

Результаты проведенных исследований показали хорошую сходимость и нашли подтверждение действительному состоянию элементов ходового оборудования карьерного экскаватора. Поэтому предлагается методика проведения диагностического исследования, представленная на рис. 3.33.

Проведен статистический анализ предоставленных ПАО «Ураласбест» данных и результатов экспериментальных исследований, позволяющий выявить наиболее часто встречающиеся проблемы и неисправности, которые могут привести к выходу оборудования из строя. Это позволяет оперативно принимать меры по предотвращению подобных ситуаций и обеспечению бесперебойной работы экскаваторов. Кроме того, анализ показателей помогает оптимизировать расходы на техническое обслуживание и ремонт, путем выявления наиболее эффективных методов и стратегий обслуживания оборудования.

Рассчитаны коэффициенты технической готовности по ходовому оборудованию за каждый рассматриваемый период из отчета ПАО «Ураласбест», установлено, что коэффициент технической готовности с наибольшей величиной достоверности аппроксимации  $R^2$  имеет полиномиальную зависимость второй степени вне зависимости от рассматриваемого периода.

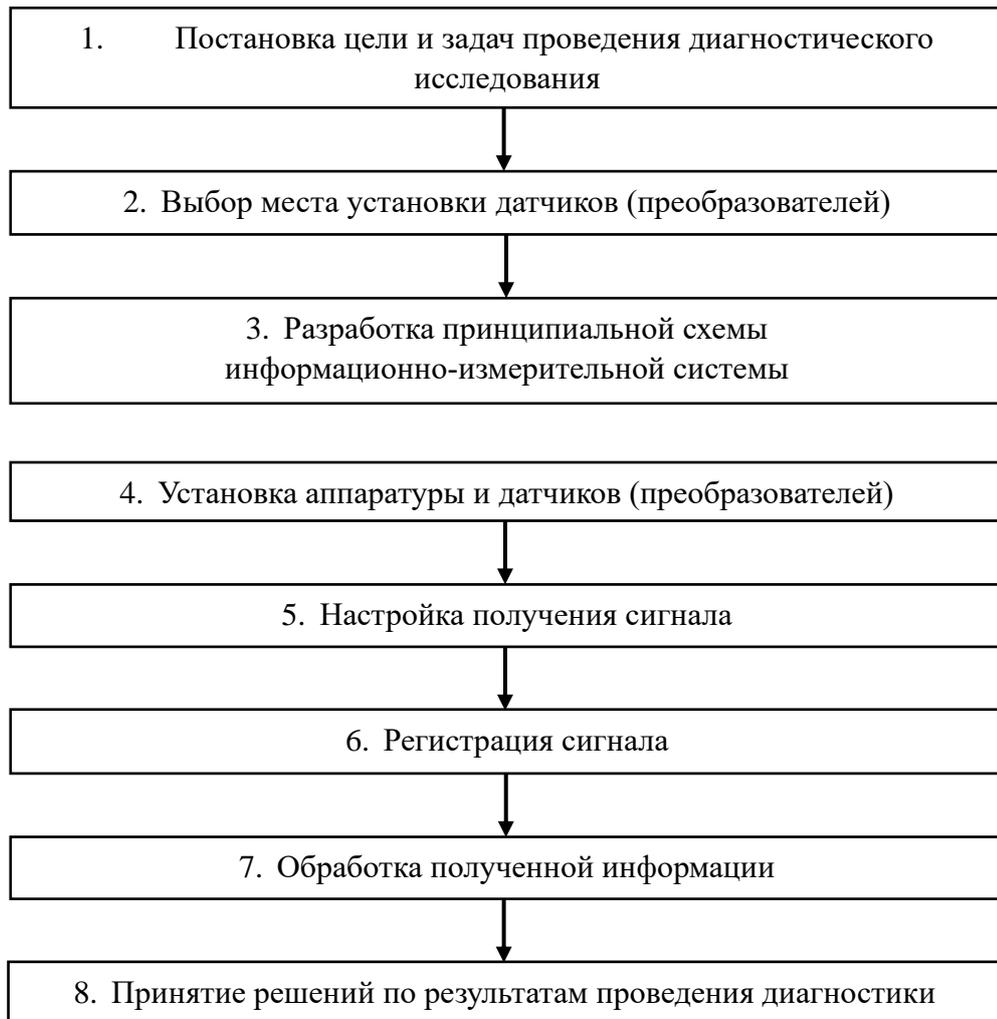


Рис. 3.33. Блок-схема методики проведения диагностического исследования ходового оборудования карьерного экскаватора

Также определена производительность карьерного экскаватора с учетом простоев, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом. Сделан вывод, что производительность карьерного экскаватора определяется коэффициентом готовности и повышается с увеличением межремонтного периода. Чем дольше экскаватор функционирует без необходимости проведения ремонта, тем более эффективно он выполняет свои функции, обеспечивая высокий уровень производительности и экономическую эффективность его эксплуатации. Следовательно, эффективное планирование и контроль периодичности технического обслуживания и ремонта экскаватора являются ключевыми аспектами обеспечения эффективной работы этого оборудования на карьере.

Проведение регулярных органолиптических осмотров и тщательное следование рекомендациям по эксплуатации являются ключевыми мерами для обеспечения

высокой надежности работы карьерных экскаваторов. Эффективное планирование профилактических работ и ремонтных мероприятий позволяет рационально минимизировать простои и обеспечивать бесперебойную работу экскаваторов в течение всего производственного процесса.

Предложен новый годовой график технического обслуживания и ремонта, включающий проведение диагностики элементов ходового оборудования карьерного экскаватора с применением методов неразрушающего контроля.

Все вышперечисленные меры и подходы не только улучшают надежность работы карьерных экскаваторов, но и способствуют повышению производительности и эффективности производственного процесса в целом. Постоянный мониторинг и анализ показателей работы оборудования позволяют оперативно реагировать на изменения и проводить необходимые корректировки в работе экскаваторов, с целью обеспечения их бесперебойной и эффективной работы.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ВЕДУЩЕЕ КОЛЕСО ГУСЕНИЧНОГО ХОДА КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Ведущие колеса (рис. 4.1) гусеничного ходового оборудования одноковшового карьерного экскаватора с прямой лопатой – это ключевой элемент механизма хода, обеспечивающий движение машины по неровной местности и повышающий проходимость в сложных условиях эксплуатации. Благодаря гусеницам и ведущим колесам экскаватор может свободно передвигаться по грунту, устойчиво стоять на месте и поднимать тяжелые грузы с минимальными потерями мощности. Эти элементы конструкции экскаватора обеспечивают необходимый контакт с грунтом, обеспечивая надежную работу машины в условиях тяжелых нагрузок и интенсивной эксплуатации.



Рис. 4.1. Ведущее колесо гусеничного хода карьерного экскаватор ЭКГ-10

Ведущие колеса гусеничного ходового оборудования также играют важную роль в обеспечении устойчивости и безопасности работы экскаватора. Они позволяют машине удерживать равновесие при выполнении различных операций, таких как экскавация, погрузка или транспортировка материалов. Благодаря правильной

конструкции и настройке ведущего колеса, экскаватор может эффективно выполнять свои функции даже в условиях высокой нагрузки и сложной территории.

Кроме того, ведущие колеса играют важную роль в передаче мощности от двигателя к другим подсистемам машины. Это позволяет экскаватору работать более эффективно и экономично, минимизируя потери энергии и обеспечивая плавное и стабильное движение. Правильная эксплуатация и техническое обслуживание ведущих колес позволяет увеличить срок службы экскаватора и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Также, ведущие колеса гусеничного ходового оборудования являются ключевыми элементами, которые определяют не только производительность и надежность экскаватора, но и комфорт работы оператора. Правильно подобранные ведущие колеса обеспечивают плавное и точное управление машиной, что значительно упрощает выполнение сложных задач и увеличивает производительность труда. Таким образом, ведущие колеса являются неотъемлемой частью конструкции экскаватора, обеспечивая его эффективную работу и долгий срок службы.

Важно отметить, что качество и состояние ведущих колес также влияют на общую производительность и безопасность работы экскаватора. Поэтому регулярная проверка и техническое обслуживание этих элементов ходового оборудования являются необходимыми мерами для поддержания его работоспособности. Незначительные износы или дефекты ведущих колес могут привести к снижению эффективности функционирования (работы) экскаватора, а в некоторых случаях и к серьезным аварийным ситуациям.

Инновационные технологии и материалы, используемые при производстве ведущих колес, также имеют значительное значение для повышения производительности и надежности экскаватора. Современные конструкции колес обеспечивают лучшую адаптацию к различным типам грунта и условиям эксплуатации, что позволяет машине работать более эффективно и экономично. В целом, ведущие колеса гусеничного ходового оборудования играют ключевую роль в обеспечении успешной и безопасной работы экскаватора, что делает их одним из наиболее важных элементов этой мощной техники.

На основании результатов экспериментальных исследований с применением твердометрии, рассмотренные в главе 3.3, был сделан вывод, что ведущие колеса подвергаются механическому и абразивному износу, в результате чего основными дефектами являются износы кулаков и сколы обода ведущих колес, что делает необходимым изучение и совершенствование конструкций ведущего колеса гусеничного хода карьерного экскаватора.

Для расчета нагрузок, действующих на ведущее колесо, в программе трехмерного проектирования КОМПАС-3D по геометрическим размерам создана 3D-модель ведущего колеса (рис. 4.2) и для дальнейших расчетов сохранена в формат .step.

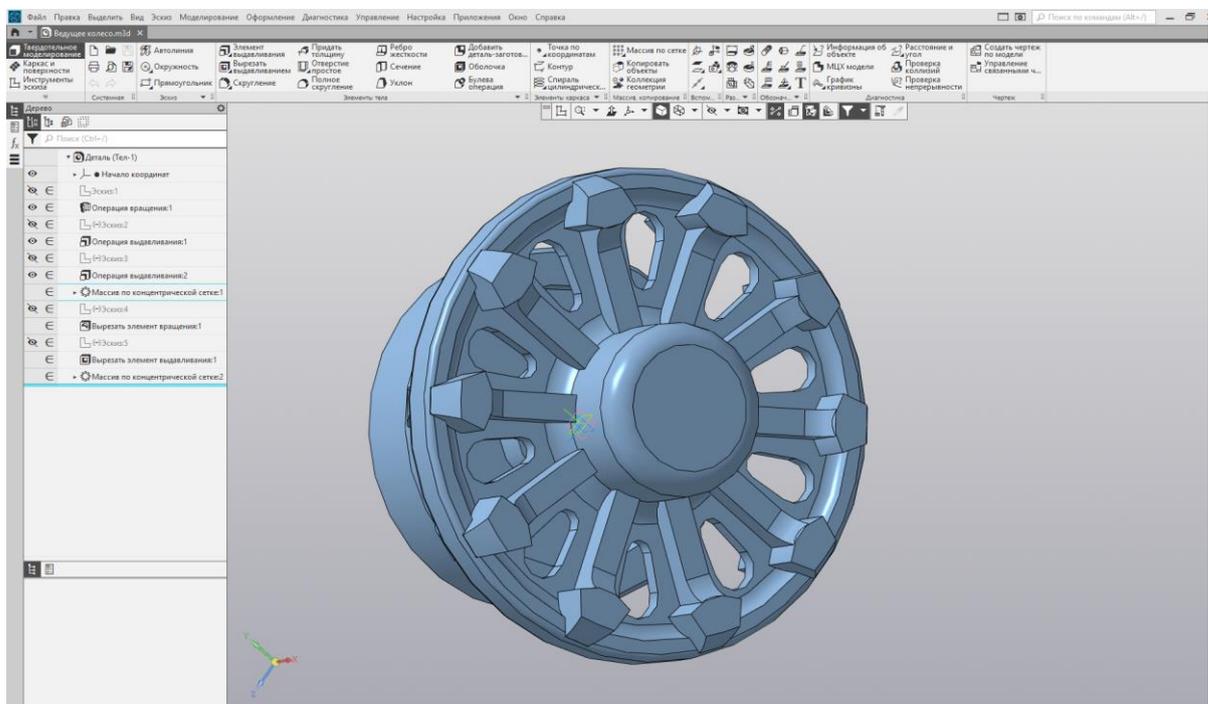


Рис. 4.2. 3D-модель ведущего колеса

#### 4.1. Расчет нагрузок на ведущее колесо в среде APM WinMachine

Для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния было решено использовать отечественное программное обеспечение APM WinMachine. - CAD/CAE система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения [92]. Эта система предназначена для автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций в области машиностроения и строительства. Технология APM WinMachine основана на использовании современных математических и

численных методов, программирования, а также теоретических и экспериментальных инженерных решений, что обеспечивает высокую точность расчетов и надежность получаемых результатов. Благодаря удобному и интуитивно понятному интерфейсу пользователи могут легко настраивать и проводить различные расчеты без необходимости в глубоких знаниях математики и программирования [108].

Одним из основных преимуществ APM WinMachine является возможность проведения комплексного анализа не только напряженно-деформированного состояния, но и других физических параметров, таких как температура, деформации, динамика и т.д. Это позволяет инженерам и проектировщикам получить более полное представление о поведении конструкции в условиях реальной эксплуатации. Также APM WinMachine обеспечивает возможность проведения оптимизации параметров конструкций, что позволяет снизить затраты на проектирование и повысить качество и надежность готового изделия.

Для расчета нагрузок ведущего колеса применен модуль APM Studio (импорт и экспорт 3D модели ведущего колеса, закрепление кулачков, приложение распределенного момента, разбиение модели для построения конечно-элементной сетки) и модуль APM Structure3D (анализ трехмерной модели методом конечных элементов) [3, 35, 76].

Порядок проведения расчетов представлен в блок-схеме на рисунке 4.3.

Для расчета нагрузок, действующих на ведущее колесо гусеничного хода карьерного экскаватора, рассмотрим два расчетных положения приложения нагрузок.

Общие параметры загрузки:

- крутящий момент, передающийся на ведущее колесо  $M_{кр} = 1146 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- сила тяжести экскаватора, рассмотрим вариант, когда экскаватор стоит на площадке с уклоном и сила тяжести приходится на 4 колеса, тогда  $G_э = 968737,5 \text{ Н}$ ;
- закрепление колеса – разрешается вращение, но запрещается перемещение;
- материал ведущего колеса легированная хладостойкая сталь для отливок 35ХМЛ.

Порядок проведения расчетов представлен в блок-схеме на рисунке 4.3.

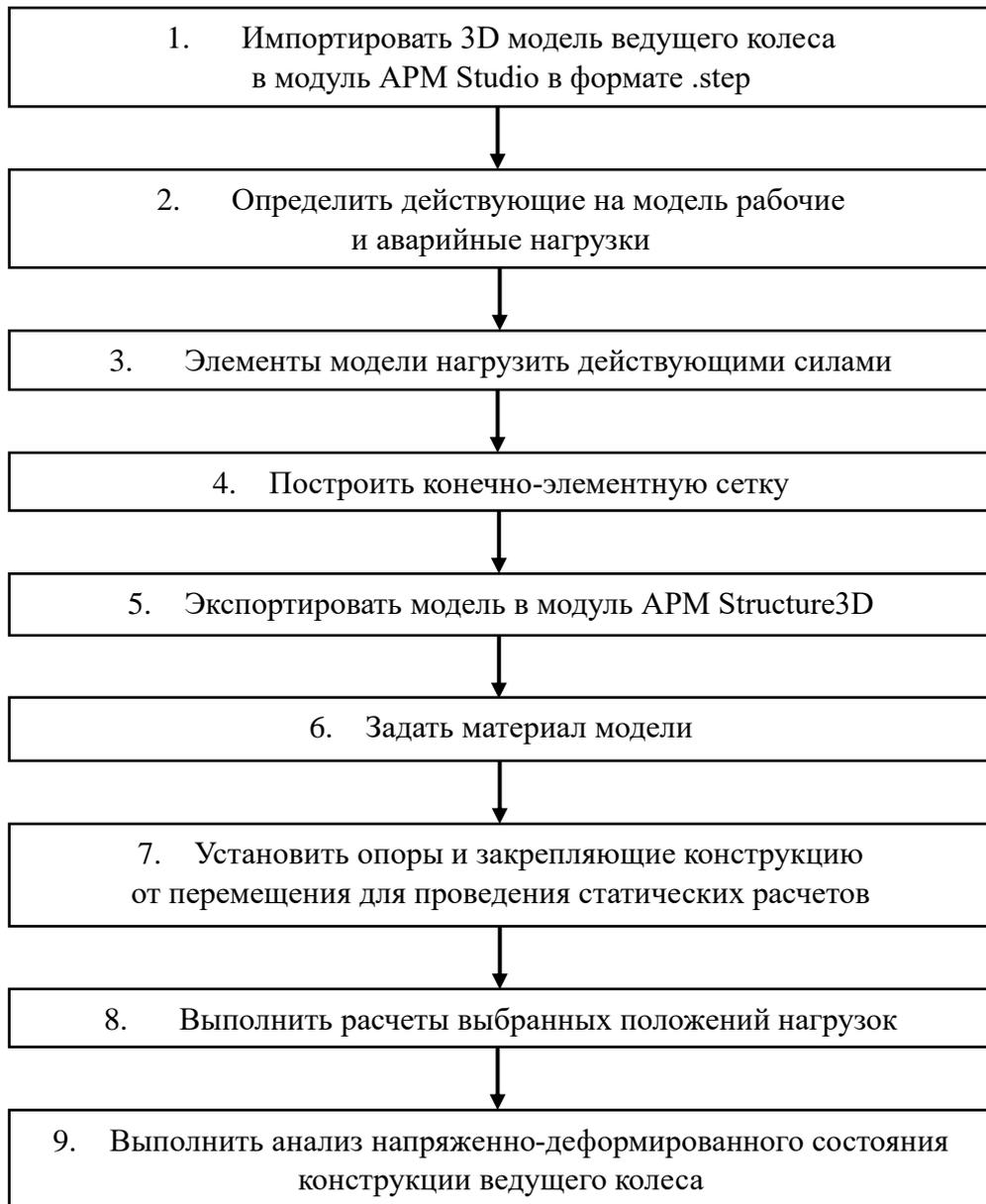


Рис. 4.3. Блок схема проведения расчета в APM WinMachine

Первый вариант расчетного положения, когда фиксируется 4 кулачка, на которые приходятся нагрузки при перемещении экскаватора.

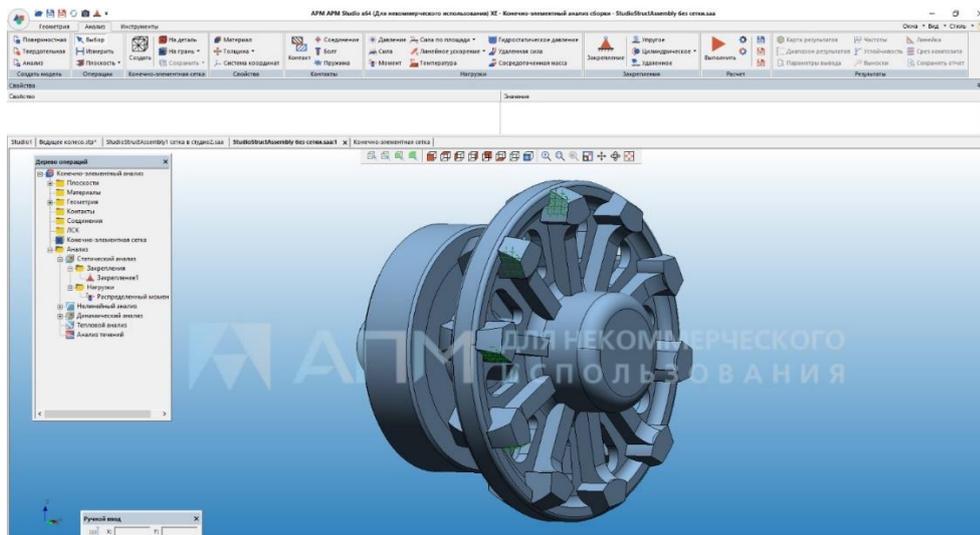


Рис. 4.4. Закрепление в модели 4 кулачков ведущего колеса

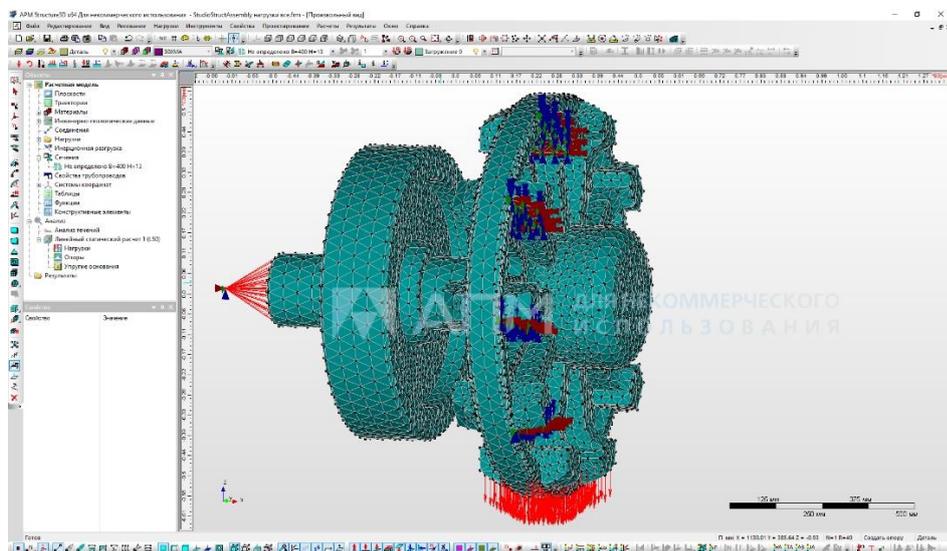


Рис. 4.5. Модель с приложением всех нагрузок

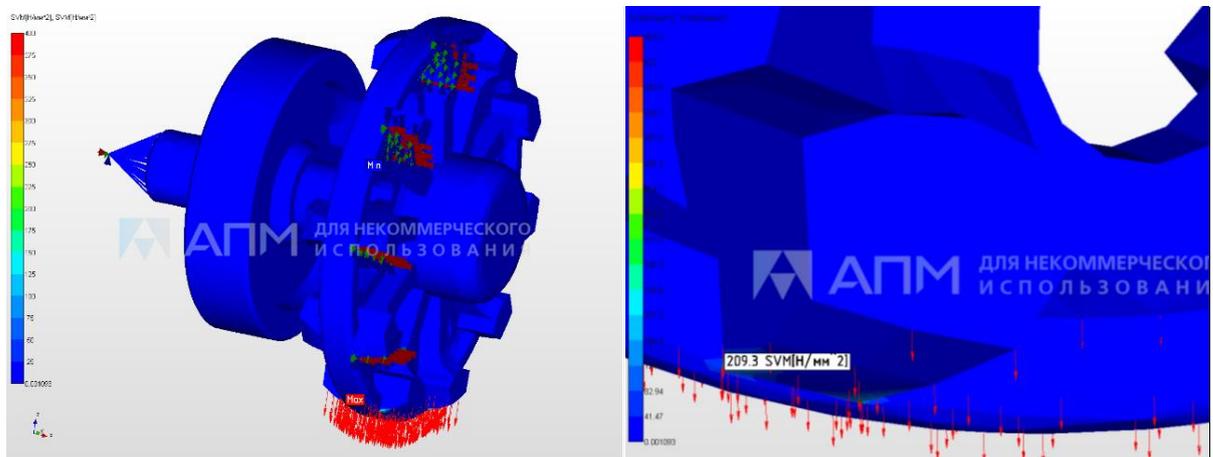


Рис. 4.6. Результаты статических расчетов напряженно-деформированного состояния ведущего колеса

Вывод по первому расчетному положению: основные зоны концентрации напряжений приходятся на кулачки с нагрузкой от силы тяжести экскаватора – максимальное напряжение 209 МПа, напряжение в металле на кулачках незначительны для применяемого материала колеса – 32 МПа.

Второй вариант фиксирует один кулачок, на который приходится вся нагрузка при перемещении экскаватора. Возникает ситуация заклинивания, когда экскаватор наезжает на крупный кусок породы, что приводит к стопорению ведущего колеса при попытке преодоления препятствия.

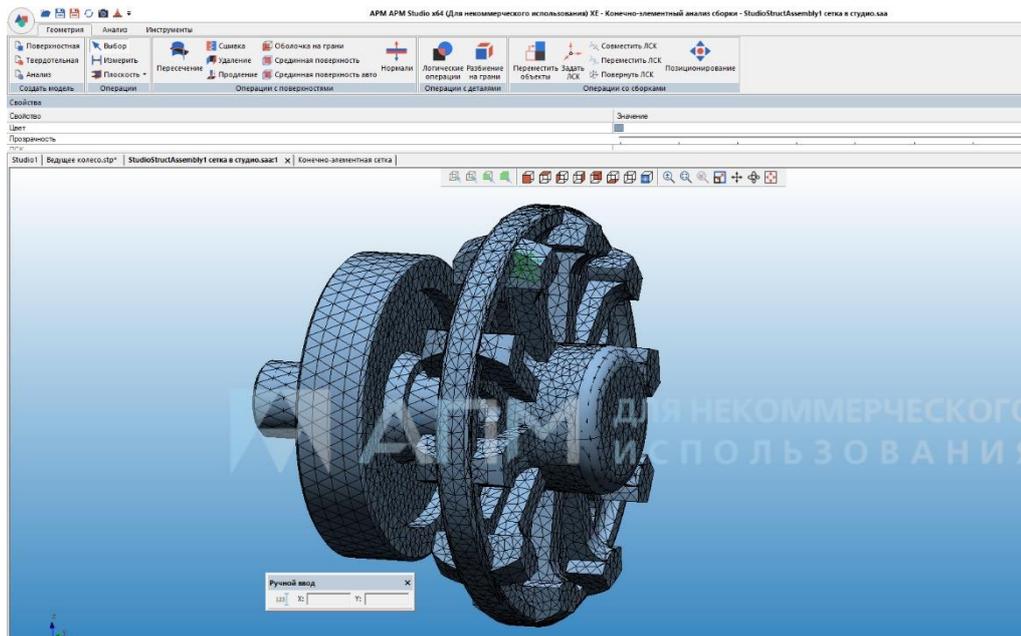


Рис. 4.7. Закрепление в модели 4 кулачков ведущего колеса

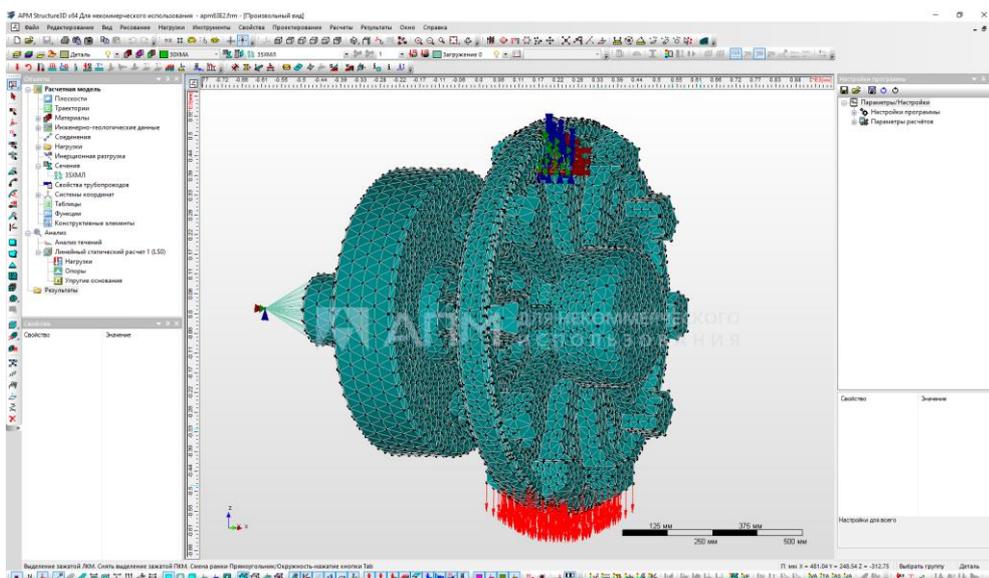


Рис. 4.8. Модель с приложением всех нагрузок

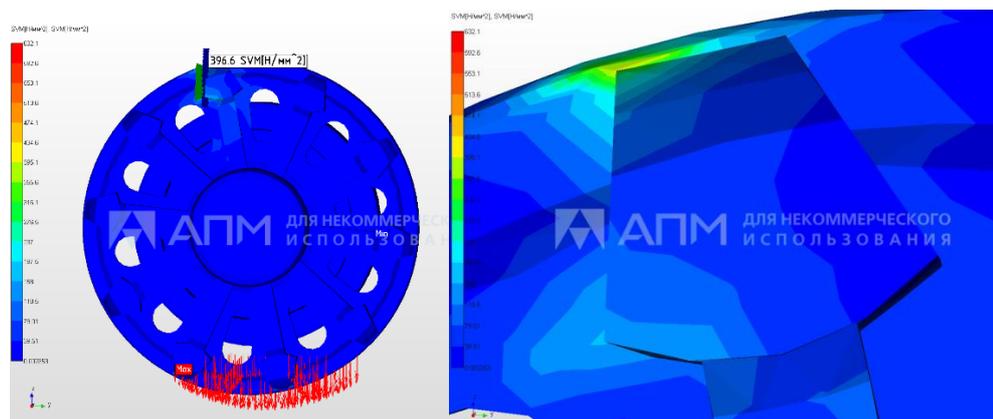


Рис. 4.9. Результаты статических расчетов напряженно-деформированного состояния ведущего колеса

Этот вариант закрепления кулачка может привести к опасным ситуациям, таким как потеря устойчивости экскаватора или даже его опрокидывание. Кроме того, при заклинивании ведущего колеса возникает риск повреждения механизмов и оборудования экскаватора.

#### 4.2. Анализ влияния материала на напряженно-деформированное состояние ведущего колеса

Одним из способов повышения надежности может быть изменение материала ведущего колеса, что может существенно увеличить срок его службы. Это особенно важно в условиях повышенной нагрузки или вибрации.

Ведущее колесо гусеничного хода карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 изготовлено из легированной хладостойкой стали для отливок 35ХМЛ. Такая сталь применяется для изготовления ответственных деталей, работающие с повышенными нагрузками и требующие повышенной твердости [69]. Характеристики стали представлены в таблице 4.1.

Выбор материала для ведущего колеса будет зависеть от конкретных условий эксплуатации механизма. Например, для работы в агрессивных и абразивных средах, может потребоваться специальный материал, обладающий высокой коррозионностью или устойчивостью к абразивному износу. Металл является материалом, который наиболее сильно подвергается воздействию абразивных частиц. Именно из-за этого его поверхность может быстро изнашиваться и терять свои

первоначальные свойства. Причиной абразивного износа становится силовое воздействие: соударение, скольжение, качение. Твердые структурные составляющие одной детали деформируют более мягкий материал, оставляя царапины, риски, отпечатки. Влияние оказывают и мелкодисперсные частицы, содержащиеся в воздухе, смазке, сыпучих материалах.

Также на основании результатов анализа твердости материала (глава 3.4), необходимо учитывать значение твердости материала для его последующей оценки методом твердометрии.

Рассмотрено второе расчетное положение, когда нагрузка приходится на один закрепленный кулачок. Проведено сравнение характеристик сталей и проанализировано нагружение ведущего колеса из разных материалов. Ведущее колесо гусеничного хода карьерного экскаватора, как правило, изготавливают из легированных сталей для отливок. В таблице 4.1 представлены характеристики некоторых рассмотренных сталей и указано полученное максимальное напряжение на закрепленном кулачке ведущего колеса.

Таблица 4.1

Сравнение характеристик сталей, возможных для изготовления ведущего колеса

Материал Показатель	35ХМЛ	45ХН	30ХНМЛ	30ХГСФЛ	35ГЛ	14Х2ГМРЛ
Твердость по шкале Бринелля, НВ $10^{-1}$ , МПа	207-269	207	217-269	196-255	202-207	179 - 196
Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	392	835	540	392	294	590
Модуль Юнга, МПа	210000					
Коэффициент Пуассона	0,3					
Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7,8E-06					
Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/(°С*м)	0,047	0,043	0,047	0,04	0,04	0,04
Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	589	1030	687	589	540	690
Максимальное напряжение, $\sigma_{max}$ , МПа	397,3	399,5	374,5	364,1	366,8	377,7

Рассмотрены следующие виды сталей [69]:

- 35ХМЛ – сталь для отливок легированная, хладостойкая, из такой стали изготавливаются шестерни, крестовины, втулки, зубчатые венцы и другие ответственные детали, к которым предъявляются требования высокой прочности и вязкости, работающие под действием повышенных статических и динамических нагрузок и требующие повышенной твердости.

- 45ХН – сталь конструкционная, легированная, хромоникелевая, применяется для выполнения различных ответственных деталей.

- 30ХНМЛ – сталь для отливок легированная, применяется для изготовления ответственных нагруженных деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности и достаточной вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок при температуре до 400 град.

30ХГСФЛ – сталь для отливок легированная, из такой стали изготавливаются шестерни, зубчатые колеса и другие детали машиностроения.

35ГЛ – сталь для отливок легированная, из такой стали изготавливаются диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны, шкивы, крестовины, траверсы, ступицы, вилки, решетчатые стрелы и другие тяжело нагруженные детали экскаватора, крышки подшипников, цапфы.

14Х2ГМРЛ – сталь для отливок легированная, хладостойкая, применяется для изготовления ответственных сварно-литых конструкций больших сечений карьерных и шагающих экскаваторов.

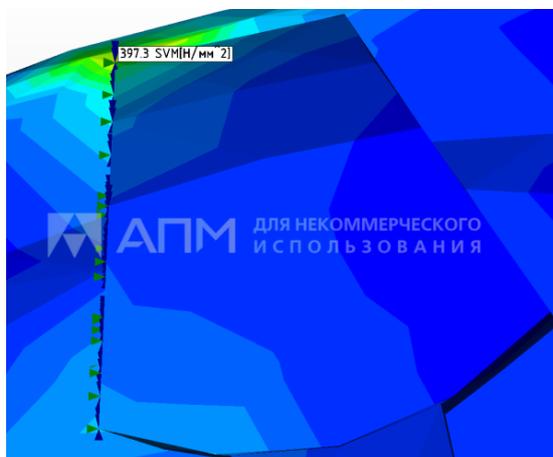


Рис. 4.10 Максимальное напряжение на кулачке стали 35ХМЛ

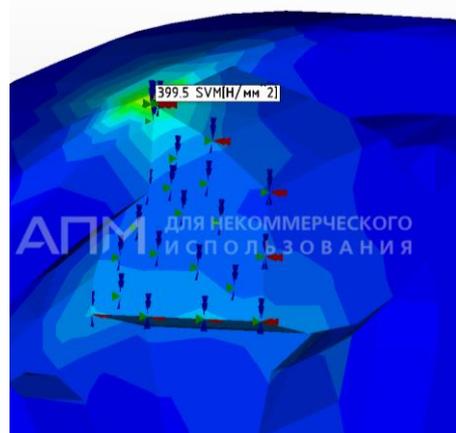


Рис. 4.11. Максимальное напряжение на кулачке стали 45ХН

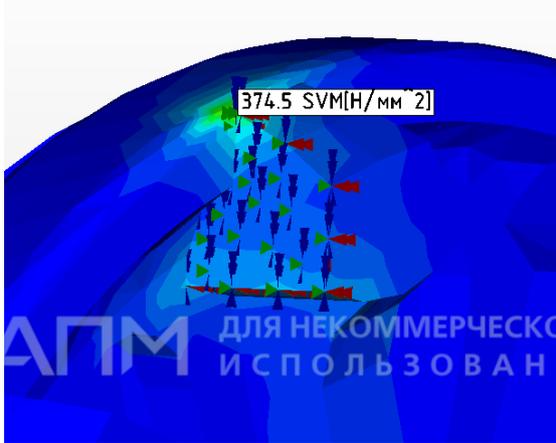


Рис. 4.12. Максимальное напряжение на кулачке стали 30XНМЛ

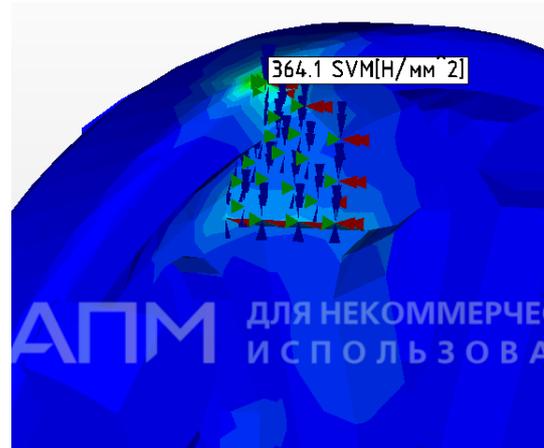


Рис. 4.13. Максимальное напряжение на кулачке стали 30XГСФЛ

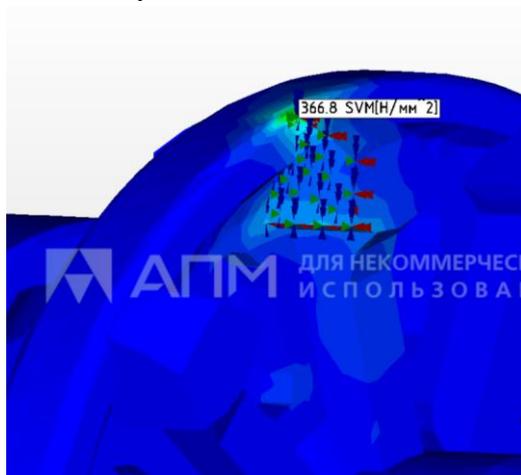


Рис. 4.14. Максимальное напряжение на кулачке стали 35ГЛ

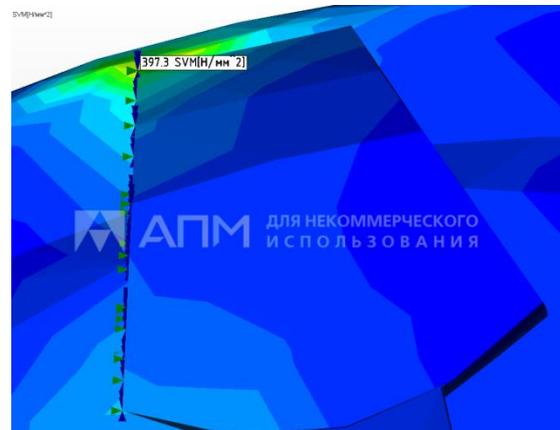


Рис. 4.15. Максимальное напряжение на кулачке стали 14X2ГМРЛ

На основании полученных результатов построена диаграмма (рис. 4.16) сравнения основных показателей стали и максимального напряжения полученного при нагружении ведущего колеса во втором расчетном положении.

Графики зависимостей максимального напряжения от основных характеристик сталей (рис. 4.17, 4.18) построены с использованием приложения Microsoft Excel. Анализ построенных зависимостей показал, что наибольшая величина достоверности аппроксимации  $R^2$  будет при полиномиальной зависимости четвертой степени по обоим рассматриваемым характеристикам (табл. 4.2).

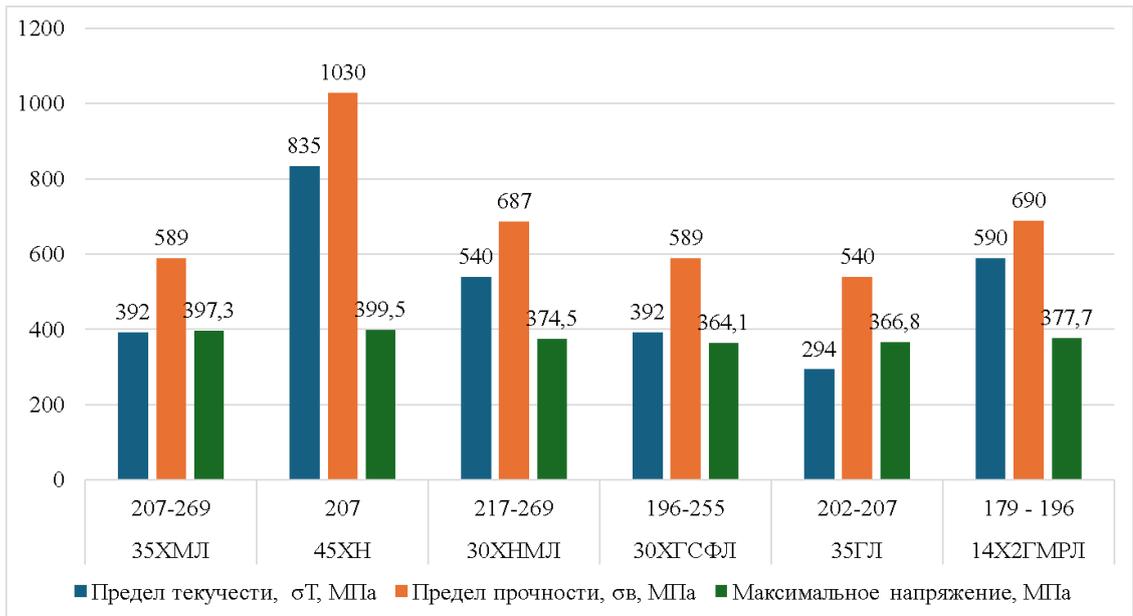


Рис. 4.16. Диаграмма сравнения сталей по основным характеристикам

Таблица 4.2

Итоговые зависимости основных характеристик сталей от напряжения  $\sigma_{max}$

Показатель	Уравнение зависимости		Величина достоверности аппроксимации $R^2$
	Предел текучести, $\sigma_T$ , МПа	Теоретическая (полиномиальная)	
Экспериментальная (линейная)		$\sigma_T = 7,5948\sigma_{max} - 2378,7$	0,516
Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Теоретическая (полиномиальная)	$\sigma_B = 0,0111\sigma_{max}^4 - 16,865\sigma_{max}^3 + 9568,7\sigma_{max}^2 - 2E + 06\sigma_{max} + 2E + 08$	0,9997
	Экспериментальная (линейная)	$\sigma_B = 7,429\sigma_{max} - 2135,4$	0,597

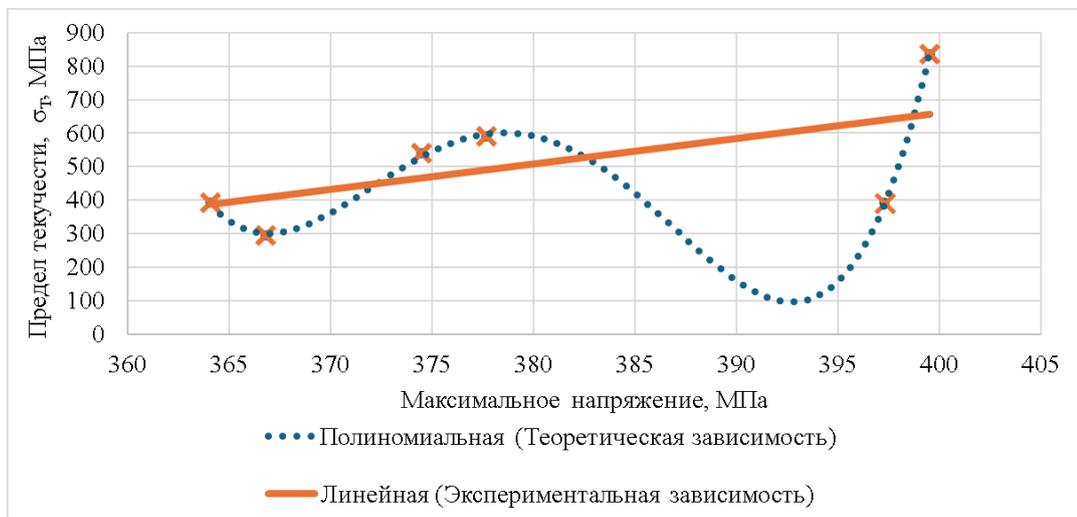


Рис. 4.17. Зависимости предела текучести  $\sigma_T$  от напряжения  $\sigma_{max}$

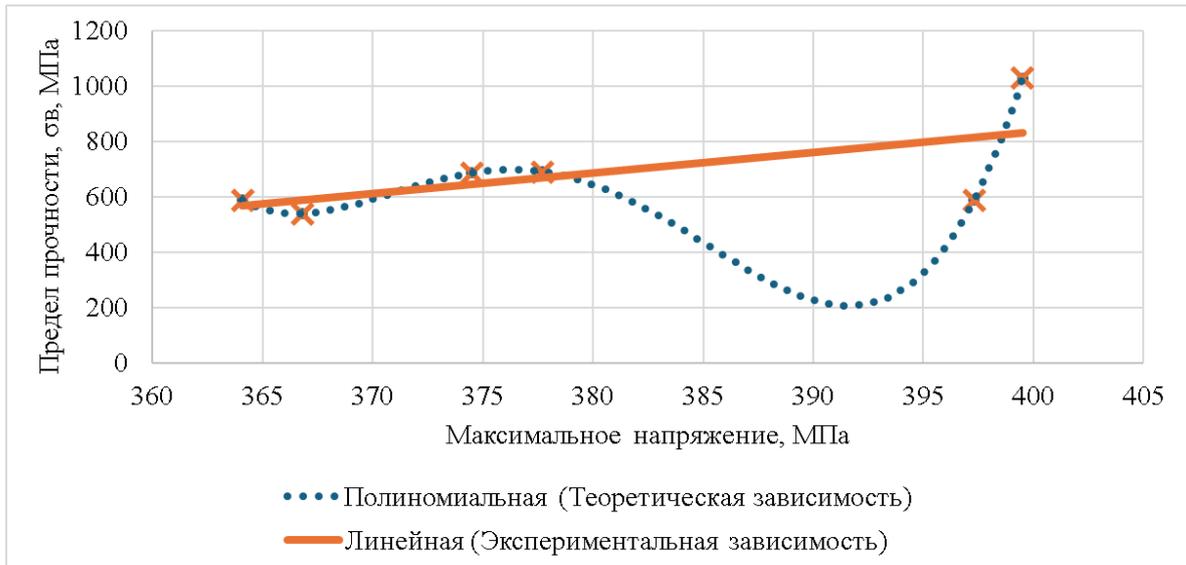


Рис. 4.18. Зависимости предела прочности  $\sigma_B$  от напряжения  $\sigma_{max}$

Таким образом, влияние выбранного материала для ведущего колеса гусеничного хода карьерного экскаватора будет существенно влиять на максимальное напряжение в металлоконструкциях элемента, а также может быть эффективным способом повышения его надежности и долговечности. При этом необходимо учитывать специфику работы механизма, условия и режимы эксплуатации и требования к нему, чтобы выбрать наиболее подходящий материал.

На основании проведенных исследований предложена новая конструкция ведущего колеса «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства» (положительное решение по заявке № 2024108330 от 26.04.2024 на изобретение «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства»).

Изобретение относится к области транспортного машиностроения, в частности, к тракторам и тягачам.

Задачей изобретения является повышение срока службы ведущего колеса. Это достигается тем, что зацепы выполнены с опорной плитой, закрепленной на кольцеобразном основании посредством болтового соединения.

На рис. 4.19 представлено ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства. Устройство содержит ступицу (1), кольцеобразное основание (2) и зацепы (3) с опорной плитой (4).

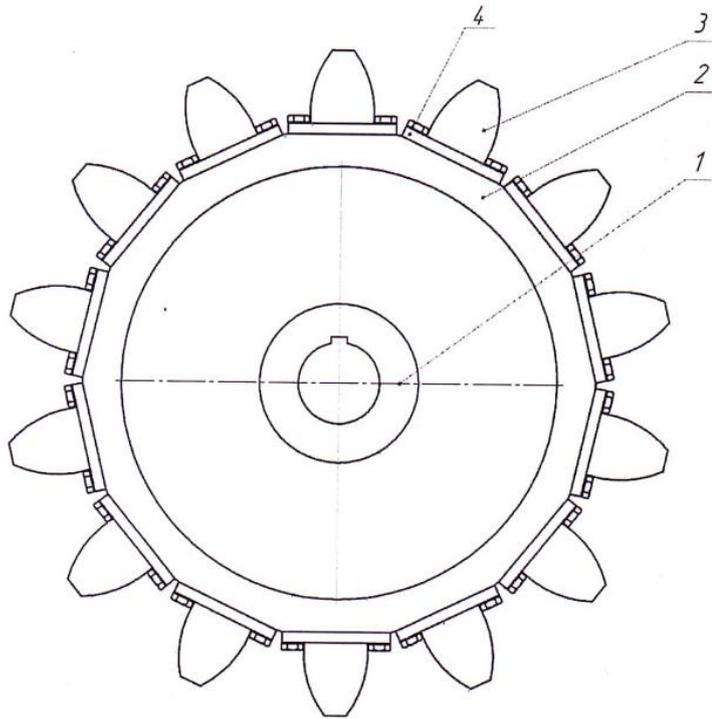


Рис. 4.19. Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства

Устройство работает следующим образом: крутящий момент на ведущем валу силовой передачи привода гусеничного ходового оборудования вращает ведущее колесо. При этом зацепы 3, воздействуя на звенья гусеницы, перемещают гусеницу. Перемещение обеих гусениц приводит к передвижению транспортного средства. При износе рабочей поверхности зацепа 3 до допустимой величины производится переустановка опорной плиты 4 с разворотом на  $180^\circ$  и затем после износа обеих рабочих поверхностей зацепа 3 производится его замена.

### 4.3. Выводы по главе

В результате проведенного анализа конструкции ведущего колеса методом конечных элементов, был сделан вывод, что заклинивание кулачка ведущего колеса гусеничного хода при попытке преодоления препятствие является наиболее опасным вариантом нагружения ведущего колеса, при котором зоны концентрации напряжений находятся непосредственно на кулаках колеса, что приводит к их механическому износу.

Получены зависимости влияния максимального напряжения ведущего колеса на предел текучести и предел прочности различных литевых сталей на предел текучести и предел прочности различных литевых сталей выявлено, что заклинивание кулачка ведущего колеса гусеничного хода при попытке преодоления препятствия является наиболее опасным вариантом нагружения ведущего колеса.

На основании проведенного анализа применения различных марок сталей, было выявлено, что наименьшее максимальное напряжение получено применяя сталь 30ХГСФЛ, которая используется для изготовления деталей машиностроения. Это говорит о том, что сталь 30ХГСФЛ обладает высокой прочностью и устойчивостью к деформации под нагрузкой, что делает ее хорошим материалом для производства деталей, работающих в условиях повышенных нагрузок. Приведенная марка стали хорошо поддается обработке, обладает отличными технологическими свойствами, что упрощает процесс изготовления изделий и имеет хорошую свариваемость, что позволяет производить сложные конструкции из нескольких деталей без потери прочности и качества соединения. Кроме того, указанная марка стали обладает высокой устойчивостью к различным видам коррозии, что значительно увеличивает срок службы изделий, изготовленных из нее. Твердости стали достаточно для применения ее для изготовления ведущего колеса.

В результате использование стали 30ХГСФЛ позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность ведущего колеса гусеничного хода карьерного экскаватора. Таким образом, эта марка стали может заменить сталь 35ХМЛ с высоким уровнем качества и надежности.

Также предложена новая конструкция ведущего колеса «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований решается актуальная научно-техническая задача повышения эффективности функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора в условиях ПАО «Ураласбест» за счет применения новой системы технического обслуживания с внедрением методов диагностики и изменения конструктива ведущего колеса.

Основные выводы, научные и практические результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Проанализированы случаи возникновения износа элементов ходового оборудования карьерных экскаваторов.

2. Исследовано влияние факторов, вызывающих изменение и оказывающие существенное воздействие на техническое состояние ходового оборудования карьерного экскаватора, определены зависимости влияния физико-механических свойств горных пород, скорости движения экскаватора, уклона рабочей площадки и коэффициента управления на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора.

3. По установленным зависимостям определено число натуральных экспериментов, составившее 55 опытов необходимых и достаточных для оценки напряженно-деформированного состояния элементов карьерного экскаватора ЭКГ-10 и построена регрессионная модель со стандартной ошибкой оценки 5 %.

4. Получен коэффициент детерминации, объясняющий функциональную связь между факторами и функцией отклика  $R^2=0,98$ , который по шкале Чеддока соответствует значительной силе связи между факторами и откликом, и означает, что модель имеет высокое практическое значение.

5. Разработана методика проведения диагностического исследования элементов ходового оборудования карьерного экскаватора на основе результатов экспериментальных исследований по выявлению внешних и внутренних факторов возникновения напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции ходового оборудования карьерных экскаваторов с применением

вибродиагностического и тензометрического методов для оценки ресурса редукторов гусеничного хода, а также метода твердометрии для оценки состояния ведущего, опорного и натяжного колеса гусеничного хода карьерного экскаватора.

6. Рассчитан коэффициент технической готовности карьерного экскаватора с учетом простоев из-за дефектов ходового оборудования за каждый рассматриваемый период по данным ПАО «Ураласбест», установлено, что коэффициент технической готовности с наибольшей величиной достоверности аппроксимации  $R^2$  имеет полиномиальную зависимость второй степени.

7. Установлена зависимость производительности карьерного экскаватора с учетом простоев, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом ходового оборудования от коэффициента технической готовности, который повышается с увеличением межремонтного периода.

8. Предложен новый годовой график технического обслуживания и ремонта (ТОиР), включающий проведение диагностики элементов ходового оборудования карьерного экскаватора с применением методов неразрушающего контроля.

9. На основании полученных зависимостей влияния максимального напряжения ведущего колеса на предел текучести и предел прочности различных литевых сталей выявлено, что заклинивание кулачка ведущего колеса гусеничного хода при попытке преодоления препятствия является наиболее опасным вариантом нагружения ведущего колеса, при котором наименьшее максимальное напряжение 364,1 МПа получено при использовании стали 30ХГСФЛ.

10. Получено положительное решение по заявке № 2024108330 от 26.04.2024 на изобретение «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства», в которой отражена разработанная новая конструкция ведущего колеса ходового оборудования карьерного экскаватора, учитывающая действия рабочих нагрузок и напряженно-деформированное состояние в металле, установленные экспериментальным путем.

11. Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составляет 257 тыс. руб. (акт внедрения ПАО «Ураласбест» от 11 июля 2024 г.).

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Авдеев, А. Н. Распределение напряжений в базовых узлах карьерных экскаваторов и хрупкие разрушения конструкций / А. Н. Авдеев, А. Ю. Болотнев, Е. И. Унагаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – № 2(38). – С. 17–19.
2. Альшанская, А. А. Повышение надежности экскаваторов на основе прогноза отказов и цифровых моделей нагруженности силовых конструкций [Электронный ресурс] : автореферат диссертации ... кандидата технических наук / А. А. Альшанская. – Красноярск, 2024. – 19 с.
3. Анализ металлоконструкций стрелы карьерного экскаватора методом неразрушающего контроля / Ю. А. Лагунова, С. А. Хорошавин, Р. Ш. Набиуллин, А. Е. Калянов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 115–123. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-115-123.
4. Анализ твердости материала ходового оборудования карьерного экскаватора / В. В. Макарова, Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов, А. А. Жилинков // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 15 декабря 2023 года. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. – С. 157–161.
5. Анализатор спектра ZET017-T8. Тензостанция. Руководство по эксплуатации ЗТМС.411168.004 РЭ. – 20 с.
6. Андреева, Л. И. Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники / Л. И. Андреева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 83–91. – DOI 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.
7. Андреева, Л. И. Комплексные решения для управления активами в системе технического обслуживания и ремонта горной техники / Л. И. Андреева // Проблемы недропользования. – 2023. – № 3(38). – С. 79–88. – DOI 10.25635/2313-1586.2023.03.079.

8. Андреева, Л. И. Методический подход к оценке состояния горной техники и целесообразного срока ее эксплуатации / Л. И. Андреева // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 6(158). – С. 38–43. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-6-38-43.
9. Андреева, Л. И. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем / Л. И. Андреева, А. А. Данилкин // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 4(168). – С. 20–27. – DOI 10.26730/1816-4528-2023-4-20-27.
10. Баранникова, И. В. Прогнозирование отказов одноковшовых экскаваторов на основе методов искусственного интеллекта / И. В. Баранникова, И. Мажибрада // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 1. – С. 37–46.
11. Баранникова, И. В. Прогнозирование отказов одноковшовых экскаваторов на основе метода Сугэнэ / И. В. Баранникова, И. Мажибрада // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 5–2(84). – С. 184–188. – EDN VZGKAR.
12. Беликов, Е. С. Модернизация электропривода напора-хода ЭКГ-8И. В сборнике: Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри, с международным участием. Секции 1–5. 2018. С. 85–87.
13. Беляев, В. П. Испытания автомобилей. Учебное пособие / В. П. Беляев — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2012. — 293 с.
14. Беляев, С. А. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС : учебное пособие / С. А. Беляев, А. В. Воробьев, В. В. Литвак. — Томск : ТПУ, 2015. — 248 с.
15. Богомолов, И. Д. Мониторинг температуры основных узлов экскаватора / И. Д. Богомолов, М. Ю. Дрыгин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2009. № 5(75). С. 12–15.
16. Болотнев, А. Ю. Повышение надежности базовых узлов металлоконструкций карьерных экскаваторов в условиях Севера : специальность 05.05.06

"Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Болотнев Александр Юрьевич. – Иркутск, 2009. – 18 с.

17. Великанов, В. С. Повышение эффективности эксплуатации карьерных гусеничных экскаваторов с оборудованием "прямая механическая лопата" автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н., специальность 05.05.06 «Горные машины» / Великанов Владимир Семенович; [Урал. гос. горный ун-т]. — Екатеринбург 2009. — 18 с.

18. Великанов, В. С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором: специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Великанов Владимир Семенович. – Екатеринбург, 2020. – 292 с.

19. Геращенко, В. Н. Исследование и обобщение результатов по ходовому оборудованию гидравлических экскаваторов 5-ой размерной группы / В. Н. Геращенко, С. Б. Князев // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2020. – № 1. – С. 70–72.

20. Геращенко, В. Н. Влияние конструктивных элементов гусеничного ходового оборудования экскаватора на эффективность его работы / В. Н. Геращенко, А. С. Сухорских // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2015. – № 1. – С. 243–244.

21. Геращенко, В. Н. Исследование ходового оборудования гидравлического экскаватора v-ой размерной группы и предложения по конструктивным изменениям узлов тележки гусеничной / В. Н. Геращенко, Н. В. Шевченко // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2019. – № 1. – С. 105–107.

22. Геращенко, В. Н. Влияние конструктивных элементов гусеничного ходового оборудования экскаватора на эффективность работы / В. Н. Геращенко, В. Ю. Бруданин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2016. – № 1. – С. 212–214.

23. Геращенко, В. Н. Влияние конструктивных элементов ходового оборудования на эффективность работы экскаваторов / В. Н. Геращенко, В. И. Иванов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2015. – № 1. – С. 240-242.
24. Герике, Б. Л. Спектральный метод вибродиагностики подшипниковых узлов карьерных экскаваторов / Б. Л. Герике, И. Л. Абрамов, П. Б. Герике // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 3(61). С. 7–9.
25. Герике, Б. Л. Распознавание технического состояния редукторов горно-транспортного оборудования / Б. Л. Герике, В. И. Клишин, Е. Г. Кузин // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 184–192.
26. Герике, П. Б. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования / П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 2(154). С. 17–22. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-17-22.
27. Герике, Б. Л. Функциональная диагностика состояния динамических систем карьерных экскаваторов / Б. Л. Герике, С. Ю. Дрыгин // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2001. – № 1(20). – С. 64–66.
28. Герике, П. Б. Выбор и обоснование параметров комплексного подхода для анализа вибрации экскаваторов типа ЭКГ / П. Б. Герике // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 1(141). – С. 13–19. – DOI 10.26730/1816-4528-2019-1-13-19.
29. Горохов, Т. И. Математическое планирование эксперимента при подборе оптимального состава композитного материала на основе гипсового вяжущего, наполненного древесными опилками / Т. И. Горохов, А. В. Ерофеев, Б. А. Бондарев, А. О. Корнеева // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 3(67). – С. 53–60. – <https://DOI/10.36622/VSTU.2022.67.3.005>.
30. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 63 с.

31. ГОСТ Р 8.694-2010 (Руководство ИСО 35:2006) Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Стандартные образцы материалов (веществ). Общие статистические принципы определения метрологических характеристик. Введ. 2012-07-01. – М. : Стандарт информ, 2012.
32. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов / А. Богданов, Р. Левкович, Д. Наумов, А. Гайнуллин // ТехНадзор. – 2015. – № 11(108). – С. 74–81.
33. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов / А. А. Гайнуллин, А. А. Ефимов [и др.] // Universum: технические науки. – 2015. – № 11(22). – С. 17.
34. Доронин, С. В. Обоснование приоритетности ремонтного обслуживания парка экскаваторов на основе экспертных оценок слабоформализуемых закономерностей формирования отказов / С. В. Доронин, А. А. Альшанская // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – № 4(20). – С. 36–45. – DOI 10.46573/2658-5030-2023-4-36-45. – EDN INMAMY.
35. Доронин, С. В. Численный анализ напряженно-деформированного состояния гусеничной рамы карьерного экскаватора / С. В. Доронин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2000. – № 6. – С. 73–78. – EDN TZZOPL.
36. Дорошев, А. Ю. Вибродиагностика технического состояния подшипников электрических машин карьерных экскаваторов / А. Ю. Дорошев, Д. Н. Николайчук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S38. – С. 30–33.
37. Дроздова, Л. Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. Пособие / Л. Г. Дроздова, О. А. Курбатова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 235 с.
38. Дрыгин М. Ю. Контроль вибрации основных узлов экскаватора в режиме реального времени // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 3. С. 27–31.
39. Дрыгин, М. Ю. Разработка стационарного диагностического комплекса для одноковшовых карьерных экскаваторов : специальность 05.05.06 "Горные

машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дрыгин Михаил Юрьевич. – Кемерово, 2012. – 18 с.

40. Дрыгин, С. Ю. Обоснование метода вибродиагностики технического состояния одноковшовых карьерных экскаваторов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дрыгин Сергей Юрьевич. – Кемерово, 2005. – 18 с.

41. Дрыгин, С. Ю. Создание системы признаков дефектов по параметрам вибрации / С. Ю. Дрыгин // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 4. – С. 67–68.

42. Ерещенко, Т. В. Планирование эксперимента : учебно-практическое пособие / Т. В. Ерещенко, Н. А. Михайлова. – Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – 78 с. – ISBN 978-5-98276-728-8.

43. Жилинков, А. А. Методика экспериментальных исследований процессов деформации несущей системы автопоездов при перевозке металлопродукции / А. А. Жилинков, В. Э. Парунакян // Вестник Приазов. гос. техн. ун-та: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 2009. – Вып. № 19. – С. 256–260.

44. Иванов, С. Л. Техническое обслуживание горных машин и оборудования. Разработка технологических карт ремонта узлов карьерного экскаватора: Методические указания по курсовому проектированию для студентов специальности 21.05.04 / С. Л. Иванов, П. В. Иванова, С. Ю. Кувшинкин, Д. А. Шибанов – Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: СПб, 2021. 72 с.

45. Иванова, П. В. Выявление закономерностей изменения наработки карьерного электрического экскаватора большой единичной мощности с учетом воздействия факторов природно-техногенного характера: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Иванова Полина Викторовна. – Спб., 2019. – 134 с.

46. Катанов, Б. А. О надежности карьерных экскаваторов / Б. А. Катанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 3. – С. 88–91.

47. Квагинидзе, В. С. Экскаваторы на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: Учебное пособие / В. С. Квагинидзе, Г. И. Козовой, Ф. А. Чакветадзе, Ю. А. Антонов, В. Б. Корецкий – М.: Издательство «Горная книга». – 2011. – 409 с.
48. Квалификация персонала как инструмент в повышении эффективности эксплуатации карьерных экскаваторов / А. А. Абдрахманов, Г. Г. Сафин, И. А. Габитов [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 12–2. – С. 193–198.
49. Князькина, В. И. Повышение работоспособности трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки их ресурсопределяющих элементов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Князькина Валерия Ивановна, 2022. – 138 с.
50. Ковальчук, Д. Е. Анализ конструкций гусеничных ходовых систем / Д. Е. Ковальчук, И. С. Маршалкевич ; науч. рук. С. В. Юрко // Современное развитие тактики, инженерного, технического и информационного обеспечения боевых действий войск. Инновационное военное образование : материалы 66-й студенческой научно-технической конференции, 25–26 марта 2010 г. : в 2 ч. / Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2010. – Ч. 1. – С. 215–221.
51. Комиссаров, А. П. Методика комплексной оценки нагруженности металлоконструкций карьерного экскаватора / А. П. Комиссаров, Р Ш Набиуллин // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 256–259.
52. Красников, Ю. Д. Методика экспериментального определения нагруженности корпусных деталей редукторов выемочных комбайнов / Ю. Д. Красников,

Ю. А. Зислин, П. В. Семенча, Н. П. Андреев. – Москва : ИГД им. А.А. Скочинского, 1972 г. – 21 с.

53. Красникова, Т. И. Обоснование и выбор рациональных параметров эксплуатации экскаваторов цикличного действия : специальность 05.05.06 "Горные машины", 05.02.22 "Организация производства (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Красникова Татьяна Ивановна. – Екатеринбург, 2012. – 131 с.

54. Крупин, А. Е. Отсеивание факторов при планировании эксперимента / А. Е. Крупин, Д. В. Зуйков // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 4(35). – С. 62–70.

55. Кузнецова, Е.В. Математическое планирование эксперимента: Учебно-методическое пособие для студентов очного и заочного обучения специальностей «Технология обработки металлов давлением», «Динамика и прочность машин», «Компьютерная механика», «Компьютерная биомеханика» / Е.В. Кузнецова – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2011. – 35 с.

56. Кузнецова, Е.В. Экспериментальная механика: Учебно-методическое пособие для студентов очного и заочного обучения специальностей «Динамика и прочность машин», «Компьютерная механика», «Компьютерная биомеханика», «Технология обработки металлов давлением». – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 43 с.

57. Лагунова, Ю. А. Тензометрические испытания ходовой тележки карьерного экскаватора / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2023. – С. 56.

58. Лагунова, Ю. А. Проектирование карьерных экскаваторов / Ю. А. Лагунова, А. П. Комиссаров, В. С. Шестаков. – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 228 с.

59. Лагунова, Ю. А. Анализ методов диагностирования состояния металлоконструкций на примере экскаваторостроения / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова,

Р. Ш. Набиуллин // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 6(164). – С. 17–25. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25.

60. Лагунова, Ю. А. Напряжения в металлоконструкциях ходовой тележки карьерного экскаватора / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова, Р. Ш. Набиуллин // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 16 декабря 2022 года. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2023. – С. 117–121.

61. Лагунова, Ю.А. Особенности механизма хода карьерного экскаватора / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2023 г. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – С. 175–176.

62. Логунова, О.С. Теория и практики обработки экспериментальных данных на ЭВМ / О.С. Логунова, Е.А. Ильина, В.В. Павлов.: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. государ. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 300 с.

63. Мажибрада, И. Разработка модели оценки эффективности управления системой технического обслуживания и ремонта одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов : специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мажибрада Ирина, 2018. – 129 с.

64. Макаричев, Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

65. Макарова, В. В. Обзор и анализ применения методов диагностики напряженно-деформированного состояния элементов карьерных экскаваторов / В. В. Макарова // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 48–60. – DOI 10.21440/0536-1028-2024-1-48-60.

66. Макарова, В. В. Планирование многофакторного эксперимента по исследованию надежности ходового оборудования карьерного экскаватора / В. В.

Макарова, Ю. А. Лагунова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 371–375.

67. Макарова, В. В. Применение твердометрии для оценки элементов гусеничного хода карьерного экскаватора / В. В. Макарова, Ю. А. Лагунова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2024 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 83.

68. Макарова, В. В. Причины, воздействующие на техническое состояние ходового оборудования экскаватора / В. В. Макарова, Ю. А. Лагунова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 366–369.

69. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др; Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

70. Математическая теория планирования эксперимента / [Ермаков С. М., Бродский В. З., Жиглявский А. А. и др.]; Под ред. С. М. Ермакова. - Москва : Наука, 1983. – 391 с.

71. Махно Д. Е. Эксплуатация и ремонт карьерных экскаваторов в условиях Севера.- М., Недра, 1984. – 133с.

72. Махно, Д. Е. Проблема хладостойкости конструкций при эксплуатации карьерных экскаваторов в регионах холодного климата / Д. Е. Махно, А. Н. Авдеев, А. Ю. Болотнев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2007. – № 1-1(29). – С. 98–101.

73. Махно, Д. Е. Критические значения напряжений в базовых узлах металлоконструкций карьерных экскаваторов, работающих в регионах Севера / Д. Е. Махно, А. Ю. Болотнев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. – № 8. – С. 96–100.

74. Методика экспериментальных исследований процессов деформации ходовой части горных машин / А. А. Жилинков, В. В. Макарова, Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 27 сентября 2023 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2023. – С. 297–302.

75. Милосердов, Е. Е. Техническое диагностирование основных механизмов роторного экскаватора в условиях эксплуатации : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Милосердов Евгений Евгеньевич. – Красноярск, 2014. – 16 с.

76. Миронов, В. И. Способ оценки долговечности элементов экскаватора / В. И. Миронов, О. А. Лукашук, Д. В. Савинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № S2. – С. 17–25. – EDN SEBKMT.

77. Напряжения в металлоконструкциях поворотной платформы карьерного экскаватора / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова, Р. Ш. Набиуллин, С. В. Ситдикова // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. – 2022. – Т. 1. – С. 7–12.

78. Насонов, М. Ю. Оценка долговечности металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при наличии трещин / М. Ю. Насонов, Д. А. Юнгмейстер, Д. Ч. До // ГИАБ. 2022. № 11. С. 67–79. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_67

79. Основы научных исследований: Учебник для технических вузов / В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов и др.; Под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. – М.: Высшая школа, - 1989. – 400с.

80. Оценка безопасности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 в условиях ПАО «УралАсбест» / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова, А. Е. Калянов, А. А. Жилинков // Актуальные проблемы повышения эффективности и

безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. – 2023. – Т. 1. – С. 12–17.

81. Оценка технического состояния редуктора хода карьерного экскаватора / Ю. А. Лагунова, В. В. Макарова, Д. В. Быков, А. В. Адамков // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 1(171). – С. 40–49. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-1-40-49.

82. Павлов, П. П. Основы теории надежности электромеханических комплексов: учебное пособие / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – 92 с.

83. Павлов, М. В. Снижение вероятности хрупких разрушений металлоконструкций карьерных экскаваторов регулированием динамических нагрузок : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Павлов Михаил Валерьевич. – Иркутск, 2005. – 22 с.

84. Петрухин, В. В. Вибрация, вибродиагностика и ... ЭЦН : монография / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. — Москва : Русайнс, 2022. – 184 с.

85. Петрухин, В. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации : учебное пособие / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. - Москва : Инфра-Инженерия, 2010. – 168 с.

86. Побегайло, П. А. Некоторые предварительные итоги экспериментальных исследований работы человека - оператора одноковшового экскаватора / П. А. Побегайло, Ю. А. Лагунова, Р. А. Ковязин, А. Е. Калянов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» в рамках Уральской горнопромышленной декады , Екатеринбург, 07–08 апреля 2016 года / Лагунова Юлия Андреевна (отв. ред.). – Екатеринбург: УГГУ, 2016. – С. 108–118.

87. Побегайло, П. А. К вопросу о выборе методов контроля и оценки состояния металлоконструкций карьерных экскаваторов / П. А. Побегайло, Д. Ю. Крицкий, Е. С. Сазанкова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической

конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю. А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 380–387.

88. Поварехо, А. С. Автомобили, специальные машины и оборудование. Ходовая часть и системы управления : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины (по направлениям)» / А. С. Поварехо, А. И. Рахлей, В. Н. Плищ. – Минск : БНТУ, 2021. – 78 с.

89. Подэрни, Р. Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ: Учебник для вузов — 2-е изд., перераб. и доп.— М.:Недра. 1985. – 544 с.

90. Положение о планово-предупредительных ремонтах оборудования и транспортных средств на предприятиях Министерства цветной металлургии СССР. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1984. – 176 с.

91. Программное обеспечение ZETLAB. Руководство оператора ЗТМС.00068-01 34. – 188 с.

92. Расчет напряженно-деформированного состояния шарошечного бурового долота / В. С. Шестаков, Г. В. Прокопович, Г. М. Рogaва, В. Е. Адаc // Теория и практика мировой науки. – 2017. – № 11. – С. 50–53.

93. Сайтов, В. И. Влияние грансостава забоя на количество отказов механизма напора экскаватора циклического действия / В. И. Сайтов, Л. И. Андреева, Т. И. Красникова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. – С. 234.

94. Салин, В. Н. Статистический анализ данных цифровой экономики в системе «STATISTICA» : учебно-практическое пособие / В. Н. Салин, Э. Ю. Чурилова. — Москва : КноРус, 2023. — 238 с.

95. Сергеев, В. Ю. Обоснование и разработка технологии фирменного сервисного обслуживания карьерных экскаваторов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сергеев Валерий Юрьевич. – Москва, 2010. – 23 с.

96. Сергеев, В. Ю. Обоснование и разработка технологии фирменного сервисного обслуживания карьерных экскаваторов / В. Ю. Сергеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 7. – С. 401–402.
97. Синяков, А. А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерных экскаваторов типа механическая лопата в условиях Северных регионов России (на примере разреза "Нерюнгринский" ОАО ХК "Якутуголь") : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Синяков Андрей Анатольевич. – Люберцы, 2005. – 26 с.
98. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. - Москва : Машиностроение, 1981. – 184 с.
99. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик гусеничных транспортно-технологических машин / П. О. Береснев, В. И. Филатов, А. А. Еремин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 1(112). – С. 109-164.
100. Степаненко, Р.А. Совершенствование технической эксплуатации автомобилей УАЗ Бугурусланского РНУ АО «Транснефть-Приволга» : Выпускная квалификационная работа / Р.А. Степаненко .— : [Б.и.], 2017 .— 67 с. — URL: <https://lib.rucont.ru/efd/629117> (дата обращения: 12.06.2024)
101. Стратегия профилактического обслуживания горных машин на основе распознавания их фактического технического состояния / П. Б. Герике, И. Л. Абрамов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2008. – № 7. – С. 70–80.
102. Стукач О.В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учебное пособие / О. В. Стукач; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 163 с.

103. Твердомеры портативные ультразвуковые ТКМ-459 (модификации ТКМ-459С, ТКМ-459М). Руководство по эксплуатации ТКМ459СМ РЭ, 2017. – 65 с.

104. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.

105. Труханов, В. М. Планирование испытаний дорогостоящих объектов методом фиксированного объема / В. М. Труханов, В. В. Лазарев // Вестник машиностроения. – 2019. – № 11. – С. 3–8.

106. Усманов, Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA»: учебно-методическое пособие / Р. Р. Усманов; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2020. – 177 с.

107. Френкель, А. В. Определение основных параметров инверсионного ходового устройства карьерных горных машин: специальность 05.05.06 "Горные машины": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Френкель Александр Владимирович. – Москва, 2000. – 138 с.

108. Хорошавин, С. А. Повышение эффективности карьерных одноковшовых экскаваторов за счет совершенствования рабочего оборудования: специальность 05.05.06 "Горные машины": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хорошавин Сергей Александрович. – Екатеринбург, 2015. – 22 с.

109. Царёв, А.М. Надежность и диагностика технологического оборудования: учеб. пособие / А. М. Царёв. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 128 с.

110. Чалганова, А. А. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel. Учебное пособие по дисциплине «Эконометрика» / А. А. Чалганова. – [Текст: электронный]. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2022. – 90 с.

111. Шибанов, Д. А. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации / Д. А. Шибанов, С. Л. Иванов, А. А.

Емельянов, Е. В. Пумпур // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 10. – С. 86–94. DOI:10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.

112. Шибанов, Д. А. Комплексная оценка факторов, определяющих на работу экскаваторов ЭКГ-18Р/20К, для планирования технического обслуживания и ремонтов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шибанов Даниил Александрович. – Санкт-Петербург, 2015. – 22 с.

113. Шибанов, Д. А. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ-18Р/20К, для планирования технического обслуживания и ремонтов : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шибанов Даниил Александрович, 2015. – 201 с.

114. Шовкопляс, А. В. Износостойкость деталей гусеничных ходовых устройств // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2022. – № 7(61). – С. 160–163.

115. Щеголева, Т. А. Применение методов многофакторного планирования экспериментов для выявления влияния акустического воздействия на снижения намерзания грунта к машинам / Т. А. Щеголева, Д. Е. Иванов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 1. – С. 183–188.

116. Эксплуатация машин дорожно-строительного комплекса : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 11 01 «Инновационная техника для строительного комплекса (по направлениям)» / сост. А. Л. Дашко [и др.] – Минск : БНТУ, 2023. – 302 с. ISBN 978-985-583-887-7.

117. Яблонев А. Л., Гусева А. М. Полный факторный эксперимент по определению зависимости энергоемкости формования кускового торфа от коэффициента напора и скорости вращения шнека // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 2(2). – С. 51–60.

118. A Novel Energy Recovery System Integrating Flywheel and Flow Regeneration for a Hydraulic Excavator Boom System / J. Li, J. Zhao, X. Zhang // *Energies*. 2020; 13(2):315. P. 25.
119. A Review on Mechanical and Hydraulic System Modeling of Excavator Manipulator System / Jiaqi Xu, Hwan-Sik Yoon // *Journal of Construction Engineering*, 2016, Article ID 9409370, P. 11.
120. Adapting standard maintenance approaches for mining excavators to actual operating condition / D. A. Shibanov, S. L. Ivanov, K. A. Safronchuk, V. I. Knyazkina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* : 15, Nizhny Tagil, 18–19 июня 2020 года. – Nizhny Tagil, 2020. – P. 012138. – DOI 10.1088/1757-899X/966/1/012138.
121. Azure J. W. A., Ayawah P. E. A., Kaba A. G. A., Kadingdi F. A., Frimpong S. Hydraulic Shovel Digging Phase Simulation and Force Prediction Using Machine Learning Techniques. *Mining, Metallurgy & Exploration* 38, 2393–2404 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00486-9>.
122. Bouhalais M. L., Djebala A., Ouelaa N., Khemissi M. CEEMDAN and OWMRA as a hybrid method for rolling bearing fault diagnosis under variable speed // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 94. P. 2475–2489. DOI: 10.1007/s00170-017-1044-0.
123. Construction Site Navigation for the Autonomous Excavator Thor / D. Schmidt, K. Berns // *Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, Feb 17-19, 2015, Queenstown, New Zealand. P. 90–97.
124. Design of Central Console in Large Mining Excavator Based on Ergonomics / Zhang H., Ren J., Li A., Zhao J. (2020) // In: Long S., Dhillon B. (eds) *Man–Machine–Environment System Engineering. MMESE 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 576. Springer, Singapore. P. 591–598.
125. Development of Unmanned Excavator Vehicle System for Performing Dangerous Construction Work / Lee J, Kim B, Sun D, Han C, Ahn Y. (2019) // *Sensors (Basel)*. 2019 Nov 7;19(22):4853. doi: 10.3390/s19224853. P. 17.

126. Gadolina I. V. Preliminarni koraci planiranja eksperimenata u aditivnim tehnologijama / I. V. Gadolina, M. S. Pugachev // *Integritet i Vek Konstrukcija*. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – P. 19–23.

127. Gawande, S. H., Keste, A. A. & Savadatti, S. G. Recreation of service loads using strain gauges of speed shifting lever. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 41, 460 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1962-x>.

128. Gishvarov, A. S., Davidov, M. N., Zyrianov, A. V. (2019). Planning an Experiment in Assessing Altitude–Velocity Characteristics of Aviation Gas Turbine Engine. In: Radionov, A., Kravchenko, O., Guzeev, V., Rozhdestvenskiy, Y. (eds) *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2019. – P. 665–671. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5\\_69](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_69).

129. Ji Y., Lv X., Zhang L., Zhang G. Electromechanical coupling modeling simulation and experimental study of crawler. *J Mech Sci Technol* 33, 857–868 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0143-2>.

130. Kim D. J., Kwon K. B., Kwon S. S. et al. Durability Testing and Simulation Analysis of the Tension Spring Assembly of a 20-ton Excavator. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 23, 869–879 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12541-022-00682-7>.

131. Kim, S. H., Park, J. W. & Kim, J. H. Functional data analysis for assessing the fatigue life of construction equipment attachments. *J Mech Sci Technol* 35, 495–506 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0108-0>.

132. Lagunova, Y., Makarova, V., Pobegailo, P. (2024). Experimental Mechanics in Relation to Mining Excavators. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-65870-9_40).

133. Li L., Chen X., Liu D., Zhou H., Wu H. An intelligent loader-digger heat balance system based on simulation and wireless sensor networks. *J Wireless Com Network* 2020, 220 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01843-w>.

134. LUCIE the Robot Excavator - Design for System Safety / D. Seward, F. Margrave, I. Sommerville, R. Morrey // 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Minneapolis, Minnesota - April 1996. P. 963-968.

135. Moniri-Morad A., Sattarvand J. A comparative study between the system reliability evaluation methods: case study of mining dump trucks. *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 103 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00272-y>.

136. Nonlinear Model Predictive Control of a Hydraulic Excavator using Hammerstein Models / F. A. Bender, M. Sonntag, O. Sawodny // Proceedings of the 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications, Feb 17-19, 2015, Queenstown, New Zealand. P. 557–562.

137. Optimal design of a hydraulic excavator working device based on parallel particle swarm optimization / X. Li, G. Wang, S. Miao, X. Li // The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 2017. No. 39. P.3793–3805.

138. Seif J., Dehghanimohammadabadi M. & Yu A. J. Integrated preventive maintenance and flow shop scheduling under uncertainty. *Flex Serv Manuf J* 32, 852–887 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10696-019-09357-4>.

139. Statnikov I. N., Firsov G. I. Algorithmization of Computational Experiment Planning Based on Sobol Sequences in the Tasks of Dynamic Systems Research. In: Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education IV. AIMEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1315. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-67133-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-67133-4_8).

140. ViPen. Универсальный компактный виброметр с измерением температуры и контролем подшипников качения. Руководство по эксплуатации Версия 2.02 12.10.2021, 16 с.

141. Virtual operator modeling method for excavator trenching / Yu Du, M. C. Dorneich, B. Steward // *Automation in Construction*, Vol. 70, October 2016, P. 14–25.

142. Zhang Z., Zhang H., Chen Y. et al. Research on dynamic load estimation method of crawler travel system. *J Mech Sci Technol* 37, 555–567 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0102-9>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Матрица данных влияния факторов на отклик для регрессионного анализа

№ опыта	Напряжение, МПа Отклик $O$	Фракция куска, мм $N_1$	Коэффициент крепости породы $N_2$	Скорость экскаватора, м/с $N_3$	Абразивность породы, мг $N_4$	Коэффициент управления $N_5$
1	22	30	8	0,11	2	0,93
2	64	80	10	0,13	4	0,87
3	31	40	9	0,11	3	0,94
4	90	120	11	0,16	5	0,75
5	23	40	9	0,11	2	0,86
6	12	20	8	0,1	1	0,92
7	10	5	8	0,1	1	0,98
8	48	60	9	0,13	3	0,76
9	76	105	12	0,16	5	0,78
10	30	45	8	0,12	2	0,86
11	52	65	8	0,12	4	0,78
12	46	70	9	0,11	4	0,83
13	13	20	8	0,1	1	0,94
14	99	115	13	0,14	6	0,79
15	46	60	9	0,13	3	0,82
16	32	40	9	0,11	2	0,96
17	177	145	16	0,18	11	0,62
18	65	80	11	0,12	4	0,73
19	120	115	12	0,17	8	0,75
20	23	35	8	0,11	2	0,9
21	81	75	11	0,14	5	0,72
22	109	105	13	0,16	7	0,69
23	34	75	9	0,11	3	0,83
24	63	90	11	0,15	4	0,74
25	33	45	8	0,11	3	0,82
26	33	50	9	0,1	3	0,82
27	53	65	10	0,12	4	0,74
28	26	45	9	0,11	2	0,94
29	73	75	11	0,14	4	0,82
30	70	75	12	0,12	5	0,78
31	58	75	11	0,13	4	0,85
32	54	60	11	0,11	4	0,73
33	15	20	8	0,11	1	0,92
34	33	30	9	0,11	3	0,93
35	114	115	12	0,14	7	0,63
36	77	80	12	0,17	5	0,84
37	44	60	10	0,11	3	0,82

38	130	110	14	0,15	8	0,74
39	24	30	8	0,11	2	0,96
40	35	40	9	0,12	3	0,94
41	18	25	8	0,1	2	0,93
42	68	95	11	0,16	5	0,92
43	26	30	9	0,11	3	0,86
44	16	35	8	0,1	1	0,97
45	25	30	8	0,1	2	0,93
46	54	65	10	0,11	4	0,9
47	42	55	8	0,11	3	0,85
48	11	15	9	0,1	1	0,96
49	44	70	10	0,11	3	0,83
50	77	75	11	0,13	5	0,75
51	128	130	13	0,16	8	0,69
52	78	100	10	0,14	5	0,71
53	67	85	11	0,12	5	0,67
54	63	70	10	0,14	4	0,92
55	79	115	11	0,13	5	0,76
56	16	15	9	0,1	2	0,95
57	100	105	13	0,14	6	0,66
58	199	150	16	0,19	12	0,61
59	13	10	8	0,1	1	0,96
60	101	110	13	0,17	6	0,8
61	19	20	8	0,11	2	0,93
62	37	45	9	0,12	3	0,85
63	98	120	12	0,13	6	0,65
64	185	145	16	0,19	12	0,61
65	10	10	8	0,1	1	0,98
66	83	85	12	0,16	5	0,7
67	114	95	12	0,15	7	0,7
68	50	80	10	0,12	4	0,83
69	15	25	8	0,1	1	0,94
70	68	75	11	0,12	4	0,69
71	125	125	13	0,16	8	0,66
72	136	130	14	0,16	9	0,63
73	109	110	13	0,15	7	0,64
74	146	135	15	0,18	9	0,68
75	55	65	10	0,13	4	0,91
76	54	65	11	0,12	3	0,84
77	44	80	9	0,11	3	0,81
78	22	35	8	0,11	2	0,85
79	14	25	9	0,1	1	0,93
80	80	95	12	0,14	5	0,84
81	117	115	13	0,14	7	0,61
82	43	65	9	0,13	3	0,96
83	60	75	11	0,13	5	0,95

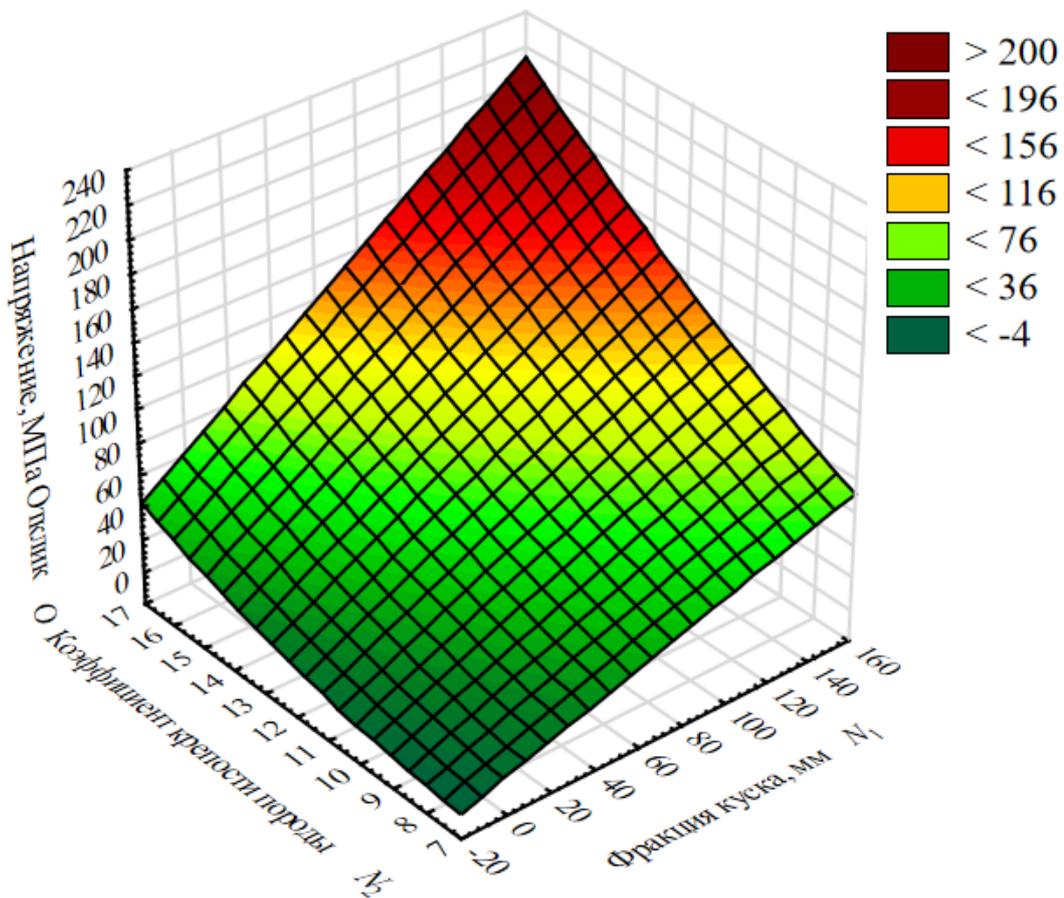
84	45	60	9	0,12	3	0,87
85	28	50	9	0,11	2	0,91
86	87	100	10	0,14	5	0,65
87	134	115	13	0,17	8	0,61
88	108	110	12	0,14	7	0,72
89	30	35	9	0,12	3	0,87
90	170	140	15	0,19	11	0,62
91	10	15	8	0,1	1	0,97
92	136	135	14	0,19	8	0,71
93	91	110	11	0,14	6	0,77
94	29	30	8	0,11	2	0,88
95	20	35	8	0,11	2	0,96
96	13	10	8	0,11	1	0,95
97	24	20	9	0,11	2	0,84
98	8	5	8	0,1	1	0,97
99	50	70	10	0,11	4	0,78
100	44	65	9	0,11	4	0,84
101	52	60	9	0,12	4	0,76
102	75	100	10	0,14	5	0,73
103	15	20	8	0,1	1	0,92
104	90	110	12	0,15	6	0,7
105	62	85	11	0,13	4	0,84
106	113	90	13	0,15	7	0,66
107	37	50	9	0,11	3	0,91
108	34	65	9	0,14	3	0,96
109	65	90	10	0,13	5	0,77
110	27	45	9	0,11	2	0,86
111	20	20	9	0,11	2	0,87
112	108	95	11	0,16	7	0,67
113	13	10	9	0,1	1	0,91
114	15	10	8	0,1	1	0,89
115	46	80	10	0,1	4	0,91
116	106	120	12	0,18	6	0,67
117	45	60	9	0,11	3	0,94
118	60	75	10	0,13	5	0,84
119	48	55	10	0,11	4	0,91
120	12	15	8	0,1	1	0,94
121	88	95	13	0,12	5	0,82
122	56	80	10	0,12	4	0,89
123	114	115	13	0,17	7	0,64
124	16	30	8	0,1	2	0,96
125	54	95	10	0,13	4	0,81
126	77	90	10	0,14	5	0,73
127	97	100	12	0,14	6	0,64
128	59	75	11	0,12	4	0,75
129	150	125	15	0,17	10	0,64

130	100	115	13	0,14	6	0,69
131	36	70	8	0,12	3	0,93
132	152	135	15	0,18	10	0,63
133	125	115	14	0,16	8	0,69
134	133	130	14	0,16	8	0,65
135	29	40	8	0,11	2	0,83
136	86	95	11	0,13	5	0,75
137	36	75	8	0,11	3	0,88
138	31	45	9	0,11	2	0,96
139	101	100	12	0,16	6	0,69
140	51	50	10	0,13	4	0,78
141	92	110	11	0,15	6	0,71
142	42	75	9	0,15	3	0,94
143	117	120	13	0,18	7	0,62
144	39	65	10	0,14	3	0,82
145	26	45	8	0,11	2	0,96
146	36	50	9	0,11	3	0,82
147	27	25	8	0,11	3	0,91
148	37	75	8	0,13	3	0,83
149	36	60	9	0,13	3	0,95
150	36	55	9	0,12	3	0,9
151	105	110	12	0,17	6	0,68
152	8	5	8	0,1	1	0,98
153	102	110	11	0,18	6	0,81
154	92	115	12	0,14	6	0,74
155	68	90	10	0,14	4	0,9
156	95	90	12	0,16	6	0,69
157	21	25	8	0,1	2	0,94
158	76	80	12	0,14	5	0,69
159	110	90	13	0,14	7	0,74
160	108	105	12	0,15	7	0,68

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

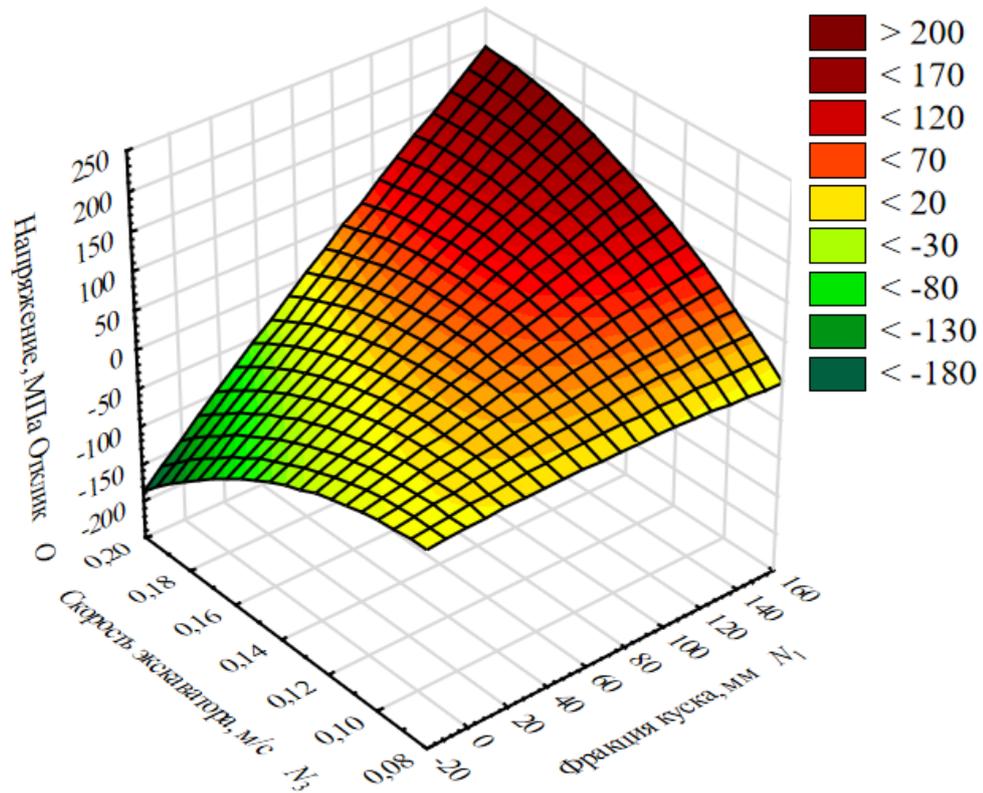
### Графики поверхности отклика зависимости выходной переменной от двух произвольных факторов разработанной модели и уравнения множественной линейной регрессии

Графика 3М XYZ позволяет построить графики поверхности, когда поверхность подгоняется с помощью сглаживания к данным, соответствующим набором координат XYZ. Полученная поверхность является подгонкой к значениям переменной, представленной на оси Z, то есть отклик.



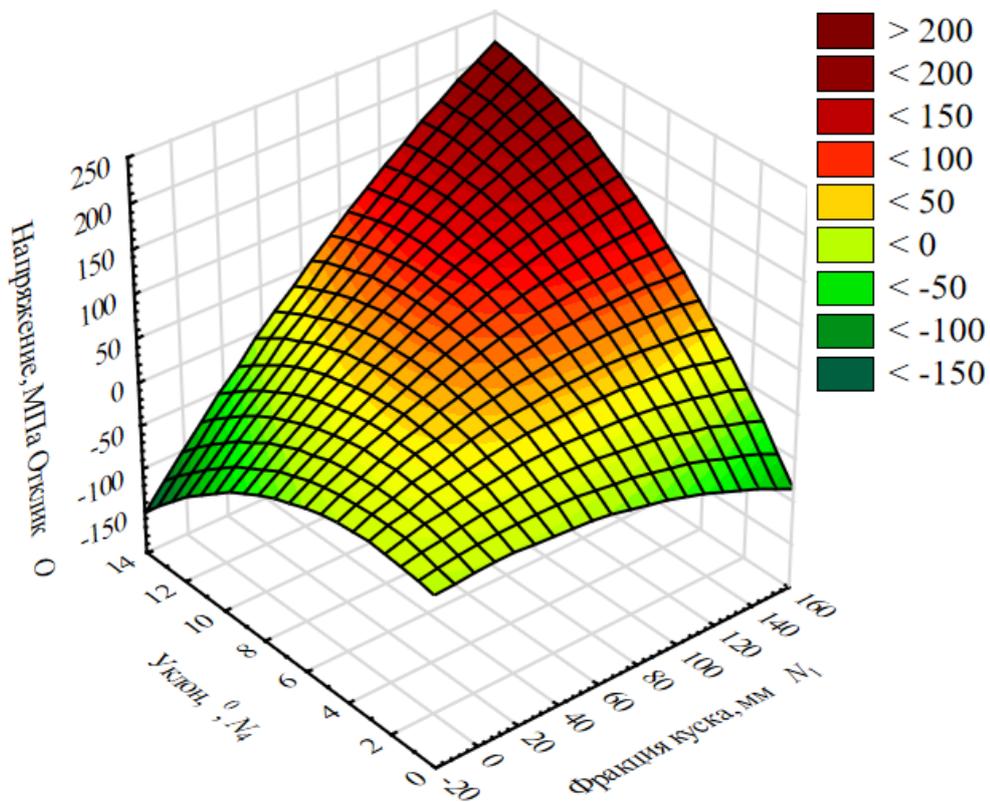
$$\text{Напряжение, МПа } O = 6,1034 + 0,064 * N_1 - 2,9333 * N_2 - 9,0427E - 5 * N_1 * N_1 + 0,0527 * N_1 * N_2 + 0,3658 * N_2 * N_2$$

Рис. П2.1. График поверхности влияния фракции куска породы  $N_1$  и коэффициента крепости породы  $N_2$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



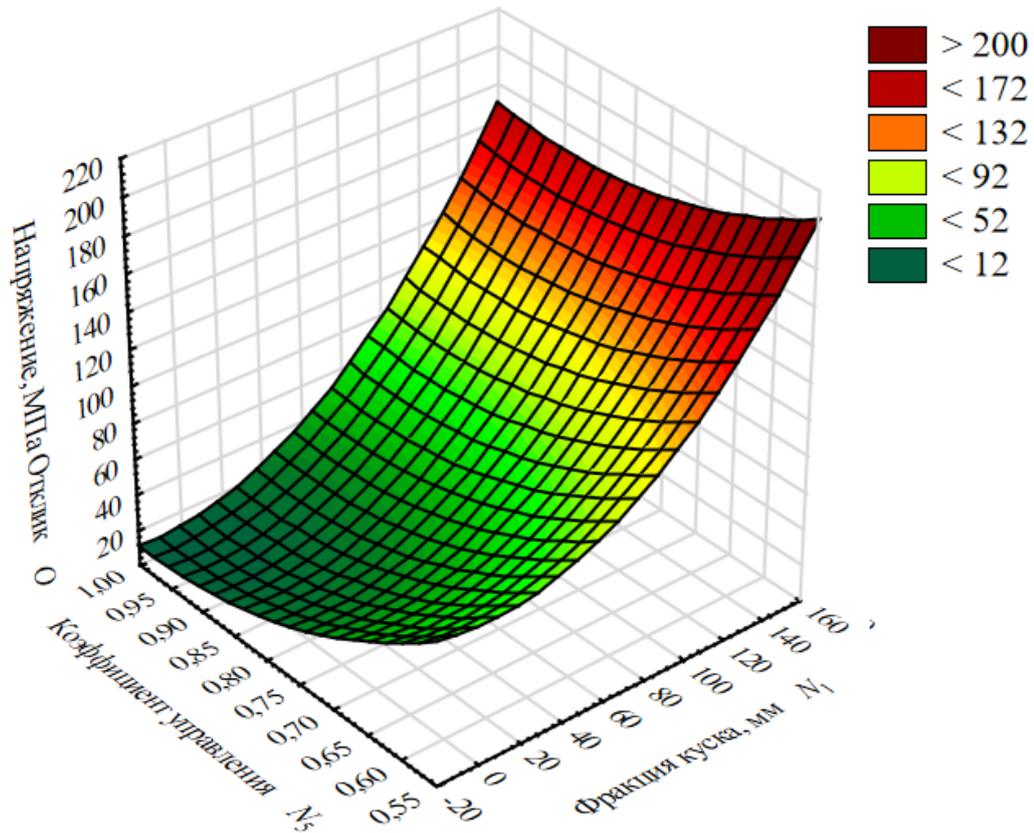
$$\text{Напряжение, МПа } O = -92,894 - 1,3327 * N_1 + 2241,3795 * N_3 - 0,0011 * N_1 * N_1 + 18,2291 * N_1 * N_3 - 12369,4349 * N_3 * N_3$$

Рис. П2.2. График поверхности влияния фракции куска породы  $N_1$  и скорости экскаватора  $N_3$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



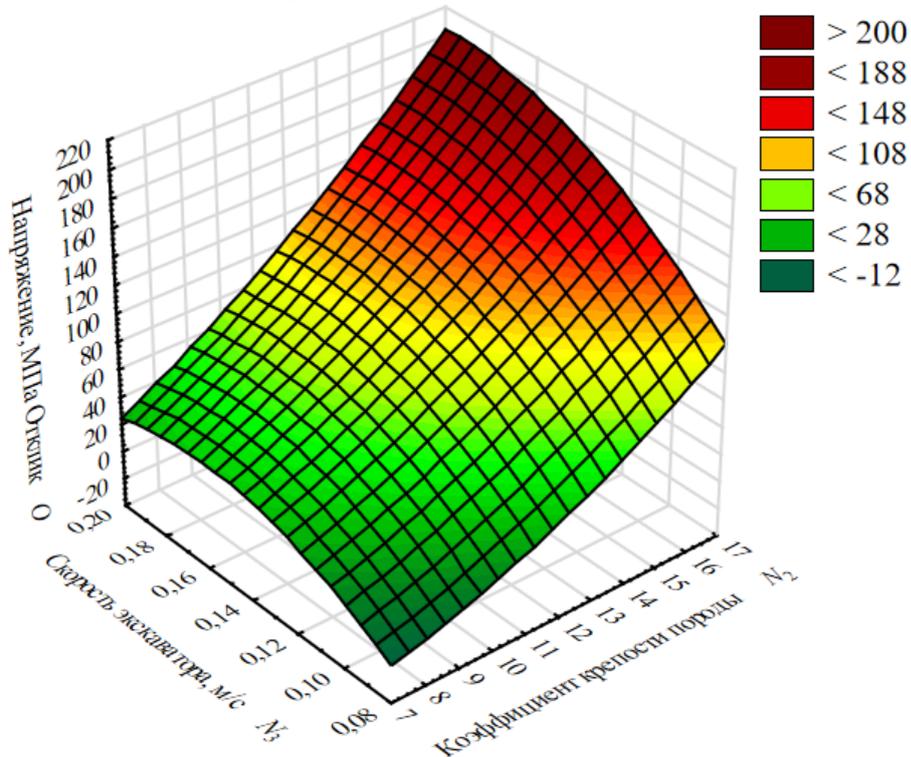
$$\text{Напряжение, МПа } O = -1,9188 + 0,111 * N_1 + 10,0075 * N_4 - 0,0039 * N_1 * N_1 + 0,1773 * N_1 * N_4 - 1,2045 * N_4 * N_4$$

Рис. П2.3. График поверхности влияния фракции куска породы  $N_1$  и уклона площадки  $N_4$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



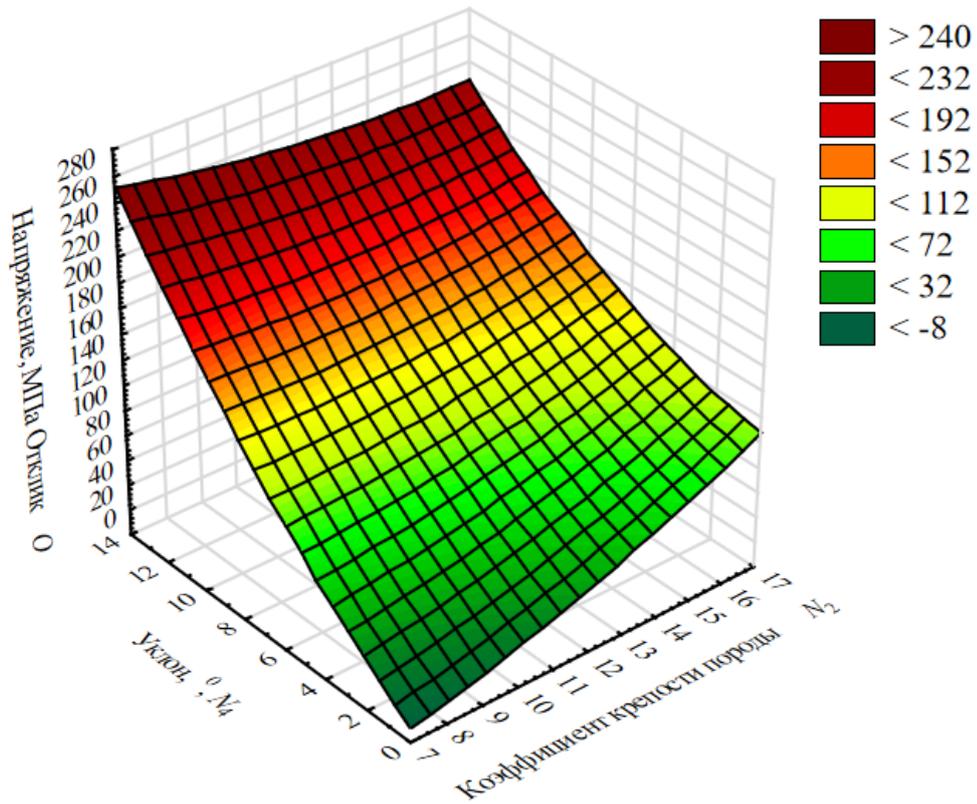
$$\text{Напряжение, МПа } O = 346,9112 - 0,2547 * N_1 - 687,8298 * N_5 + 0,0053 * N_1 * N_1 + 0,3912 * N_1 * N_5 + 353,092 * N_5 * N_5$$

Рис. П2.4. График поверхности влияния фракции куска породы  $N_1$  и коэффициента управления  $N_5$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



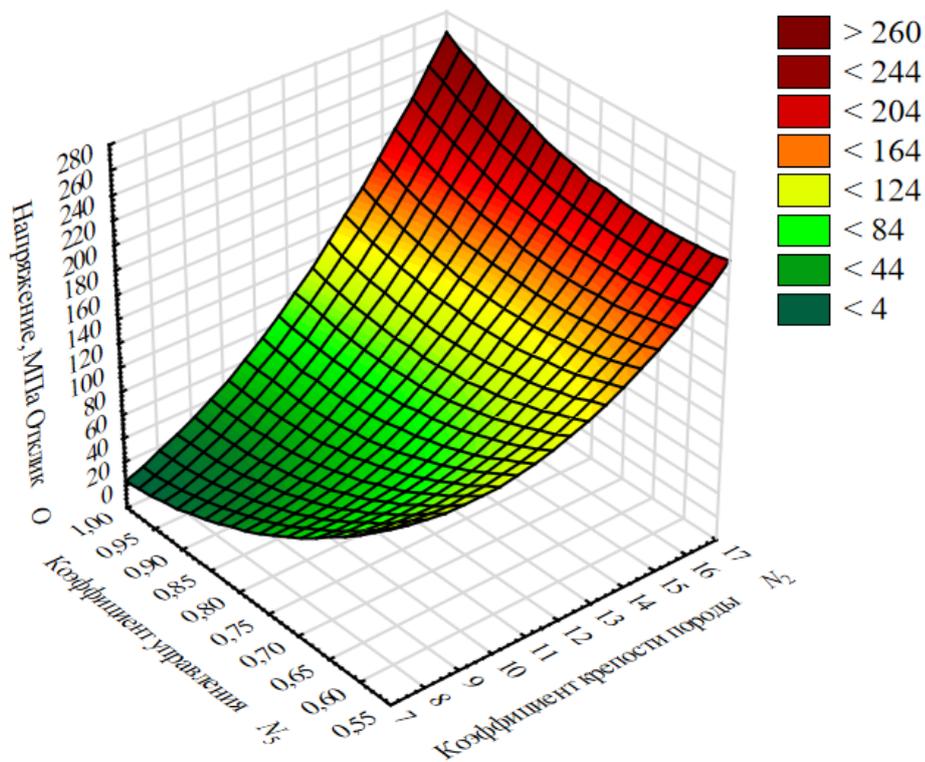
$$\text{Напряжение, МПа } O = -138,9648 - 6,2548 * N_2 + 1977,8354 * N_3 + 0,5459 * N_2 * N_2 + 55,5798 * N_2 * N_3 - 7319,595 * N_3 * N_3$$

Рис. П2.5. График поверхности влияния коэффициента крепости породы  $N_2$  и скорости экскаватора  $N_3$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



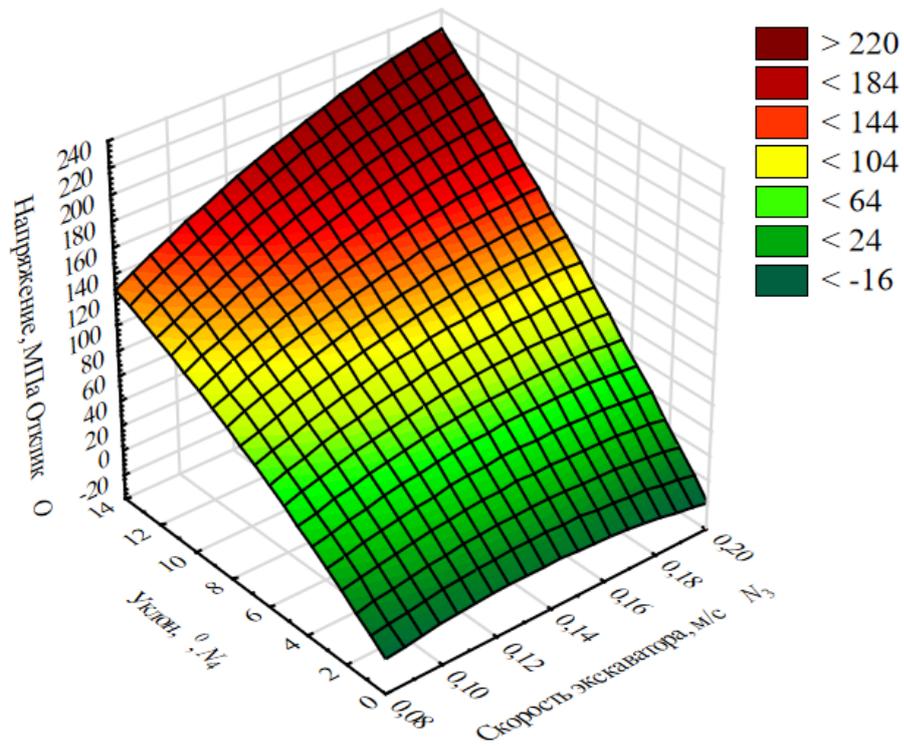
$$\text{Напряжение, МПа } O = -32,2528 + 0,6572 * N_2 + 18,5251 * N_4 + 0,375 * N_2 * N_2 - 0,8798 * N_2 * N_4 + 0,4486 * N_4 * N_4$$

Рис. П2.6. График поверхности влияния коэффициента крепости породы  $N_2$  и уклона площадки  $N_4$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



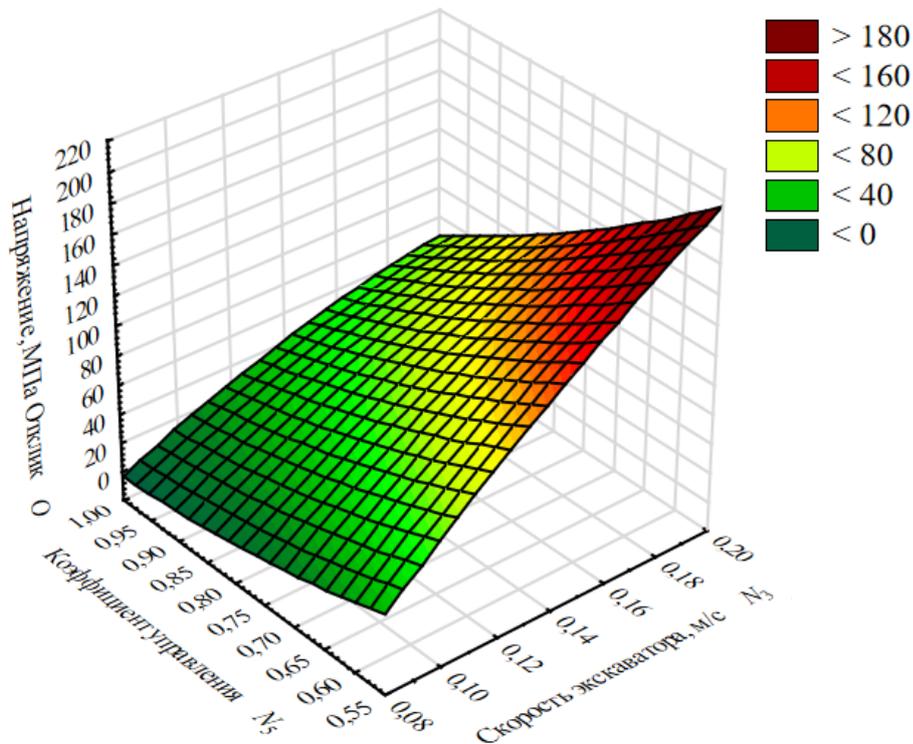
$$\text{Напряжение, МПа } O = 804,8763 - 51,6169 * N_2 - 1247,6183 * N_5 + 1,6357 * N_2 * N_2 + 38,3349 * N_2 * N_5 + 459,3065 * N_5 * N_5$$

Рис. П2.7. График поверхности влияния коэффициента крепости породы  $N_2$  и коэффициента управления  $N_5$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



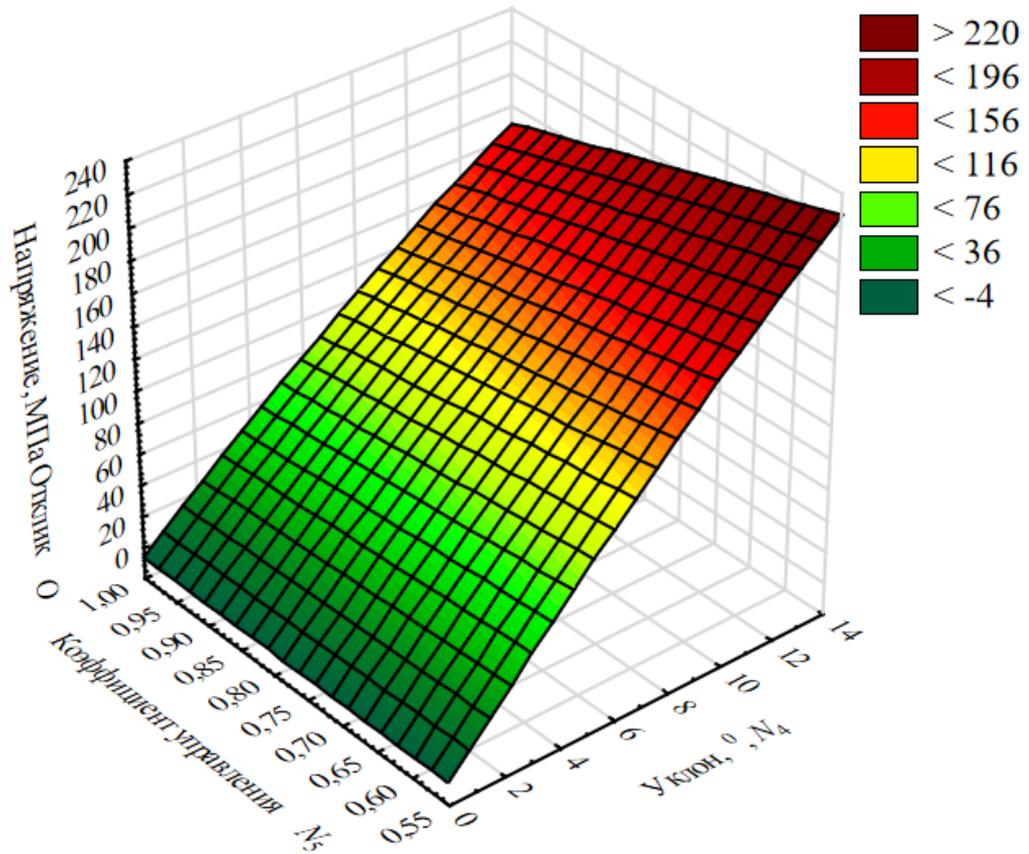
$$\text{Напряжение, МПа } O = -67,7246 + 980,796 * N_3 + 8,5023 * N_4 - 3666,7975 * N_3 * N_3 + 61,2872 * N_3 * N_4 - 0,2427 * N_4 * N_4$$

Рис. П2.8. График поверхности влияния скорости экскаватора  $N_3$  и уклона площадки  $N_4$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



$$\text{Напряжение, МПа } O = -65,3454 + 2975,548 * N_3 - 162,0198 * N_5 - 2512,1345 * N_3 * N_3 - 1687,3444 * N_3 * N_5 + 137,2954 * N_5 * N_5$$

Рис. П2.9. График поверхности влияния скорости экскаватора  $N_3$  и коэффициента управления  $N_5$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора



$$\text{Напряжение, МПа } O = -6,6982 + 24,3589 * N_4 + 1,7761 * N_5 - 0,1837 * N_4 * N_4 - 9,2803 * N_4 * N_5 - 1,4972 * N_5 * N_5$$

Рис. П2.10. График поверхности влияния уклона площадки  $N_4$  и коэффициента управления  $N_5$  на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Оценка адекватности уравнения множественной линейной регрессии по остаткам

Предсказанные значения и остатки Напряжение, МПа Отклик *O*

№	Наблюд. Значение	Предсказанные Значения	Остатки	Станд. предск.	Станд. Остатки	Ст.Ош. предск.	Махалан. Расст.	Удален. Остатки	Кука расст.
1	22,000000	21,188824	0,811176	-1,008941	0,162357	0,687971	2,020982	0,826854	0,000087
2	64,000000	58,345139	5,654861	-0,112460	1,131821	0,671542	1,878716	5,758901	0,004000
3	31,000000	35,571918	-4,571918	-0,661916	-0,915070	0,774938	2,831347	-4,684618	0,003525
4	90,000000	84,322723	5,677277	0,514309	1,136307	1,257766	9,082711	6,061412	0,015546
5	23,000000	27,681770	-4,681770	-0,852284	-0,937056	0,653279	1,724600	-4,763205	0,002590
6	12,000000	8,700288	3,299712	-1,310256	0,660437	0,723136	2,337048	3,370315	0,001589
7	10,000000	5,783991	4,216009	-1,380618	0,843834	0,937951	4,609873	4,370021	0,004494
8	48,000000	45,869038	2,130962	-0,413474	0,426512	0,978360	5,103102	2,215932	0,001257
9	76,000000	85,955177	-9,955177	0,553695	-1,992529	1,106069	6,798674	-10,468214	0,035858
10	30,000000	26,209143	3,790857	-0,887814	0,758740	0,807547	3,160032	3,892548	0,002643
11	52,000000	50,279190	1,720810	-0,307069	0,344420	1,343677	10,506256	1,854975	0,001662
12	46,000000	51,220249	-5,220249	-0,284364	-1,044833	0,961411	4,893690	-5,420977	0,007265
13	13,000000	8,150118	4,849882	-1,323530	0,970704	0,704294	2,165738	4,948208	0,003248
14	99,000000	96,680389	2,319611	0,812466	0,464270	1,207770	8,297562	2,463572	0,002368
15	46,000000	44,218529	1,781471	-0,453297	0,356561	0,718579	2,295205	1,819100	0,000457
16	32,000000	24,930922	7,069078	-0,918654	1,414876	0,746994	2,560460	7,230711	0,007803
17	177,000000	172,828766	4,171234	2,649719	0,834873	1,389644	11,306548	4,520979	0,010557
18	65,000000	64,090881	0,909119	0,026169	0,181960	0,944384	4,686998	0,942803	0,000212
19	120,000000	119,725700	0,274300	1,368487	0,054901	1,205154	8,257354	0,291245	0,000033
20	23,000000	22,436008	0,563992	-0,978850	0,112883	0,640274	1,617449	0,573408	0,000036
21	81,000000	77,692741	3,307259	0,354345	0,661948	0,717891	2,288902	3,376978	0,001572
22	109,000000	112,336082	-3,336082	1,190195	-0,667717	0,724347	2,348209	-3,407708	0,001630
23	34,000000	41,551353	-7,551353	-0,517648	-1,511403	0,921046	4,409700	-7,817006	0,013865
24	63,000000	70,146469	-7,146469	0,172274	-1,430366	1,106601	6,806173	-7,515132	0,018498
25	33,000000	35,571373	-2,571373	-0,661929	-0,514660	0,993954	5,299007	-2,677334	0,001894
26	33,000000	37,887856	-4,887856	-0,606039	-0,978304	0,837100	3,469626	-5,029028	0,004740
27	53,000000	58,826519	-5,826519	-0,100846	-1,166178	0,757986	2,665827	-5,963783	0,005466
28	26,000000	25,903019	0,096981	-0,895200	0,019411	0,701233	2,138330	0,098930	0,000001
29	73,000000	64,851067	8,148933	0,044510	1,631009	0,727794	2,380095	8,325595	0,009820
30	70,000000	76,107849	-6,107849	0,316106	-1,222486	0,977020	5,086412	-6,350700	0,010297
31	58,000000	62,196873	-4,196873	-0,019528	-0,840004	0,704483	2,167429	-4,282006	0,002434
32	54,000000	60,574230	-6,574230	-0,058678	-1,315832	1,100736	6,723719	-6,909606	0,015472
33	15,000000	10,529225	4,470775	-1,266128	0,894826	0,825593	3,347759	4,596276	0,003851
34	33,000000	35,003143	-2,003143	-0,675639	-0,400929	0,872278	3,852635	-2,066119	0,000869
35	114,000000	107,449081	6,550919	1,072285	1,311166	0,999381	5,367906	6,823947	0,012440
36	77,000000	84,023956	-7,023956	0,507100	-1,405845	1,427639	11,988360	-7,648440	0,031890
37	44,000000	44,284145	-0,284145	-0,451714	-0,056872	0,739162	2,486315	-0,290504	0,000012
38	130,000000	123,367973	6,632027	1,456365	1,327400	1,118281	6,971698	6,981795	0,016304
39	24,000000	20,363569	3,636431	-1,028852	0,727832	0,746383	2,554648	3,719437	0,002061
40	35,000000	37,400856	-2,400856	-0,617789	-0,480531	0,767143	2,754783	-2,458824	0,000952
41	18,000000	18,937958	-0,937958	-1,063248	-0,187732	0,756786	2,654251	-0,959983	0,000141

42	68,000000	77,536636	-9,536636	0,350579	-1,908758	1,346007	10,546184	-10,282954	0,051239
43	26,000000	36,928738	-10,928738	-0,629180	-2,187387	0,840954	3,510813	-11,247382	0,023929
44	16,000000	8,590650	7,409350	-1,312901	1,482982	0,788280	2,964195	7,598498	0,009596
45	25,000000	19,359886	5,640114	-1,053068	1,128869	0,713422	2,248164	5,757506	0,004513
46	54,000000	52,596222	1,403778	-0,251166	0,280966	0,922380	4,425359	1,453310	0,000481
47	42,000000	35,589973	6,410027	-0,661480	1,282967	0,921064	4,409914	6,635538	0,009991
48	11,000000	10,901513	0,098487	-1,257146	0,019712	1,056510	6,116016	0,103097	0,000003
49	44,000000	44,852917	-0,852917	-0,437991	-0,170711	0,866065	3,783847	-0,879339	0,000155
50	77,000000	75,038551	1,961449	0,290307	0,392584	0,560563	1,007757	1,986454	0,000332
51	128,000000	124,536552	3,463448	1,484559	0,693209	0,814236	3,229127	3,557943	0,002245
52	78,000000	76,353973	1,646027	0,322044	0,329452	0,992644	5,282428	1,713670	0,000774
53	67,000000	76,254150	-9,254150	0,319636	-1,852218	1,045188	5,964456	-9,677668	0,027365
54	63,000000	57,954792	5,045208	-0,121878	1,009798	0,887758	4,026180	5,209688	0,005721
55	79,000000	78,138893	0,861107	0,365110	0,172351	1,158379	7,553168	0,910025	0,000297
56	16,000000	21,267424	-5,267424	-1,007045	-1,054275	0,985916	5,197640	-5,480845	0,007810
57	100,000000	99,412636	0,587364	0,878387	0,117561	1,039272	5,885907	0,613928	0,000109
58	199,000000	185,445557	13,554443	2,954128	2,712922	1,643631	16,213720	15,199366	0,166929
59	13,000000	6,756090	6,243910	-1,357164	1,249719	0,834031	3,436954	6,422891	0,007675
60	101,000000	101,470192	-0,470192	0,928030	-0,094109	1,247485	8,918661	-0,501454	0,000105
61	19,000000	20,344967	-1,344967	-1,029301	-0,269195	0,848774	3,594981	-1,384936	0,000370
62	37,000000	40,298550	-3,298550	-0,547875	-0,660205	0,588498	1,212216	-3,344958	0,001036
63	98,000000	95,401077	2,598923	0,781599	0,520174	1,226128	8,582150	2,765476	0,003075
64	185,000000	185,023621	-0,023621	2,943948	-0,004728	1,708079	17,589600	-0,026747	0,000001
65	10,000000	6,205920	3,794080	-1,370438	0,759385	0,852243	3,632564	3,907782	0,002967
66	83,000000	86,468140	-3,468140	0,566072	-0,694148	1,206220	8,273721	-3,682795	0,005278
67	114,000000	105,664711	8,335289	1,029233	1,668308	0,794268	3,024556	8,551403	0,012339
68	50,000000	57,616539	-7,616539	-0,130039	-1,524450	0,670028	1,865776	-7,756027	0,007223
69	15,000000	8,572046	6,427954	-1,313350	1,286555	0,680236	1,953569	6,549356	0,005309
70	68,000000	64,769295	3,230705	0,042537	0,646626	1,098199	6,688181	3,394718	0,003717
71	125,000000	124,939880	0,060120	1,494290	0,012033	0,762936	2,713777	0,061555	0,000001
72	136,000000	140,001389	-4,001389	1,857684	-0,800878	0,967682	4,970741	-4,157341	0,004329
73	109,000000	112,304504	-3,304504	1,189433	-0,661397	0,798678	3,069295	-3,391161	0,001962
74	146,000000	146,429260	-0,429260	2,012771	-0,085916	1,099364	6,704486	-0,451101	0,000066
75	55,000000	55,979012	-0,979012	-0,169548	-0,195949	0,716526	2,276431	-0,999570	0,000137
76	54,000000	49,708336	4,291664	-0,320843	0,858977	1,063258	6,207131	4,495247	0,006110
77	44,000000	42,523453	1,476547	-0,494194	0,295531	1,054053	6,082995	1,545326	0,000710
78	22,000000	23,811434	-1,811434	-0,945665	-0,362558	0,768515	2,768203	-1,855331	0,000544
79	14,000000	12,570625	1,429375	-1,216875	0,286089	0,979823	5,121355	1,486547	0,000567
80	80,000000	79,802933	0,197067	0,405258	0,039443	0,958763	4,861306	0,204602	0,000010
81	117,000000	111,722748	5,277252	1,175397	1,056242	1,051258	6,045513	5,521710	0,009012
82	43,000000	40,789268	2,210732	-0,536036	0,442478	0,986554	5,205650	2,300425	0,001378
83	60,000000	69,536850	-9,536850	0,157566	-1,908801	1,241090	8,817294	-10,164018	0,042561
84	45,000000	41,014164	3,985836	-0,530609	0,797765	0,526751	0,773583	4,030638	0,001206
85	28,000000	27,150204	0,849796	-0,865109	0,170087	0,679443	1,946705	0,865808	0,000093
86	87,000000	78,004486	8,995514	0,361867	1,800452	1,244899	8,877604	9,590959	0,038130
87	134,000000	127,300385	6,699615	1,551243	1,340928	1,006534	5,459309	6,983024	0,013213
88	108,000000	104,551392	3,448608	1,002371	0,690239	0,834611	3,443117	3,547604	0,002345

89	30,000000	38,904522	-8,904522	-0,581509	-1,782240	0,759688	2,682276	-9,115264	0,012826
90	170,000000	170,512283	-0,512283	2,593829	-0,102534	1,463042	12,640217	-0,560331	0,000180
91	10,000000	6,902934	3,097066	-1,353621	0,619878	0,770989	2,792464	3,172614	0,001600
92	136,000000	133,618622	2,381378	1,703685	0,476633	1,243712	8,858787	2,538690	0,002666
93	91,000000	89,361649	1,638351	0,635884	0,327916	0,865299	3,775398	1,689013	0,000571
94	29,000000	22,564249	6,435751	-0,975756	1,288116	0,729591	2,396777	6,575978	0,006157
95	20,000000	20,785498	-0,785498	-1,018672	-0,157217	0,721739	2,324188	-0,802238	0,000090
96	13,000000	8,860113	4,139887	-1,306399	0,828598	0,954812	4,813147	4,296813	0,004502
97	24,000000	26,544226	-2,544226	-0,879730	-0,509227	1,026525	5,718175	-2,656360	0,001989
98	8,000000	6,059076	1,940924	-1,373981	0,388476	0,929997	4,515232	2,010586	0,000935
99	50,000000	56,319168	-6,319168	-0,161341	-1,264782	0,799114	3,073734	-6,485067	0,007183
100	44,000000	50,523239	-6,523239	-0,301181	-1,305626	0,927168	4,481765	-6,755893	0,010494
101	52,000000	54,130924	-2,130924	-0,214137	-0,426504	0,954639	4,811039	-2,211668	0,001192
102	75,000000	75,803810	-0,803810	0,308770	-0,160883	0,936298	4,590131	-0,833066	0,000163
103	15,000000	8,700288	6,299712	-1,310256	1,260888	0,723136	2,337048	6,434505	0,005791
104	90,000000	96,839668	-6,839668	0,816309	-1,368960	0,669577	1,861933	-6,964757	0,005817
105	62,000000	63,315815	-1,315815	0,007469	-0,263360	0,820704	3,296489	-1,352304	0,000329
106	113,000000	110,066620	2,933380	1,135439	0,587116	0,984581	5,180885	3,051898	0,002415
107	37,000000	37,241028	-0,241028	-0,621645	-0,048242	0,635734	1,580552	-0,244994	0,000006
108	34,000000	42,618206	-8,618206	-0,491908	-1,724934	1,142811	7,324987	-9,093996	0,028889
109	65,000000	72,030670	-7,030670	0,217735	-1,407189	0,773929	2,821390	-7,203516	0,008313
110	27,000000	28,103699	-1,103699	-0,842104	-0,220905	0,650000	1,697384	-1,122701	0,000142
111	20,000000	25,718971	-5,718971	-0,899641	-1,144652	0,929351	4,507582	-5,923937	0,008107
112	108,000000	104,595413	3,404587	1,003434	0,681428	1,281802	9,471518	3,644463	0,005837
113	13,000000	11,855009	1,144991	-1,234141	0,229170	1,137207	7,243599	1,207551	0,000504
114	15,000000	8,681685	6,318315	-1,310704	1,264611	0,949199	4,745073	6,554902	0,010354
115	46,000000	51,757984	-5,757984	-0,271390	-1,152461	1,455964	12,508617	-6,292332	0,022449
116	106,000000	103,995598	2,004402	0,988962	0,401181	1,397550	11,446895	2,174545	0,002470
117	45,000000	37,259632	7,740368	-0,621196	1,549235	0,867734	3,802278	7,981108	0,012828
118	60,000000	68,839287	-8,839287	0,140735	-1,769183	0,753970	2,627154	-9,045275	0,012440
119	48,000000	51,477280	-3,477280	-0,278163	-0,695978	0,929582	4,510320	-3,601968	0,002999
120	12,000000	7,728189	4,271811	-1,333710	0,855003	0,759385	2,679346	4,372828	0,002949
121	88,000000	80,418716	7,581284	0,420116	1,517394	1,601631	15,345540	8,449587	0,048985
122	56,000000	55,966030	0,033970	-0,169861	0,006799	0,872710	3,857443	0,035039	0,000000
123	114,000000	116,384308	-2,384308	1,287868	-0,477219	0,944200	4,684786	-2,472615	0,001458
124	16,000000	18,534632	-2,534632	-1,072979	-0,507307	0,779229	2,873823	-2,597822	0,001096
125	54,000000	61,261433	-7,261433	-0,042098	-1,453376	0,891259	4,065855	-7,500096	0,011951
126	77,000000	74,959953	2,040047	0,288410	0,408315	0,836846	3,466915	2,098931	0,000825
127	97,000000	95,817383	1,182617	0,791644	0,236701	0,886682	4,014015	1,221075	0,000314
128	59,000000	63,118786	-4,118786	0,002715	-0,824375	0,840153	3,502236	-4,238640	0,003392
129	150,000000	154,947632	-4,947632	2,218296	-0,990269	1,295772	9,700869	-5,304416	0,012636
130	100,000000	99,431244	0,568756	0,878836	0,113837	1,079364	6,426934	0,596600	0,000111
131	36,000000	36,484020	-0,484020	-0,639909	-0,096877	1,148451	7,407293	-0,511021	0,000092
132	152,000000	157,895508	-5,895508	2,289420	-1,179986	1,142042	7,313795	-6,220522	0,013499
133	125,000000	126,994263	-1,994263	1,543857	-0,399152	0,882755	3,969762	-2,058524	0,000883
134	133,000000	129,360382	3,639618	1,600945	0,728470	0,853590	3,647205	3,749047	0,002739
135	29,000000	24,783531	4,216469	-0,922210	0,843926	0,820083	3,289995	4,333213	0,003378

136	86,000000	76,726265	9,273735	0,331027	1,856138	0,666416	1,835030	9,441713	0,010589
137	36,000000	36,452435	-0,452435	-0,640672	-0,090555	1,207688	8,296299	-0,480510	0,000090
138	31,000000	25,352850	5,647150	-0,908474	1,130277	0,779970	2,881186	5,788213	0,005452
139	101,000000	98,099838	2,900162	0,846713	0,580467	0,809198	3,177033	2,978286	0,001554
140	51,000000	58,289330	-7,289330	-0,113806	-1,458959	0,835609	3,453740	-7,499091	0,010503
141	92,000000	92,841095	-0,841095	0,719834	-0,168345	0,811297	3,198704	-0,863873	0,000131
142	42,000000	45,841171	-3,841171	-0,414147	-0,768810	1,381824	11,168506	-4,159328	0,008835
143	117,000000	119,185341	-2,185341	1,355449	-0,437396	1,226758	8,591997	-2,325542	0,002177
144	39,000000	50,192886	-11,192886	-0,309152	-2,240256	0,937149	4,600287	-11,601041	0,031614
145	26,000000	21,629356	4,370644	-0,998312	0,874784	0,768452	2,767587	4,476542	0,003165
146	36,000000	39,716793	-3,716793	-0,561911	-0,743916	0,637707	1,596551	-3,778347	0,001553
147	27,000000	31,407892	-4,407892	-0,762383	-0,882240	1,141728	7,309220	-4,650754	0,007541
148	37,000000	41,485737	-4,485737	-0,519232	-0,897820	1,166493	7,673327	-4,744351	0,008192
149	36,000000	40,642422	-4,642422	-0,539578	-0,929181	0,887590	4,024279	-4,793711	0,004842
150	36,000000	39,766983	-3,766983	-0,560701	-0,753962	0,550861	0,939072	-3,813339	0,001180
151	105,000000	101,047714	3,952286	0,917837	0,791050	1,071904	6,324716	4,142979	0,005275
152	8,000000	5,783991	2,216009	-1,380618	0,443534	0,937951	4,609873	2,296960	0,001241
153	102,000000	95,577057	6,422943	0,785845	1,285552	1,470200	12,773940	7,031823	0,028586
154	92,000000	94,332321	-2,332321	0,755813	-0,466814	0,836255	3,460613	-2,399544	0,001077
155	68,000000	60,192680	7,807320	-0,067884	1,562635	1,034959	5,828922	8,157351	0,019064
156	95,000000	97,255981	-2,255981	0,826353	-0,451535	0,918583	4,380842	-2,334907	0,001230
157	21,000000	18,662872	2,337128	-1,069885	0,467776	0,768162	2,764748	2,393711	0,000904
158	76,000000	82,663422	-6,663422	0,474274	-1,333684	0,968337	4,978821	-6,923491	0,012022
159	110,000000	106,036995	3,963005	1,038215	0,793195	0,966515	4,956368	4,117075	0,004235
160	108,000000	107,058739	0,941261	1,062867	0,188393	0,724223	2,347071	0,961463	0,000130

Наблюд. Значения – наблюдаемые значения зависимой переменной.

Предсказанные значения – это значение зависимой переменной, предсказанные уравнением регрессии.

Остатки – это наблюдаемые значение минус предсказанные значения.

Станд. предск. – стандартизированные предсказанные, значение зависимой переменной.

Станд. Остатки – стандартизированные значения остатков (наблюдаемые значения минус предсказанные, деленные на корень квадратный из среднего квадрата остатков).

Ст.Ош. предск. – стандартные ошибки нестандартизированных предсказанных значений.

Махалан. Расст. – расстояние Махаланобиса – это расстояние от наблюдаемой точки до центра тяжести в многомерном пространстве, определяемом

коррелированными независимыми переменными. Эта мера позволяет определить является ли данное наблюдение выбросом по отношению к остальным значениям независимых переменных.

Удален. Остатки – стандартизированное значение остатка соответствующего наблюдению, если бы оно было исключено из вычислений.

Кука расст. – мера влияния соответствующего наблюдения на регрессионное уравнение, которое показывает различия между вычисленными значениями  $\hat{Y}$  и значениями, которые получились бы при исключении соответствующего наблюдения.

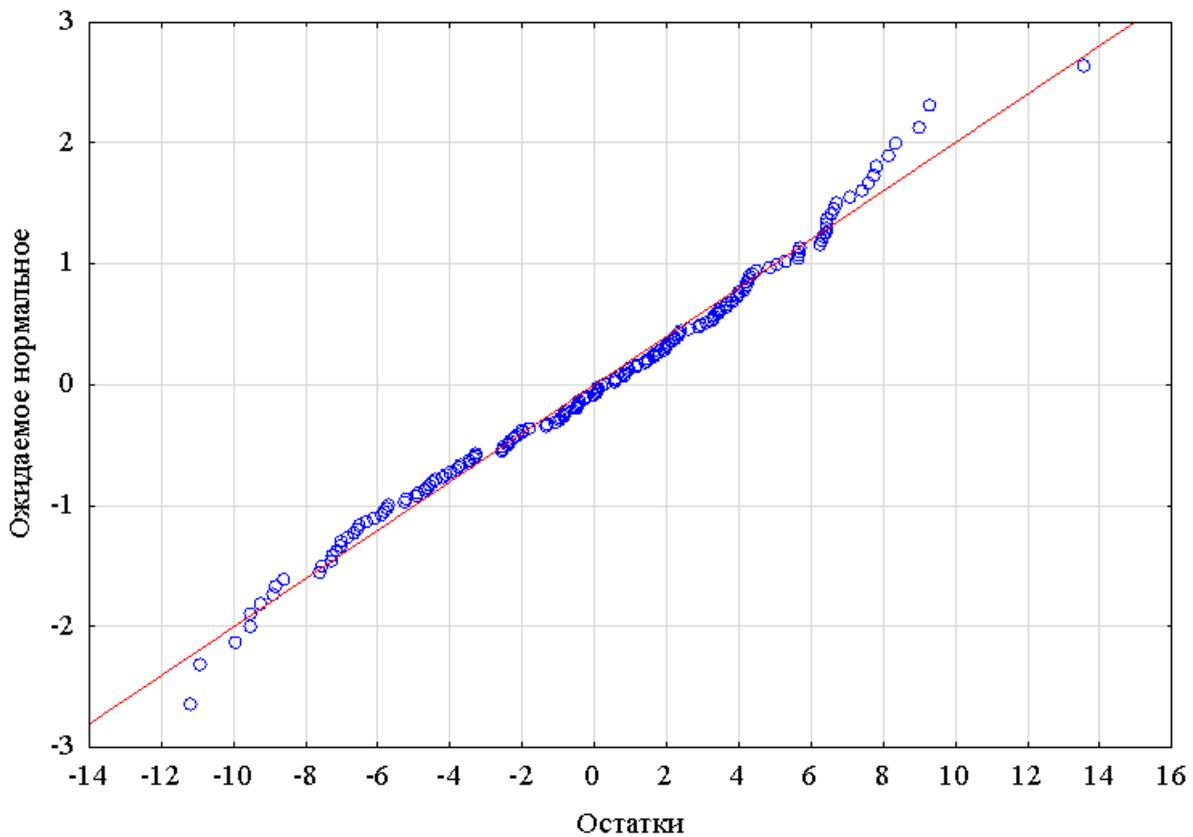


Рис. ПЗ.1. Нормальный вероятностный график остатков. Обеспечивает быстрый способ визуальной проверки того, в какой мере распределение остатков подчиняется нормальному закону

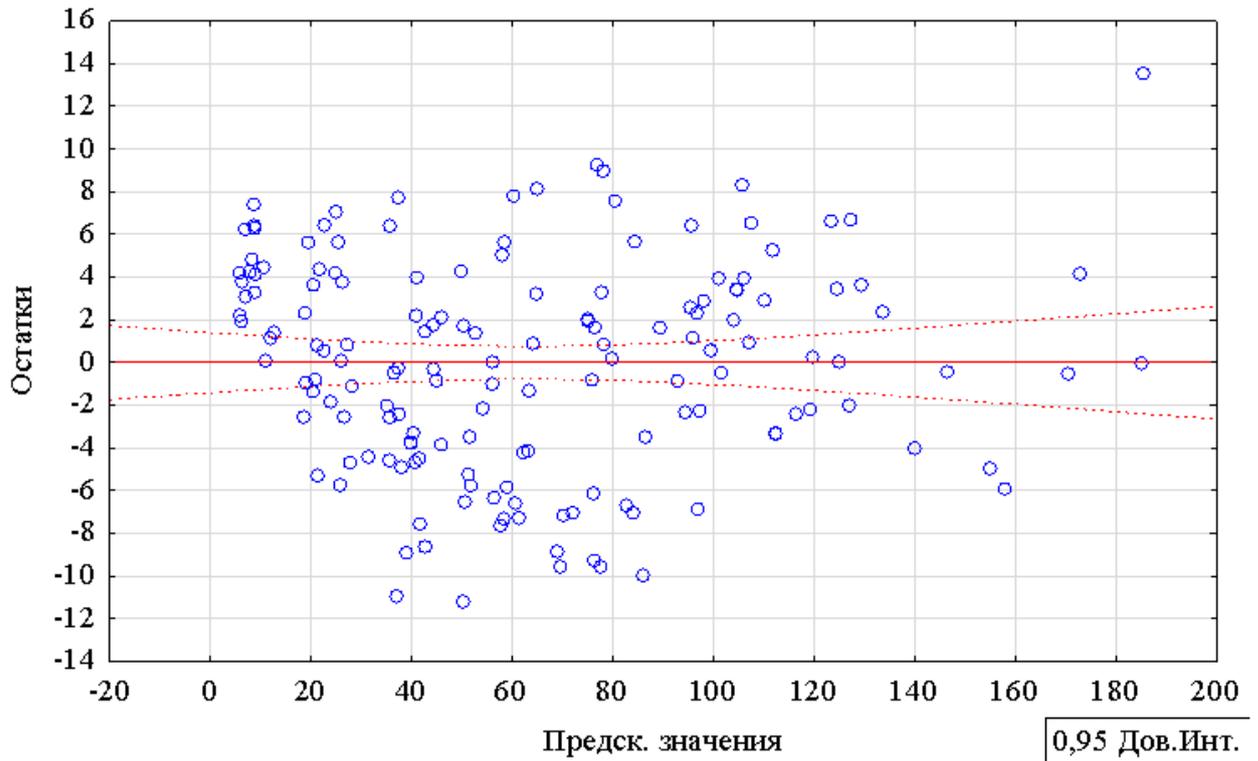


Рис. ПЗ.2. Предсказанные значения и остатки. График линейности связи между независимыми и зависимой переменной

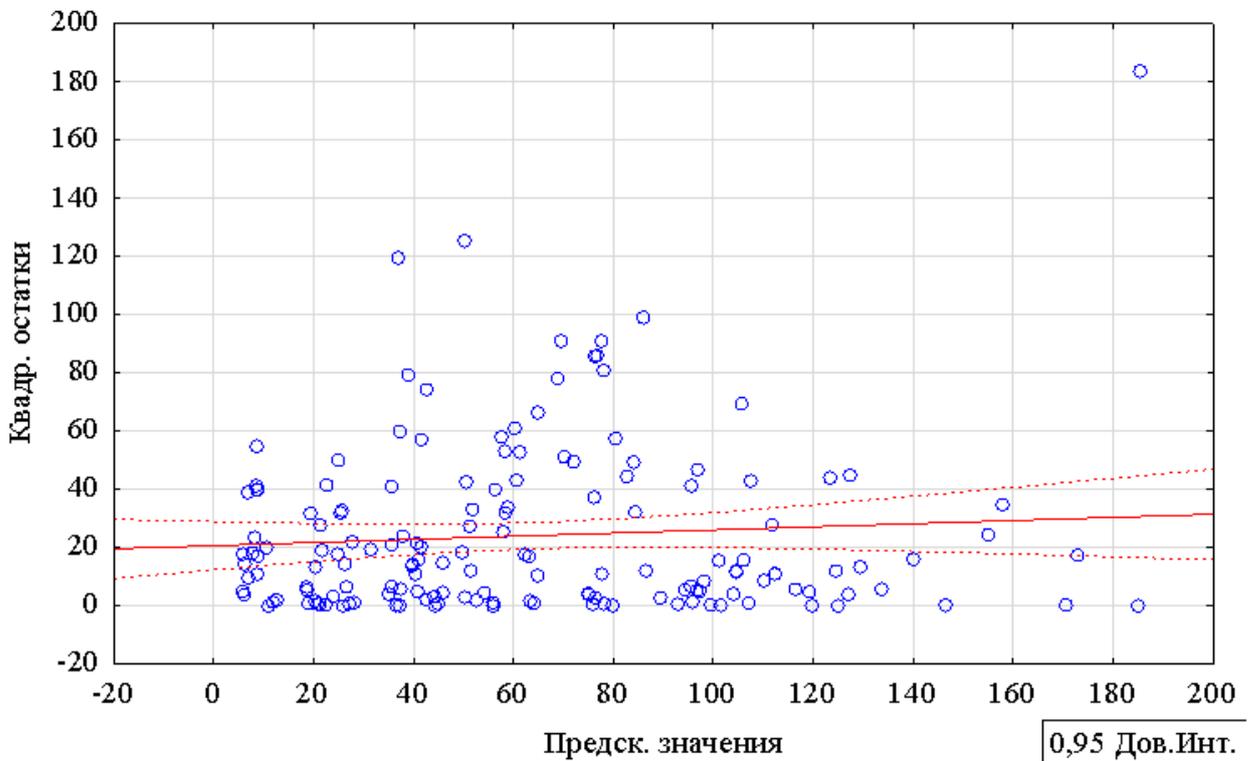


Рис. ПЗ.3. Предсказанные значения и квадраты остатков

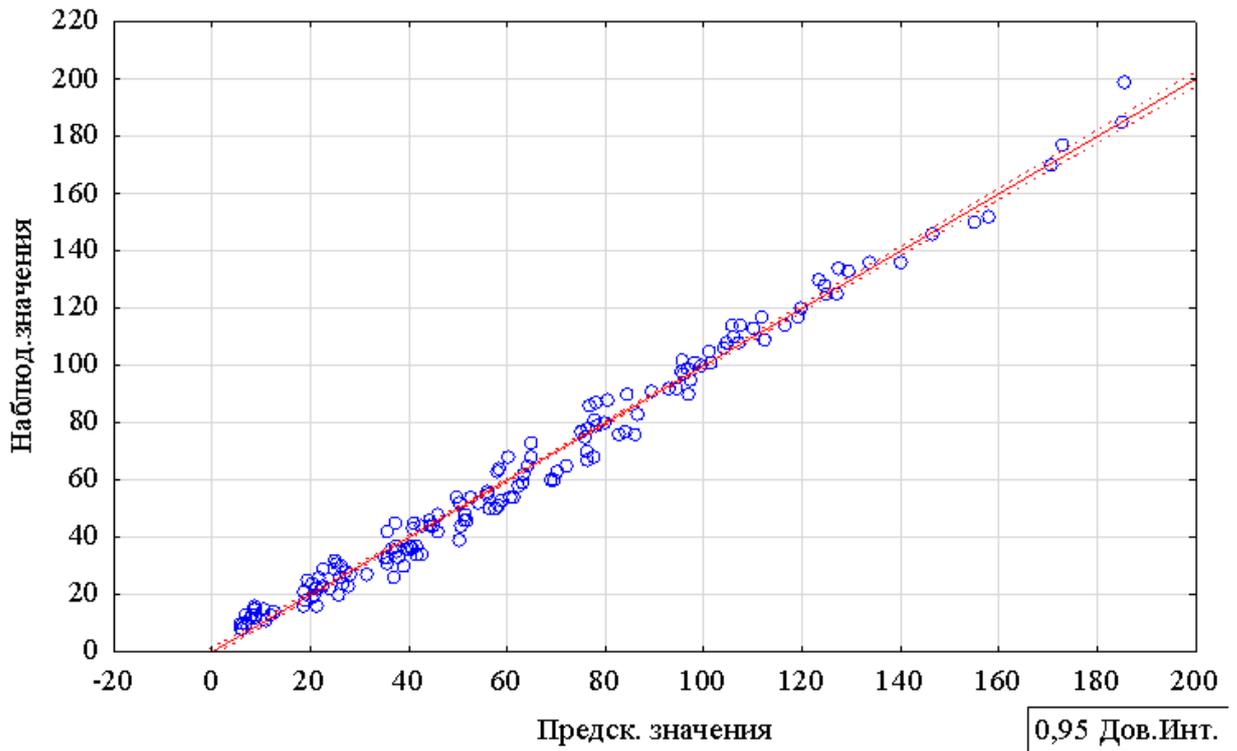


Рис. ПЗ.4. Предсказанные и наблюдаемые значения

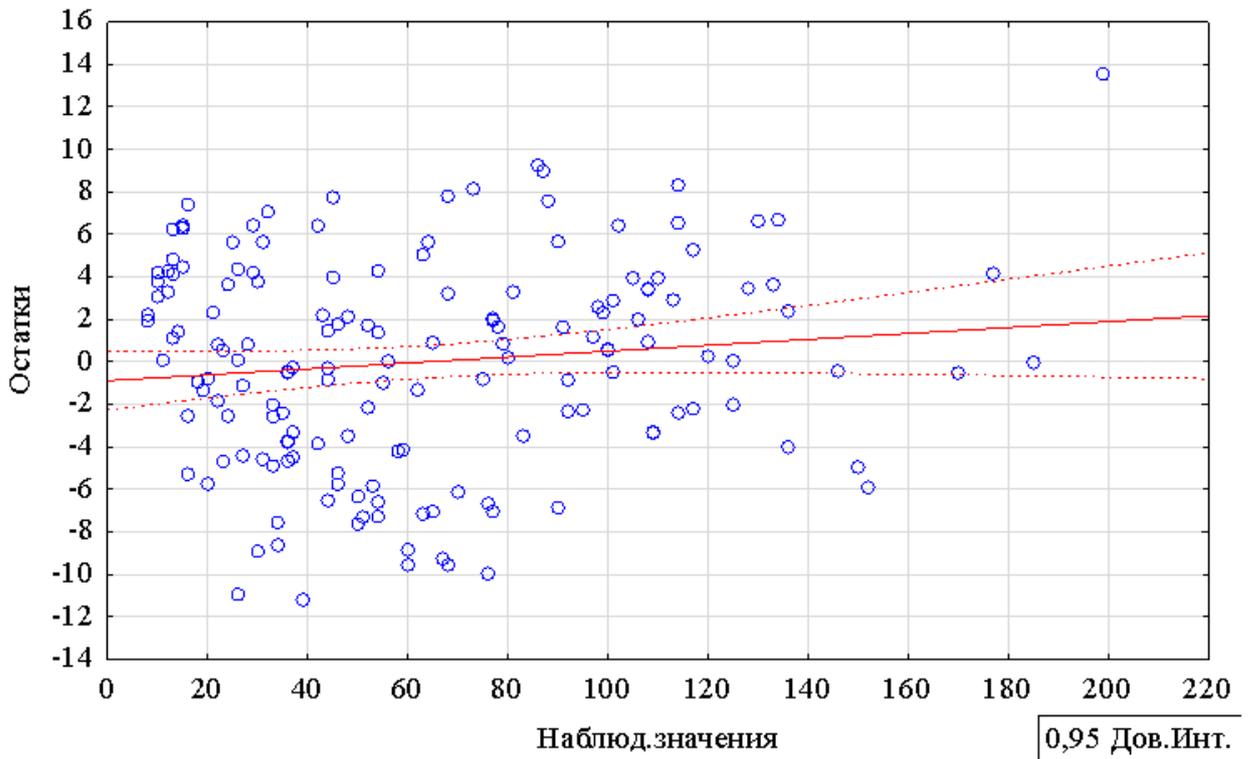


Рис. ПЗ.5. Наблюдаемые значения и остатки

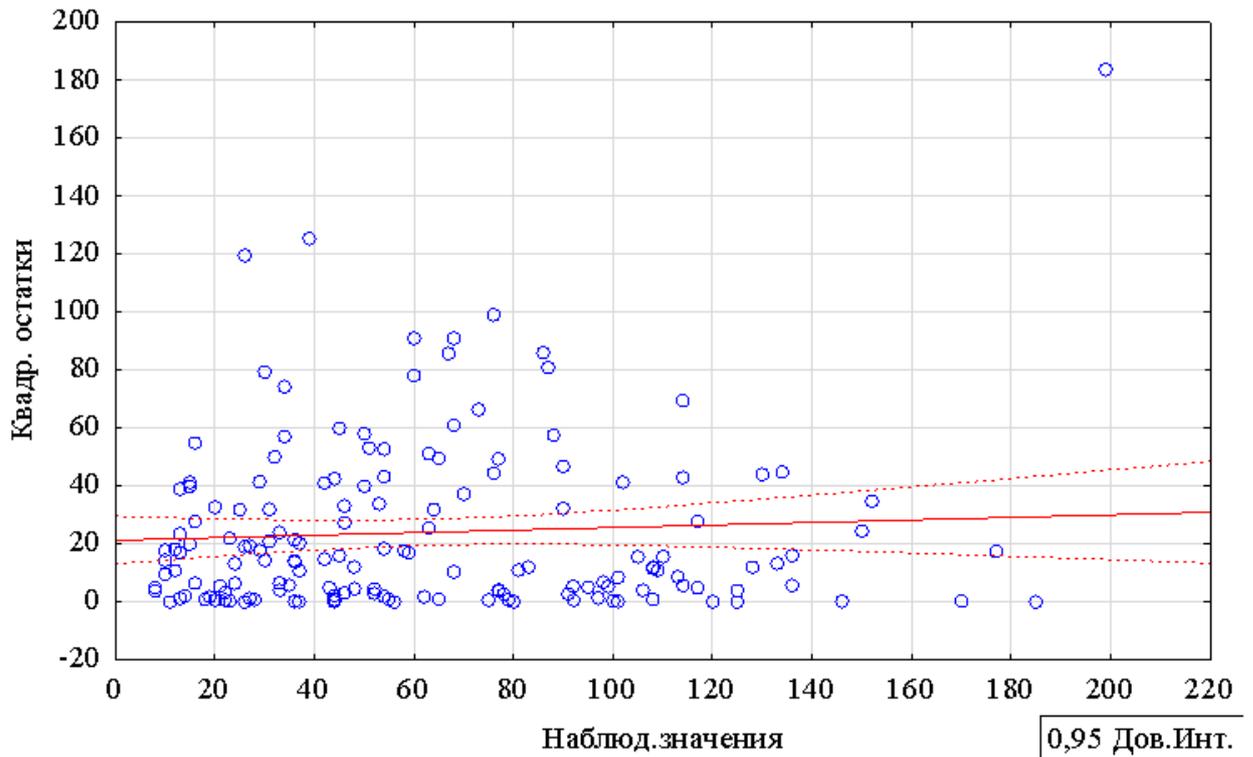


Рис. ПЗ.6. Наблюдаемые значения и квадраты остатков

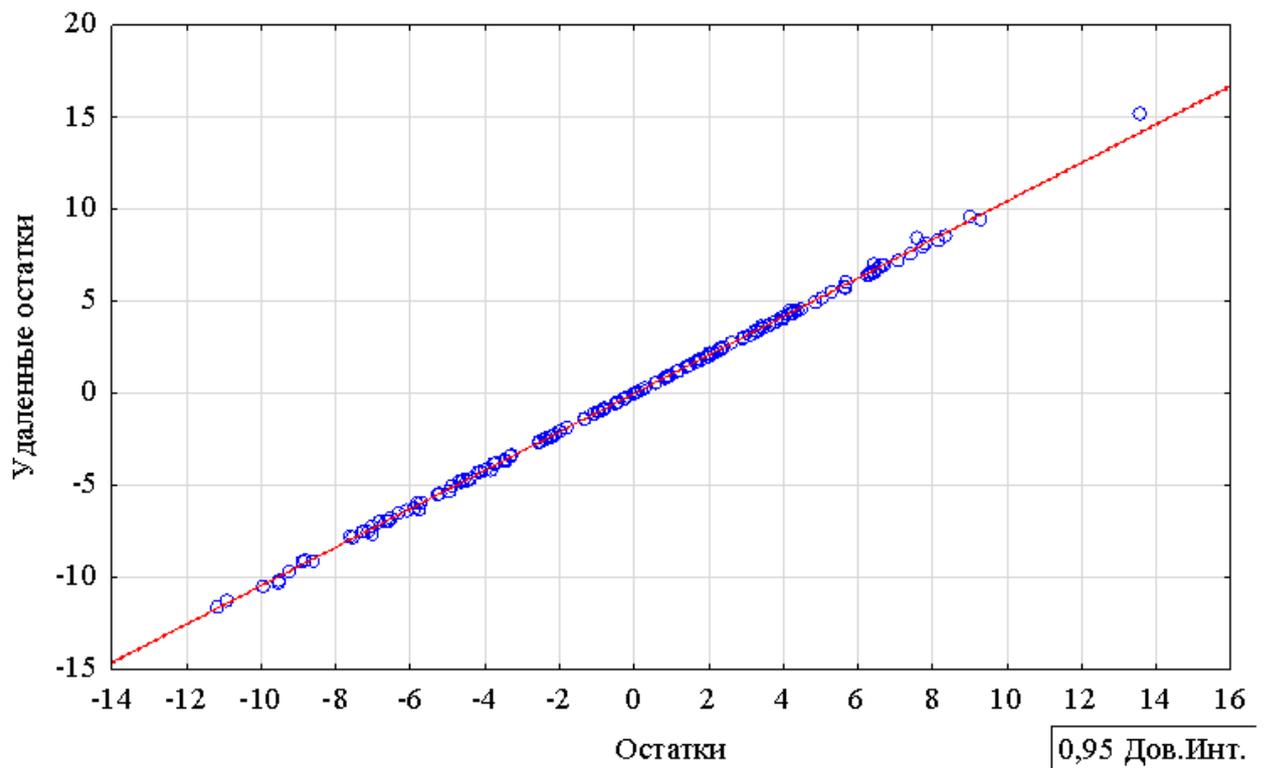


Рис. ПЗ.7. Остатки и удаленные остатки

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Графические характеристики статистической значимости полученной линейной множественной регрессии наиболее значимых факторов, влияющих на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора

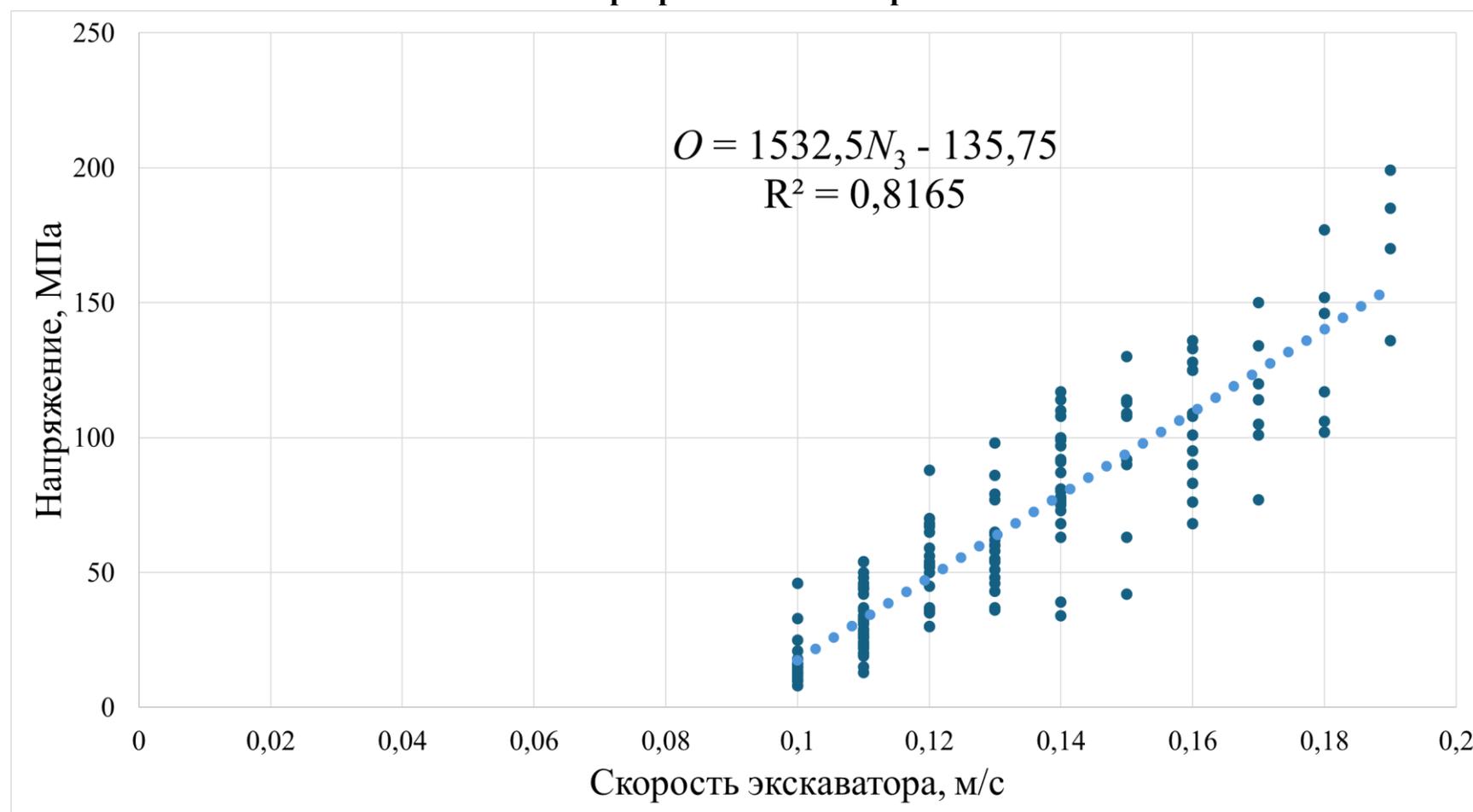


Рис. П4.1. График зависимости напряжения от скорости экскаватора

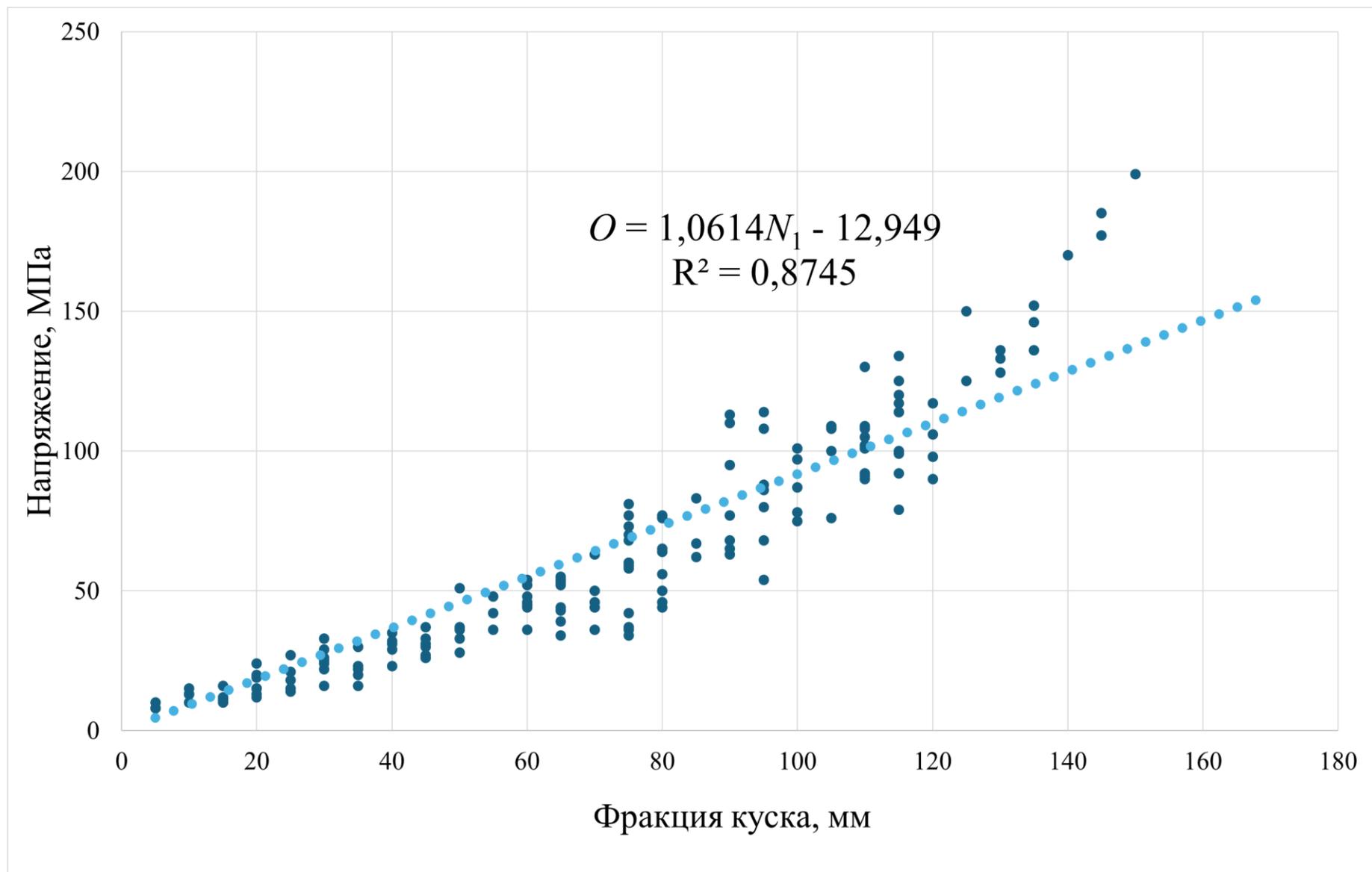


Рис. П4.2. График зависимости напряжения от фракции куска

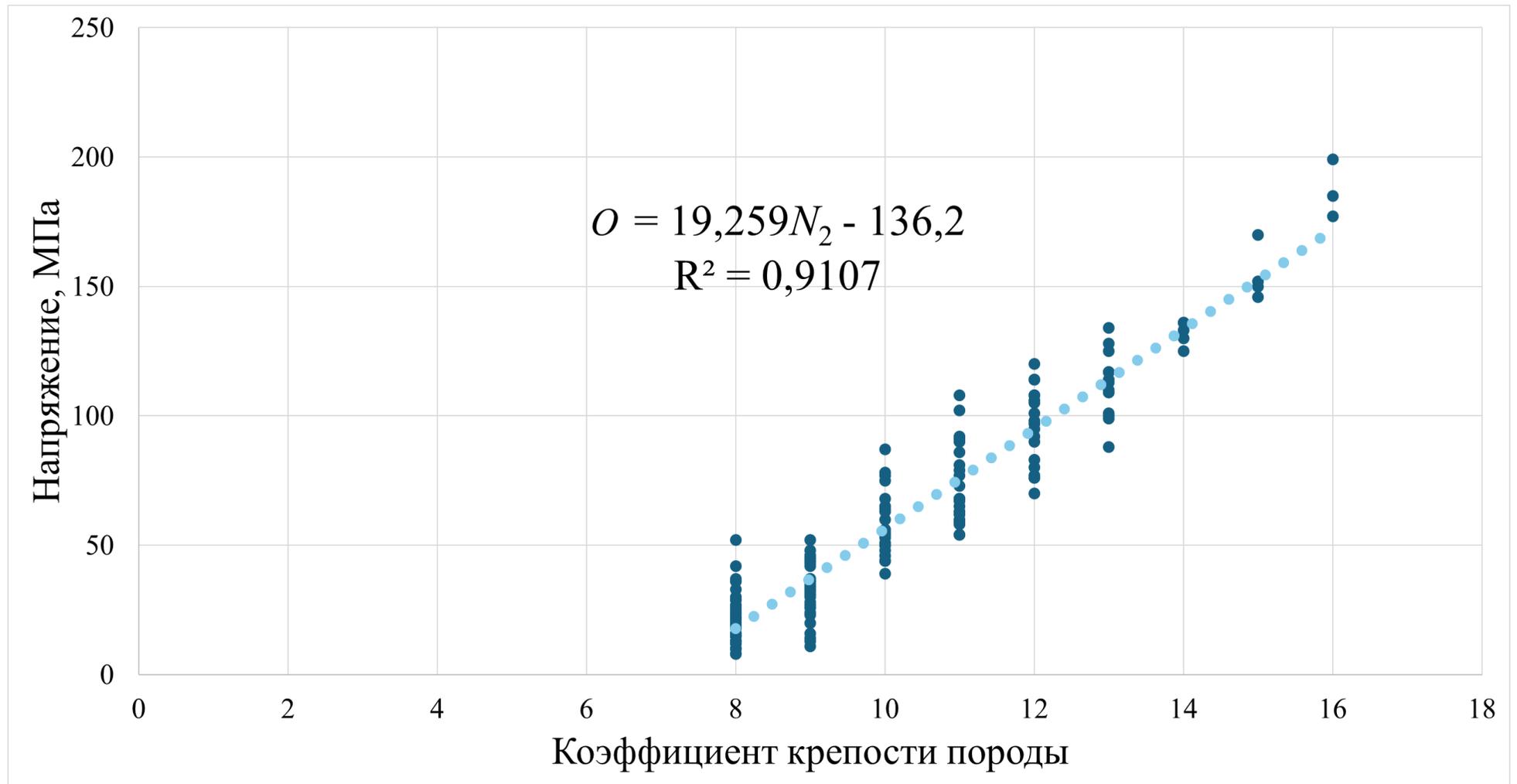


Рис. П4.3. График зависимости напряжения от коэффициента крепости породы

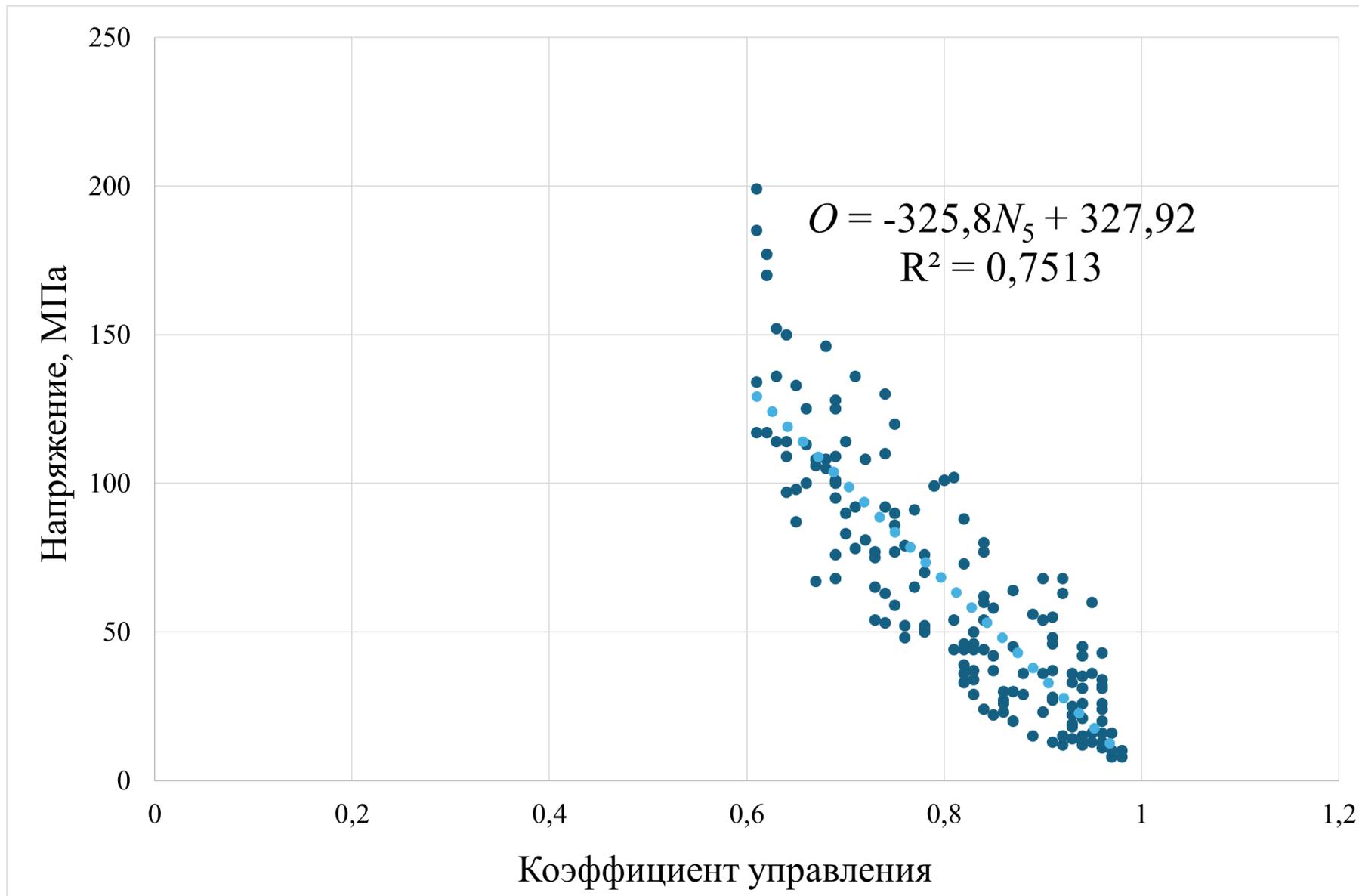


Рис. П4.4.График зависимости напряжения от коэффициента управления

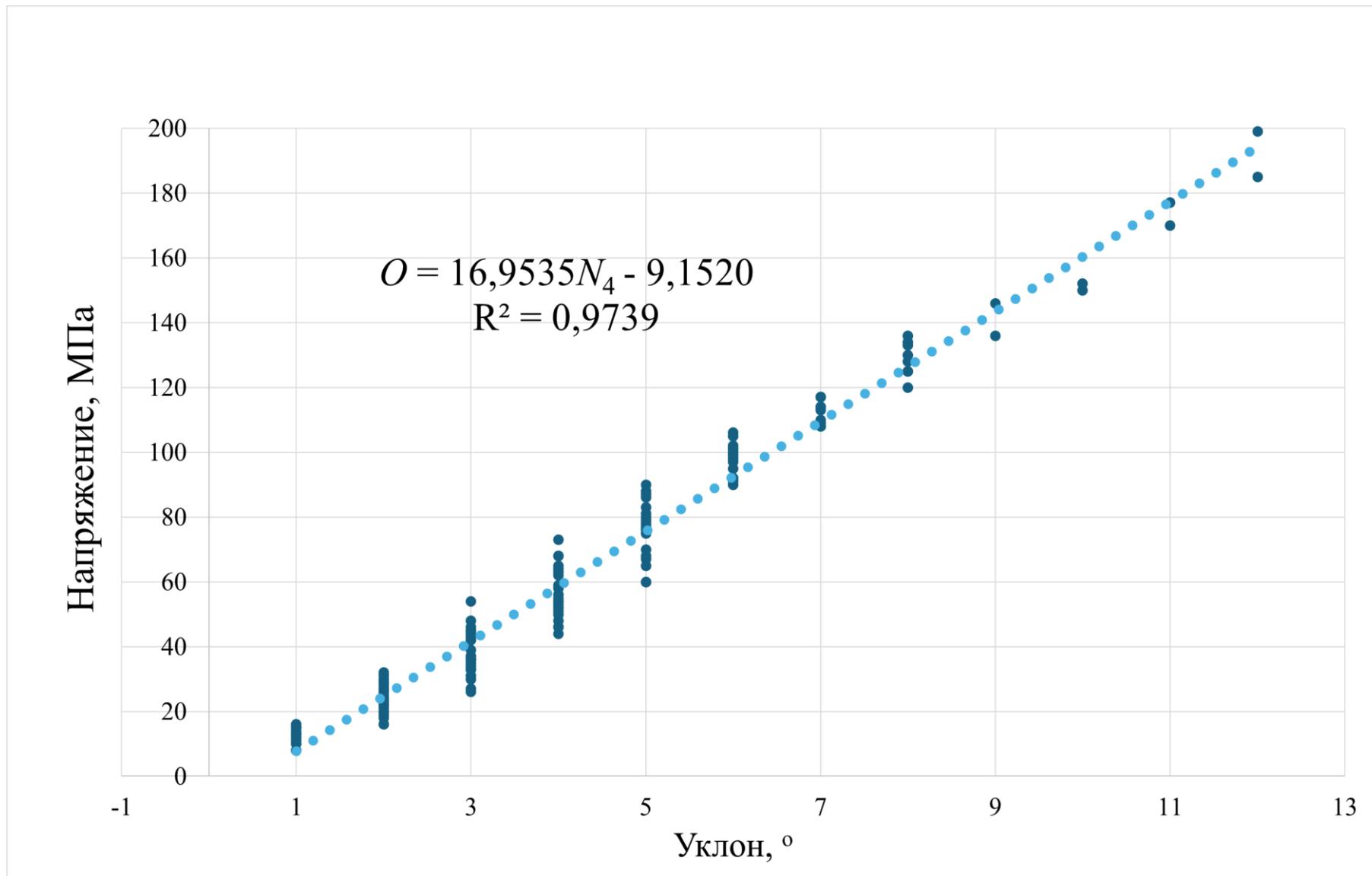


Рис. П4.4.График зависимости напряжения от уклона площадки

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Данные рудоуправления предприятия ПАО Ураласбест в период с 01.01.2020 по 01.04.2022 из отчета по затратам на ремонт карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333

№ ЗВР	Актив	Назначенная операция	Отдел	Операции обслуживания			Материалы					Трудозатраты				Продолжительность ремонта
				Дата начала	Код	Описание	Описание	ЕИ	Кол-во	Цена	Сумма	Наименование ресурса	Время использования	Тариф	Стоимость	
238195	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.01.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Ма-ш-Экс7 р	7	423	2961,5	7
238195	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.01.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	20	261,1	5222,4					7
238575	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	20.01.2020	К516	Отремонтировать муфту генератора						Ма-ш-Экс7 р	0,667	422,79	282,18	0,667
238575	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	20.01.2020	К516	Отремонтировать муфту генератора	ИЗДЕЛИЯ ЦЕХА ГУММИРОВАНИЯ АМОТИЗАТОР Ф 30	ШТ	12	30,33	363,93					0,667
238575	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	20.01.2020	К516	Отремонтировать муфту генератора	КРЕПЕЖНЫЕ ИЗДЕЛИЯ БОЛТ ПРИЗОННЫЙ Д/МУФТ М16х 80 мм чертеж №4679	ШТ	6	346	2076					0,667
238889	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	25.01.2020	К542	Ремонт генератора напора-хода (мелкий ремонт с заменой или						Элек-Ме-хан	3	358,67	1075,8	3

						ремонт щеточного аппарата)											
238889	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	25.01.2020	К542	Ремонт генератора напора-хода (мелкий ремонт с заменой или ремонтом щеточного аппарата)	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5X32X40	ШТ	16	150,8	2412,8						3
238895	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	25.01.2020	К542	Ремонт генератора напора-хода (мелкий ремонт с заменой или ремонтом щеточного аппарата)						Ма-ш-Экс7 р	6	423	2538,4		6
238895	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	25.01.2020	К542	Ремонт генератора напора-хода (мелкий ремонт с заменой или ремонтом щеточного аппарата)						Пом Ма-шЭкс5 р	6	201,67	1210,3		6
239326	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	31.01.2020	К330	Демонтировать и смонтировать колпак опорного колеса						Ма-ш-Экс7 р	1	423	423,06		7
239326	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	31.01.2020	К330	Демонтировать и смонтировать колпак опорного колеса						Пом Ма-шЭкс5 р	1	202	201,71		7
239326	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	31.01.2020	К330	Демонтировать и смонтировать колпак опорного колеса						Сле-сарь6 р	1	303	302,6		7
239326	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	31.01.2020	К330	Демонтировать и смонтировать колпак опорного колеса						Элек Свар 5р	1	262	261,92		7
239326	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	31.01.2020	К330	Демонтировать и смонтировать колпак опорного колеса						СамК рА3	1	646	646		7
239326	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	31.01.2020	К330	Демонтировать и смонтировать колпак опорного колеса	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ. ДУГЛЕРО.СТА-ЛЕЙ ф 5ММ ОЗС4	КГ	1	96,62	96,62						7

239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Автокран 30	1,5	910	1365	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Ма-ш-Экс7 р	1,5	423,33	634,6	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Пом Ма-шЭкс5 р	1,5	202	302,57	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Элек Слес бр	1,5	302,67	454,24	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Элек Слес бр	1,5	302,67	454,24	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						СамК рА3	5,75	646,09	3714,5	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						ЖД кран 25	5,75	1316,7	7571,4	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Ма-ш-Экс7 р	5,75	423,13	2432,6	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Пом Ма-шЭкс5 р	5,75	201,74	1159,8	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Элек-Ме-хан	5,75	358,61	2062	7,25
239355	01.ЭКГ10-333	ПРЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	03.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода	ЗАП.ЧАСТИ К ЭЛ.ДВИГАТЕ-ЛЯМ Генератор 4ГПЭ-125 Б/У	ШТ	1	38818	38818					7,25

239357	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	03.02.2020	К542	Ремонт генератора напора-хода (мелкий ре- монт с заменой или ре- монтом щеточного аппа- рата)						Ма- ш- Экс7 р	5,16 7	423,07	2186	6,167
239357	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	03.02.2020	К542	Ремонт генератора напора-хода (мелкий ре- монт с заменой или ре- монтом щеточного аппа- рата)	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕ- СКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5X32X40	ШТ	10	150,8	1508					6,167
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Авто- кран 30	1,66 7	910,02	1517	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Ма- ш- Экс7 р	1,66 7	422,92	705,25	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Элек Слес бр	1,66 7	302,94	504,81	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К540	Демонтировать генератор напора-хода						Элек Слес бр	1,66 7	302,94	504,81	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						СамК рАЗ	5	646	3230	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Авто- кран 30	8	910	7280	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Ма- ш- Экс7 р	8	423,12	3384,5	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Пом Ма- шЭкс5 р	8	201,75	1613,7	21,667

240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода						Элек- Ме- хан	8	358,62	2868,9	21,667
240643	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	12.02.2020	К541	Смонтировать генератор напора-хода	ЗАП.ЧАСТИ К ЭЛ.ДВИГАТЕ- ЛЯМ Генератор 4ГПЭ-125 Б/У	ШТ	1	38818	38818					21,667
240893	01.ЭКГ10-333	ТОМ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.02.2020	К330	Демонтировать и смонти- ровать колпак опорного колеса						Ма- ш- Экс7 р	2	423	846,13	7
240893	01.ЭКГ10-333	ТОМ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.02.2020	К330	Демонтировать и смонти- ровать колпак опорного колеса						Пом Ма- шЭкс5 р	2	201,5	403,42	7
240893	01.ЭКГ10-333	ТОМ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.02.2020	К330	Демонтировать и смонти- ровать колпак опорного колеса						Сле- сарь6 р	2	302,5	605,2	7
240893	01.ЭКГ10-333	ТОМ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.02.2020	К330	Демонтировать и смонти- ровать колпак опорного колеса						Элек Свар 5р	2	262	523,83	7
240893	01.ЭКГ10-333	ТОМ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.02.2020	К330	Демонтировать и смонти- ровать колпак опорного колеса						ГАЗ груз	2	536	1072	7
240893	01.ЭКГ10-333	ТОМ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.02.2020	К330	Демонтировать и смонти- ровать колпак опорного колеса	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ. Д/УГЛЕРО.СТА- ЛЕЙ ф 4ММ ОЗС4	КГ	2	96,28	192,57					7
253908	01.ЭКГ10-333	ТЭЭ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Ма- ш- Экс7 р	5,58 3	423,07	2362	11,583
253908	01.ЭКГ10-333	ТЭЭ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Элек Слес бр	5,58 3	302,88	1690,7	11,583
253908	01.ЭКГ10-333	ТЭЭ- ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Элек Слес бр	5,58 3	302,88	1690,7	11,583

253908	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Ма-ш-Экс7 р	3	423	1269,2	11,583
253908	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Элек Слес бр	3	302,67	908,48	11,583
253908	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Элек Слес бр	3	302,67	908,48	11,583
253908	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.08.2020	К529	Смонтировать генератор вращения-хода	ЗАП.ЧАСТИ К ЭЛ.ДВИГАТЕ- ЛЯМ Генератор ПЭМ-141 Б/У	ШТ	1	85902	85902					11,583
254224	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	18.08.2020	К348	Осмотреть металлокон- струкции механизмов пе- редвижения, тормозов с опробыванием их дей- ствия, смазка колес, сре- зать раскаты кулачков ве- дущих колес						Ма- ш- Экс7 р	1	423	423,06	6
254224	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	18.08.2020	К348	Осмотреть металлокон- струкции механизмов пе- редвижения, тормозов с опробыванием их дей- ствия, смазка колес, сре- зать раскаты кулачков ве- дущих колес						Элек Свар бр	1	297	296,77	6
254224	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	18.08.2020	К348	Осмотреть металлокон- струкции механизмов пе- редвижения, тормозов с опробыванием их дей- ствия, смазка колес, сре- зать раскаты кулачков ве- дущих колес	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ. Д/УГЛЕРО.СТА- ЛЕЙ ф 5ММ ОЗС4	КГ	1	105,5	105,5					6
259647	01.ЭКГ10-333		ЦГЦ РУ	28.10.2020	К516	Отремонтировать муфту генератора						Ма- ш- Экс7 р	0,5	424	211,53	0,5

285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	21.12.2021	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Автокран 30	3	910	2730	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	21.12.2021	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Ма-ш-Экс7 р	3	423	1269,2	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	21.12.2021	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Пом Ма-шЭк5 р	3	201,67	605,13	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	21.12.2021	К528	Демонтировать генератор вращения-хода						Элек-Ме-хан	3	358,67	1075,8	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						СамК рА3	9	646	5814	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Автокран 30	9	910	8190	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Ма-ш-Экс7 р	9	423,11	3807,6	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Пом Ма-шЭк5 р	9	201,67	1815,4	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К529	Смонтировать генератор вращения-хода						Элек-Ме-хан	9	358,56	3227,5	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К529	Смонтировать генератор вращения-хода	ЗАП.ЧАСТИ К ЭЛ.ДВИГАТЕ-ЛЯМ Генератор ПЭМ-141 Б/У	ШТ	1	85902	85902					19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К527	Отцентровать генератор вращения-хода						Ма-ш-Экс7 р	3	423	1269,2	19

285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К527	Отцентровать генератор вращения-хода						Элек Слес бр	3	302,67	908,48	19
285640	01.ЭКГ10-333	Т2Э-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	22.12.2021	К527	Отцентровать генератор вращения-хода						Элек Слес бр	3	302,67	908,48	19
285875	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	27.12.2021	К352	Прокрепить клинья замков гусеничных рам						Ма- ш- Экс7 р	2	423	846,13	5
285875	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	27.12.2021	К352	Прокрепить клинья замков гусеничных рам						Пом Ма- шЭк5 р	2	201,5	403,42	5
285875	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	27.12.2021	К352	Прокрепить клинья замков гусеничных рам						Сле- сарь5 р	2	229	457,93	5
285875	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	27.12.2021	К352	Прокрепить клинья замков гусеничных рам						Сле- сарь6 р	2	302,5	605,2	5
285875	01.ЭКГ10-333	ТОМ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	27.12.2021	К352	Прокрепить клинья замков гусеничных рам						ГАЗ груз	2	536	1072	5
240718	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.02.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	3	248	743,54	7
240718	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.02.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	30	261,1	7833,6					7
243323	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	04.03.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	2	248	495,69	7
245158	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.04.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	2,5	248	619,62	5,5

245158	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.04.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	20	261,4	5228,3						5,5
247811	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.05.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Ма-ш-Экс7 р	1	423	423,06		4
247811	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.05.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	1	248	247,85		4
247811	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.05.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	10	261,4	2614,2						4
249188	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	11.06.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	3	248	743,54		6
249188	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	11.06.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	16	110,9	1773,8						6
252283	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.07.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	2	248	495,69		5
252283	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.07.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	15	261,5	3922						5
253988	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.08.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Ма-ш-Экс7 р	6	423	2538,4		6
253988	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.08.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	10	261,5	2614,7						6
256300	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.09.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 4р	4	190	759,67		7

256300	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	14.09.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	10	261,5	2614,7						7
258878	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	16.10.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	6	247,83	1487,1		6
258878	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	16.10.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	16	261,5	4183,4						6
260436	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	11.11.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	3	248	743,54		7
260436	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	11.11.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	20	261,5	5229,3						7
262269	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	09.12.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	1	248	247,85		4
262269	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	09.12.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЛЕНТА ИЗОЛЯЦИОННАЯ ЛЭТСАР КФ 0,5	КГ	0,2	858	171,6						4
262269	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	09.12.2020	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	20	261,5	5229,3						4
264197	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.01.2021	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 3р	4	119	476		6
264197	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	13.01.2021	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	20	261,5	5229,3						6
265525	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	05.02.2021	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 4р	4	190	759,67		7
265525	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	05.02.2021	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЗАПЧАСТИ К ЭКСКАВАТОРУ ЭКГ- 8И	ШТ	4	636,9	2547,5						7

							ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛЬ ДрПр1 25x50 ДП /25X50/										
285522	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	20.12.2021	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	4	247,75	991,39		4
285522	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	20.12.2021	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода	ЩЕТКА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭГ-14 2/12,5x50x54	ШТ	10	267,5	2675,3						4
286594	01.ЭКГ10-333	ТОЭ-ЭКГ10	ЦГЦ РУ	19.01.2022	К964	Ревизия двигателей главных приводов и двигателей хода						Элек Слес 5р	4	247,75	991,39		4

Данные рудоуправления предприятия ПАО Ураласбест из отчета по видам дефектов ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.04.2022 по 31.08.2023

Номер	Объект эксплуатации	Краткое описание дефекта	Дата начала	Время начала	Дата завершения	Время завершения	Продолжительность	Вид дефекта	Способ устранения
205	333 ЭКГ-10	Неисправность бортового редуктора левой гусеничной рамы	12.04.2022	14:00	12.04.2022	14:50	0,83	Механика	Устраняется на месте
1276	333 ЭКГ-10	Замыкание обмотки на корпус в якоре правого двигателя хода	11.06.2022	1:00	12.06.2022	16:00	39	Электрика	Требуется ремонт
5363	333 ЭКГ-10	Износ колодок тормоза левого редуктора хода	29.01.2023	23:25	30.01.2023	3:05	3,67	Механика	Требуется ремонт

Данные рудоуправления предприятия ПАО Ураласбест в период с 01.01.2022 по 31.08.2023 из отчета по затратам на ремонт карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333

Заказ на ремонт	Актив ТОиР	Общий вид ремонта	Исполнитель ремонта	Дата начала фактическая	Объект/Узел ремонта	Код вида работ	Вид работ	Материалы				Трудозатраты					Продолжительность ремонта, час
								Наименование	ЕИ	Кол-во	Сумма	Бригада	Кол-во чел.	Продолжительность	Тариф	Сумма	
435	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	11.04.2022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1432	Натянуть гусеничную ленту на правой гусеничной раме ЭКГ	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ. Д/УГЛЕРОСТАЛЕЙ ф 5ММ ОЗС4	кг	1	159,34						4
435	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	11.04.2022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1432	Натянуть гусеничную ленту на правой гусеничной раме ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	1	260,08	753	4
3722	333 ЭКГ-10	Внеплановый ремонт	РЭМЦ РУ	11.06.2022	Двигатель хода правый	ЭКГ-5625	Смонтировать правый двигатель хода ЭКГ	ЗАП.ЧАСТИ К ЭЛ.ДВИГАТЕЛЯМ ДЭВ-812 Б/У	шт	1	50 425,95						39
3722	333 ЭКГ-10	Внеплановый ремонт	РЭМЦ РУ	11.06.2022	Двигатель хода правый	ЭКГ-5625	Смонтировать правый двигатель хода ЭКГ					Бригада электрослесарей РЭМЦ	3	7	225,76	4 740,96	39
3722	333 ЭКГ-10	Внеплановый ремонт	РЭМЦ РУ	11.06.2022	Двигатель хода правый	ЭКГ-5626	Демонтировать правый двигатель хода ЭКГ					Бригада электрослесарей РЭМЦ	3	8	225,76	5 418,24	39

3722	333 ЭКГ-10	Внеплановый ремонт	РЭМЦ РУ	11.06.2 022	Двигатель хода правый	ПР-014	Отсутствие запчастей/материалов						Бригада электрослесарей РЭМЦ	1	24	225,76	5 418,24	39
4524	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	28.06.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-0916	Замена тормозных дисков левого редуктора хода ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	2	260,08	1 560,48	5,5
5151	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	08.07.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1334	Прокрепить клинья замков левой гусеничной рамы ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	0,5	260,08	390,12	4
5151	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	08.07.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1431	Прокрепить клинья замков правой гусеничной рамы ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	0,5	260,08	390,12	4
8744	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	09.09.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1329	Просверлить маслоходы в бронзовых втулках ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	1,5	260,08	1 170,36	6,5
8744	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	09.09.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1335	Натянуть гусеничную ленту на левой гусеничной раме ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	0,5	260,08	390,12	6,5
8744	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	09.09.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1432	Натянуть гусеничную ленту на правой гусеничной раме ЭКГ	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ. Д/УГ-ЛЕРО.СТА ЛЕЙ ф 5ММ ОЗС4	кг	1	179,24							6,5
8744	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	09.09.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-1432	Натянуть гусеничную ленту на правой гусеничной раме ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	0,5	260,08	390,12	6,5
8744	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	09.09.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ-0916	Замена тормозных дисков левого редуктора хода ЭКГ						Бригада механического участка РЭМЦ	3	2	260,08	1 560,48	6,5

8744	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	09.09.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1016	Замена тормозных дисков правого редуктора хода ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	2	260,08	1 560,48	6,5
14459	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	21.12.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1315	Снять и поставить колпак опорного колеса левой гусеничной рамы ЭКГ	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ. Д/УГ-ЛЕРО.СТАЛЕЙ ф 3ММ ОЗС4	кг	2	251,33						6
14459	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	21.12.2 022	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1315	Снять и поставить колпак опорного колеса левой гусеничной рамы ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	2	260,08	1 506,00	6
16555	333 ЭКГ-10	Внеплановый ремонт	РЭМЦ РУ	29.01.2 023	Редуктор хода левый	ЭКГ- 0916	Замена тормозных дисков левого редуктора хода ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	2	3,67	260,08	1 842,34	3,67
16630	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	30.01.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 0916	Замена тормозных дисков левого редуктора хода ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	0,67	260,08	504,51	3,17
18176	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	22.02.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1011	Закрепить правый редуктор хода ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	1,5	260,08	1 129,50	3,5
18176	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	22.02.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1334	Прокрепить клинья замков левой гусеничной рамы ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	1	260,08	753	3,5
18176	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	22.02.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1431	Прокрепить клинья замков правой гусеничной рамы ЭКГ					Бригада механического участка РЭМЦ	3	1	260,08	753	3,5
19527	333 ЭКГ-10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	20.03.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1335	Натянуть гусеничную ленту на левой гусеничной раме ЭКГ	ЭЛЕКТРОДЫ СВАРОЧНЫЕ МЕТАЛ.	кг	2	351,68						5,33

								Д/УГ- ЛЕРО.СТА ЛЕЙ ф 4ММ ОЗС4									
19527	333 ЭКГ- 10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	20.03.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1335	Натянуть гусенич- ную ленту на левой гусеничной раме ЭКГ					Бригада механиче- ского участка РЭМЦ	3	1,5	260,08	1 129,50	5,33
19527	333 ЭКГ- 10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	20.03.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1432	Натянуть гусенич- ную ленту на правой гусеничной раме ЭКГ					Бригада механиче- ского участка РЭМЦ	3	1,5	260,08	1 129,50	5,33
22304	333 ЭКГ- 10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	10.05.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 0911	Закрепить левый ре- дуктор хода ЭКГ					Бригада механиче- ского участка РЭМЦ	3	0,5	260,08	376,5	3,83
22304	333 ЭКГ- 10	Техническое обслуживание	РЭМЦ РУ	10.05.2 023	Экскаватор ЭКГ-10 (борт. №333)	ЭКГ- 1011	Закрепить правый ре- дуктор хода ЭКГ					Бригада механиче- ского участка РЭМЦ	3	0,5	260,08	376,5	3,83

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

### Фотофиксация дефектов ходового оборудования карьерных экскаваторов ПАО «Ураласбест»



**Комментарий:** ослабление крепления хомутов опорного катка (зазор 25-30 мм)



**Комментарий:** абразивный износ и деформация траков (сколы металла)



**Комментарий:** трещина ободов опорных катков (L= 900 мм и L=800 мм)



**Комментарий:** просадка грунта на рабочей площадке, гусеницы утоплены на 500-600 мм в грунте



**Комментарий:** разрушение металла обода опорного катка



**Комментарий:** наклёп и сколы металла кулачков ведущих колес



**Комментарий:** поперечный уклон рабочей площадки до 5%



**Комментарий:** провисание гусеничного полотна выше допустимого



**Комментарий:** ослабление крепления хомутов опорных катков (зазор 30-50 мм)



**Комментарий:** трещина обода опорного катка L=800 мм, наклёп металла



**Комментарий:** дефекты ведущего колеса, сколы кулачков (4 шт.)



**Комментарий:** отсутствие опорного катка левой гусеничной тележки



**Комментарий:** излом кулачков ведущего колеса



**Комментарий:** ослабление крепления хомутов опорных колёс (зазоры от 15 до 25 мм)



**Комментарий:** провисание гусеничного полотна выше допустимого



**Комментарий:** течь масла редукторов хода

**ПРИЛОЖЕНИЕ 7**

Положительная заявка № 2024108330 от 26.04.2024 на объект интеллектуальной собственности «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства»

Федеральная служба по интеллектуальной  
собственности

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение



«Федеральный институт  
промышленной собственности»  
(ФИПС)

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993  
Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

Форма N 91 ИЗ-2017  
910,371,401

ФГБОУ ВО УГГУ, Новиков Николай  
Валентинович  
ул. Куйбышева 30  
г. Екатеринбург  
Свердловская обл.  
620144

На № - от -

Наш № 2024108330/11(018690)

*При переписке просим ссылаться на номер заявки*

*Исходящая корреспонденция от 26.04.2024*

**У В Е Д О М Л Е Н И Е**

**о положительном результате формальной экспертизы  
заявки на изобретение**

(21) Заявка № 2024108330/11(018690)

(22) Дата подачи заявки 29.03.2024

(71) Заявитель(и) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный горный университет", RU

(54) Название изобретения Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2024 108 330** (13) **A**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) **ЗАЯВКА НА ИЗОБРЕТЕНИЕ**

Состояние делопроизводства: Экспертиза по существу (последнее изменение статуса: 03.05.2024)

(21)(22) Заявка: **2024108330**, 29.03.2024

Делопроизводство

Исходящая корреспонденция	Входящая корреспонденция
Уведомление об удовлетворении ходатайства 02.05.2024	Ходатайство о проведении экспертизы заявки по существу 29.03.2024
Уведомление о положительном результате формальной экспертизы 26.04.2024	
Уведомление об удовлетворении ходатайства 26.04.2024	Ходатайство об освобождении от уплаты пошлин или уменьшении размера 29.03.2024
Уведомление о зачете пошлины 26.04.2024	Платежный документ 29.03.2024
Уведомление о поступлении документов заявки 29.03.2024	

# ПРИЛОЖЕНИЕ 8

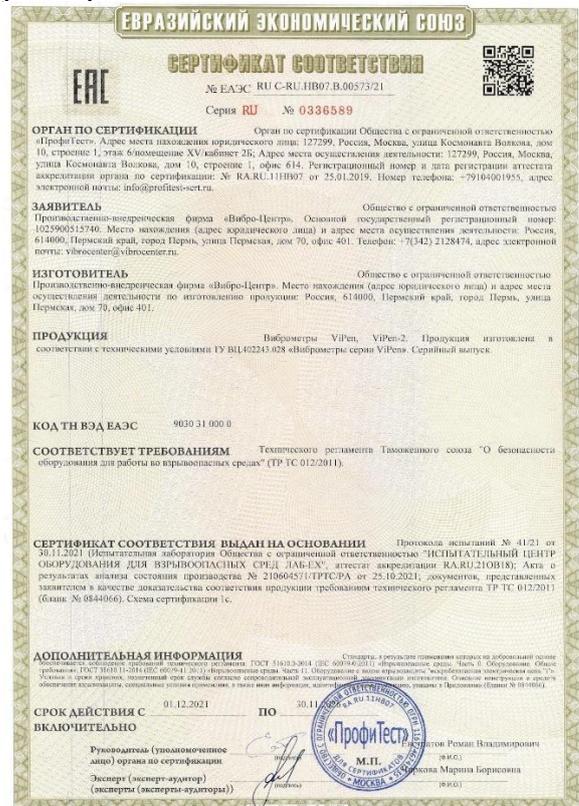
## Сертификаты оборудования



Ультразвуковой твердомер ТКМ-459С



Тензостанция ZET 017-T8



Виброметр марки ViPen

## ПРИЛОЖЕНИЕ 9

### Технико-экономическая эффективность

Сопоставим два варианта управления техническим состоянием ходового оборудования карьерного экскаватора в процессе его эксплуатации:

- визуальное наблюдение и оценка элементов ходового оборудования;
- мониторинг состояния элементов ходового оборудования с применением виброметра марки ViPen.

Таблица 8.1

Определение основных дефектов ходового оборудования карьерного экскаватора

Основные дефекты ходового оборудования	Визуальное наблюдение	ViPen
Поверхностный износ колес	+	-
Сколы обода ведущих колес	+	-
Трещины рамы	+	-
Износ кулаков ведущих колес	+	-
Износ зубьев в передачах	-	+
Дегградация смазочных свойств масла	-	+
Объем масла в редукторе	-	+

Стоит учитывать, что при проведении диагностики ходового оборудования визуально-измерительным контролем выявление дефектов имеет большой разброс в оценке, что обусловлено множеством факторов, включая качество используемых инструментов, квалификацию оператора и условия проведения диагностики.

Кроме того, не следует забывать о влиянии внешних факторов, таких как температура и влажность, которые могут исказить результаты контроля. Например, изменение температуры может привести к расширению или сжатию материалов, что в свою очередь влияет на точность измерений. В связи с этим рекомендуется проводить диагностику в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Напоследок, необходимо подчеркнуть важность документооборота в процессе диагностики. Каждый выявленный дефект должен быть зафиксирован, описан и проанализирован, что позволит не только устранить текущие

проблемы, но и предотвратить их возникновение в будущем. Комплексный подход к оценке состояния ходового оборудования станет залогом его надежности и долговечности в эксплуатации.

Кроме того, важно учитывать регулярность проведения диагностики ходового оборудования. Периодическое обследование позволяет выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях, что значительно снижает риск серьезных аварий и ремонтов. Внедрение системы профилактического обслуживания позволит поддерживать оборудование в рабочем состоянии, минимизируя его простаивание и увеличивая срок службы.

Важно отметить, что не все дефекты можно выявить визуально, некоторые из них требуют применение специальных методов. Одним из таких методов является вибродиагностика. Преимущество заключается в том, что метод позволяет оценить техническое состояние оборудования в процессе его эксплуатации без остановки производственного цикла, а также он является единственным методом, позволяющим локализовать с точностью до узла зону возникновения дефекта в агрегате.

Не менее значимой является подготовка и обучение персонала. Операторы должны быть не только квалифицированными специалистами, но и обладать навыками работы с прибором ViPen. Регулярные курсы помогут поддерживать их знания на высоком уровне и обеспечат качественное выполнение диагностики и расшифровку результатов.

Таким образом, комплексный подход к диагностике и обслуживанию ходового оборудования, включающий использование современных технологий, регулярное обучение и внимательное отношение к условиям проведения контроля, позволит существенно повысить надежность и безопасность эксплуатации машин и механизмов.

### **9.1. Капитальные вложения для внедрения проектного варианта**

В качестве проектного варианта предлагается внедрение вибродиагностического метода исследования в ремонтный цикл обслуживания ходового

оборудования карьерного экскаватора с применением виброметра марки ViPen.

Единовременные затраты складываются из стоимости прибора и программного обеспечения к нему и затрат на внедрение на предприятии.

Итого единовременные затраты (ЕВЗ):

$$\begin{aligned} \text{ЕВЗ} &= \text{ЕВЗ}_{\text{пр}} + \text{ЕВЗ}_{\text{ПО}} + \text{ЕВЗ}_{\text{внедр}} = 700\,000 + 450\,000 + 135\,000 \\ &= 1\,285\,000 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Срок полезного использования прибора (срок окупаемости)  $T_{\text{ок}} = 5$  лет

$$\text{Коэффициент приведения затрат к одному году } E_{\text{н}} = \frac{1}{T_{\text{ок}}} = 0,2$$

Приведенные затраты  $Z_{\text{пр}} = \text{ЕВЗ} * E_{\text{н}} = 257\,000$  рублей.

## 9.2. Оценка эксплуатационных затрат

$$\text{Плотность руды с асбестом } \rho = 2,5 \frac{\text{т}}{\text{м}^3} = 2500 \text{ кг/м}^3$$

$$\text{Годовая производительность экскаватора } B = 1033600 \text{ м}^3$$

$$\text{Эффективный фонд работы экскаватора в год } F_{\text{эф}} = 5512,6 \text{ ч}$$

$$\text{Производительность } Q = \frac{B}{F_{\text{эф}}} = 187,5 \text{ м}^3/\text{ч}$$

На основании приложения 5 таблицы «Отчет по затратам на ремонт», предоставленной предприятием ПАО «Ураласбест», в среднем техническое обслуживание и ремонт ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 составляет  $t = 148$  часов, затраты на которые составляют:

$$C_{\text{общ}} = C_{\text{м}} + C_{\text{тр}} = 514\,857 \text{ рублей,}$$

где:  $C_{\text{м}} = 394\,209$  руб. – затраты на материалы,  $C_{\text{тр}} = 120\,648$  руб. – трудозатраты.

$$\text{Затраты на восстановление } Z_{\text{в}} = \frac{C_{\text{общ}}}{t} = 3\,479 \text{ рублей.}$$

Увеличение производительности за счет отсутствия внеплановых простоев составляет  $27749 \text{ м}^3$  в год для одного экскаватора ЭКГ-10, что составляет 3% от годовой производительности.

### **9.3. Выводы**

Годовые затраты на восстановление работоспособного состояния ходового оборудования карьерного экскаватора составляют 514 857 рублей в год. Приведенные затраты на внедрение вибродиагностики с применением виброметра ViPen равны 257 000 рублей.

Таким образом поддержание функционирования ходового оборудования карьерного экскаватора за счет интегрирования в ремонтный цикл обслуживания метода технической диагностики, описанного в диссертационной работе, обеспечит экономический эффект в 257 857 рублей.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 10****Акт результатов внедрения****УТВЕРЖДАЮ**Главный инженер  
ПАО «Ураласбест»

А.Г. Салахийев

"11" июля 2024 г.

**АКТ****внедрения результатов диссертационной работы  
аспиранта Макаровой Валерии Викторовны  
«Повышение эффективности функционирования  
ходового оборудования карьерного экскаватора  
в условиях ПАО «Ураласбест»»**

Экспериментальные исследования по работе ходового оборудования карьерного экскаватора были проведены на экскаваторе № 333 в ПАО «Ураласбест».

В результате в ПАО «Ураласбест» внедрены:

методика по планированию проведения экспериментов по определению напряженно-деформированного состояния ходового оборудования карьерного экскаватора с помощью методов неразрушающего контроля (вибродиагностика, тензометрия и твердометрия);

техническое предложение по внедрению графика планово-предупредительных ремонтов годового оборудования карьерного экскаватора;

рациональная конструктивная схема ведущего колеса ходового оборудования (положительное решение по заявке № 2024108330 от 26.04.2024) карьерного экскаватора с учетом горнотехнических условий эксплуатации и применения нового материала колеса на основе данных расчета напряженно-деформированного состояния в пакете АПМ WinMachine.

Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составляет 257 тыс. руб.

Главный инженер  
Рудоуправления  
ПАО «Ураласбест»

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ю. С. Хижняков', is written over the stamp area.

Ю. С. Хижняков