

На правах рукописи



МАКАРОВА ВАЛЕРИЯ ВИКТОРОВНА

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

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург – 2024

Диссертационная работа выполнена на кафедре горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» и на кафедре подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Лагунова Юлия Андреевна**, заведующая кафедрой горные машины и комплексы ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Официальные оппоненты:

Андреева Людмила Ивановна – доктор технических наук, главный научный сотрудник Челябинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук

Кузин Евгений Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и комплексной механизации горных работ Филиала ФГБОУ ВО Кузбасского государственного технического университета им. Т. Ф. Горбачева в г. Прокопьевске

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Защита диссертации состоится «19» декабря 2024 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.423.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» – <https://www.ursmu.ru/makarova-valeriya-viktorovna>

Автореферат диссертации разослан «16» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

А. Е. Пелевин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Буянкин, 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. Солад, 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. Богомоллов, 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 твердомерии.

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 твердомерии.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности выбранной темы, сформулированы цель, идея, задачи исследования, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы обоснованность и достоверность результатов, теоретическая и практическая значимость работы, личный вклад соискателя, приведена реализация результатов работы.

В первой главе «Анализ состояния проблемы и постановка задач исследования» рассмотрены особенности конструкции гусеничных карьерных экскаваторов, определены основные показатели технического состояния ходового оборудования, проведен обзор и анализ исследований по техническому состоянию карьерных экскаваторов, рассмотрены методы регистрации и контроля деформаций и нагрузок, действующих на конструкцию ходового оборудования, сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе «Планирование эксперимента» приведены результаты планирования многофакторного эксперимента по установлению закономерностей влияния факторов на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора. Рассмотрены эксплуатационные, конструктивные, технические и эргономические факторы. Выявлено, что существенное влияние оказывают физико-механические свойства разрабатываемых горных пород, скорость движения экскаватора, уклон рабочей площадки и коэффициент управления. На основании теории планирования многофакторного эксперимента решена задача определения числа натуральных испытаний, необходимых и достаточных для оценки напряженно-деформированного состояния элементов карьерных экскаваторов. Целью многофакторного эксперимента является установление зависимости функции отклика O (напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора) от влияющих факторов:

$$O = f(N_1, N_2, N_3, N_4, N_5) \quad (1)$$

где N_1 – фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя (от 5 до 150 мм) по толщине; N_2 – коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя (для хризотил-асбеста от 8 до 16); N_3 – скорость движения экскаватора (от 0,1 до 0,19 м/с); N_4 – уклон рабочей площадки карьерного экскаватора (от 1 до 12°); N_5 – коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора (от 0,61 до 0,98).

Указанная функция строится в виде полинома, рассчитывается число натуральных испытаний равное 32 и увеличенное в пять раз.

Для решения применяется 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.

Соответственно результатами наблюдений является матрица:

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

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

С применением программного пакета Statistika проведен анализ множественной регрессии. Построена регрессионная модель со стандартной ошибкой оценки 5 %.

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

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 стандартизованном масштабе:

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

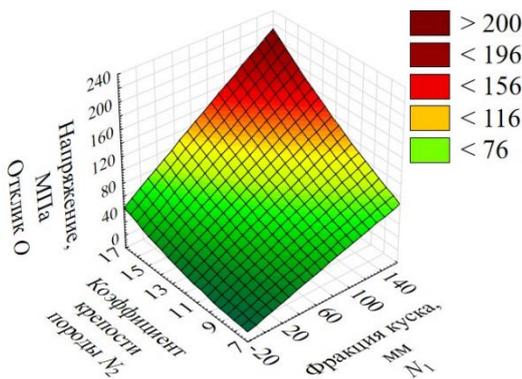


Рис. 1. График поверхности влияния фракции куска породы N_1 и коэффициента крепости породы N_2 на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора

Получены графики поверхности отклика зависимости выходной переменной от двух произвольных факторов, разработанной модели и их уравнения множественной линейной регрессии (рис. 1).

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.

Определены зависимости наиболее значимых факторов, влияющих на напряжение в металлоконструкциях ходового оборудования карьерного экскаватора (табл. 1, табл. 3).

Таблица 1

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

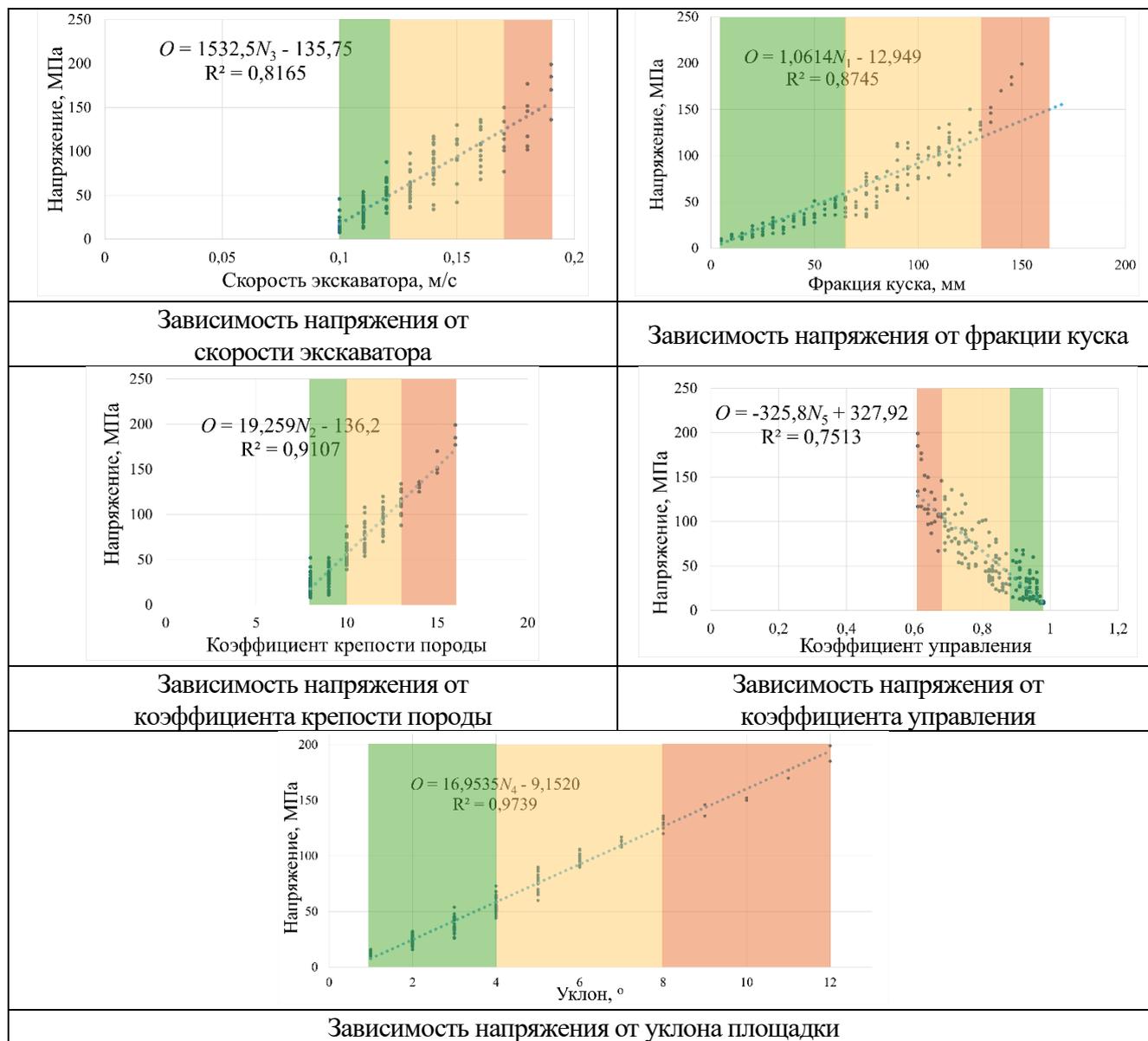
Составлена таблица соответствия (табл. 2) значения влияющих внутренних и внешних факторов на состояние элементов ходового оборудования.

Таблица 2

Таблица соответствия влияния факторов на состояние элементов ходового оборудования

Состояние ходового оборудования карьерного экскаватора	Значение внешних и внутренних факторов
Хорошее	
<ul style="list-style-type: none"> - трещины на правой и левой гусеничных рамах отсутствуют; - износ кулачков ведущих колес: номинальный размер кулачка 100 мм; - сколы и выкрашивание колес: допускаются отдельные глубиной до 5 мм; - износ по ободу, нарушение профиля колес: отсутствуют. 	<ul style="list-style-type: none"> • фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя $d = 5...60$ мм по толщине; • коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя $f = 8...10$; • скорость движения экскаватора $v = 0,1...0,2$ м/с; • уклон рабочей площадки карьерного экскаватора $\alpha = 1...4^\circ$; • коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора $K_y = 0,9...0,98$.
Удовлетворительное	
<ul style="list-style-type: none"> - трещины на правой и левой гусеничных рамах до 500 мм; - износ кулачков ведущих колес: размер кулачка от 90 до 100 мм; - сколы и выкрашивание колес: не более 5 мм поверхности; - износ по ободу, нарушение профиля колес: до 20 мм – исправить профиль проточкой в пределах допустимого износа. 	<ul style="list-style-type: none"> • фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя $d = 60...120$ мм по толщине; • коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя $f = 10...13$; • скорость движения экскаватора $v = 0,13...0,17$ м/с; • уклон рабочей площадки карьерного экскаватора $\alpha = 4...8^\circ$; • коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора $K_y = 0,7...0,89$.
Неудовлетворительное	
<ul style="list-style-type: none"> - трещины на правой и левой гусеничных рамах более 500 мм; - износ кулачков ведущих колес: размер кулачка менее 90 мм; - сколы и выкрашивание колес: более 10 % поверхности; - износ по ободу, нарушение профиля колес: более 20 мм – колесо заменить. 	<ul style="list-style-type: none"> • фракция куска породы на рабочей площадке экскаваторного забоя $d = 120...150$ мм по толщине; • коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя $f = 13...16$; • скорость движения экскаватора $v = 0,18...0,19$ м/с; • уклон рабочей площадки карьерного экскаватора $\alpha = 8...12^\circ$; • коэффициент управления – коэффициент учитывающий опыт и практические навыки машиниста экскаватора $K_y = 0,61...0,69$.

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



Также рассмотрено применение экспериментальной механики применительно к карьерным экскаваторам. Предложен оригинальный подход и выведена формула для определения числа натуральных экспериментов F :

$$F = \left[\frac{\sqrt{\sigma_3^2 \cdot (Z_1 + Z_2)}}{0,1 \cdot \bar{\sigma}_3} \right]^2 \quad (3)$$

где: σ_3^2 - дисперсия приведенных эквивалентных напряжений, Z_1 и Z_2 – квантили, $\bar{\sigma}_3$ - среднее арифметическое эквивалентных напряжений. Применяя предложенную формулу, необходимо $F = 55$ натуральных экспериментов.

Таким образом, первое положение, выносимое на защиту, доказано.

В третьей главе «Результаты проведения экспериментальных исследований» проведено исследование напряженно-деформированного состояния редукторов гусеничного хода с применением вибродиагностического и тензометрического методов, а также применен метод твердометрии для оценки состояния ведущего, опорного и натяжного колеса гусеничного хода карьерного экскаватора.

По результатам вибродиагностического метода, точки установки прибора показаны на рис. 2, 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 (рис. 3 и рис. 4) повышенный уровень вибрации вносит модуляционный ряд на частоте 431,25 Гц с полосой частот около 11,25 Гц, по форме модуляционного ряда показывает на дефект зубчатого колеса.

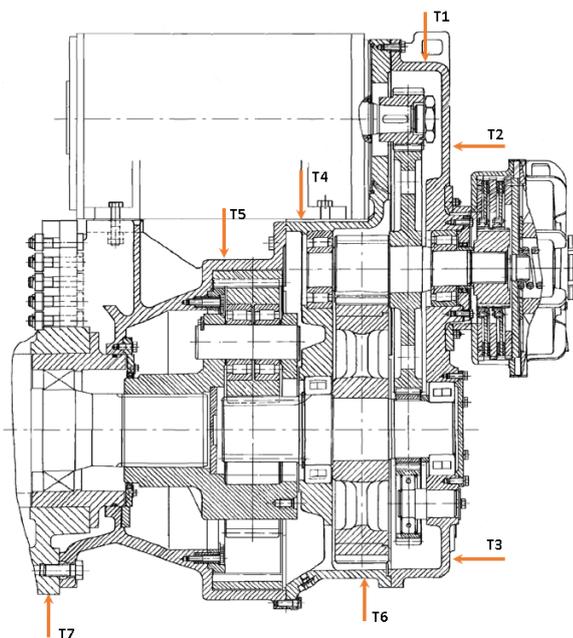


Рис. 2. Точки контроля вибрации на редукторе хода

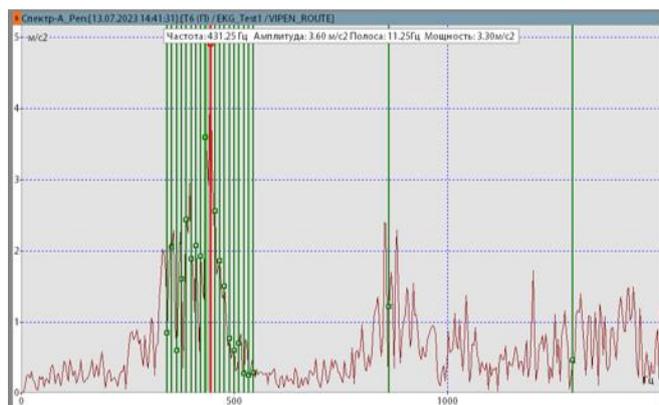


Рис. 3. Спектр виброускорения в точке правого редуктора хода

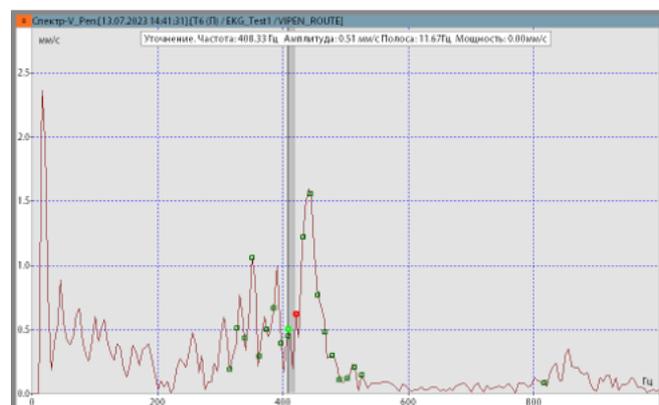


Рис. 4. Спектр виброскорости в точке правого редуктора хода

По результатам экспериментальных исследований тензометрическим методом определены векторы главных напряжений и максимальные касательные напряжения, измеренные на редукторах правого и левого гусеничного хода. По результатам проведения тензометрических испытаний наибольшее значение главных напряжений $\sigma_{\max} = 43,85$ МПа было выявлено в точке правого редуктора хода (рис. 5), в точке левого редуктора было получено $\sigma_{\max} = 37,58$ МПа.

Результаты были получены в условиях, аналогичных тем, которые были приняты при планировании эксперимента: фракция куса породы на рабочей

площадке экскаваторного забоя от 50 до 80 мм по толщине; коэффициент крепости породы на рабочей площадке экскаваторного забоя, в месте проведения эксперимента от 8 до 11 по шкале Протоdjeяконова; скорость движения экскаватора во время проведения эксперимента была от 0,11 до 0,14 м/с; уклон рабочей площадки от 2 до 4 °; опыт и практические навыки машиниста экскаватора определяются коэффициентом управления от 0,81 до 0,94.

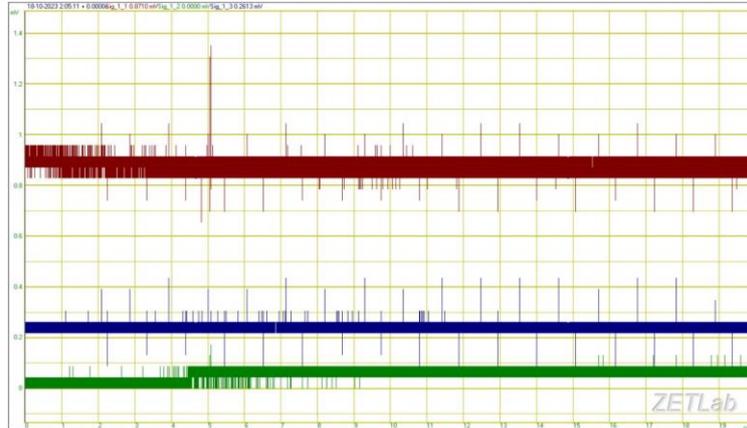


Рис. 5. Оциллограмма точек правого редуктора, полученная в программе ZETLAB

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

Установлено, что важными элементами, влияющими на нагрузку ходового оборудования, являются правильная планировка экскаваторной площадки в соответствии с паспортом забоя, формирование и сооружение внутрикарьерных дорог в соответствии с правилами безопасности, а также зависит от физико-механических свойств полезного ископаемого и вмещающих горных пород.

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 обуславливается, в основном, как ростом усилия подъема, так и увеличением нагрузки в моменты поворота и перемещения хода.

Проведенные экспериментальные исследования редукторов хода левой и правой гусеничных рам с применением методов тензометрии и вибродиагностики показали, что присутствует дефект 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 технического обслуживания.

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

Получены средние значения твердости по 15 проведенным замерам в каждой точке, показанные на рис. 6, по шкалам Роквелла HRC и Бринелля HB (табл. 4).



Рис. 6. Места установки преобразователей на колесах

Таблица 4

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

Шкала \ 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
Шкала \ 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	

Сделан вывод, что значения в точках 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16 и 17 в пределах допустимых значений твердости. В точках 4, 11, 12 и 14 значения ниже справочных (для стали 35ХМЛ), что говорит о снижении твердости в результате деформации колес в этих зонах. Точки 5 и 6, расположенные на кулаках ведущего колеса, соответствуют зонам концентрации напряжений, что приводит к значительному механическому износу, который наступает при взаимном обкатывании двух поверхностей под нагрузкой, а также вследствие ударов. Детали, соприкасающейся между собой при больших скоростях движения и переменной нагрузке, изнашиваются быстрее деталей, работающих в благоприятных условиях работы. Полученные результаты соответствуют действительному состоянию элементов хода карьерного экскаватора (рис. 7).



Износ кулаков ведущих колес



Сколы обода ведущих колес



Износ опорных колес

Рис. 7. Фотофиксация абразивного изнашивания колес карьерного экскаватора ЭКГ-10 №333 ПАО «Ураласбест»

Результаты проведенных исследований показали хорошую сходимость и подтвердили действительное состояние элементов ходового оборудования карьерного экскаватора. Предложена методика проведения диагностического исследования с помощью методов контроля и диагностики, представленная на рис. 8.

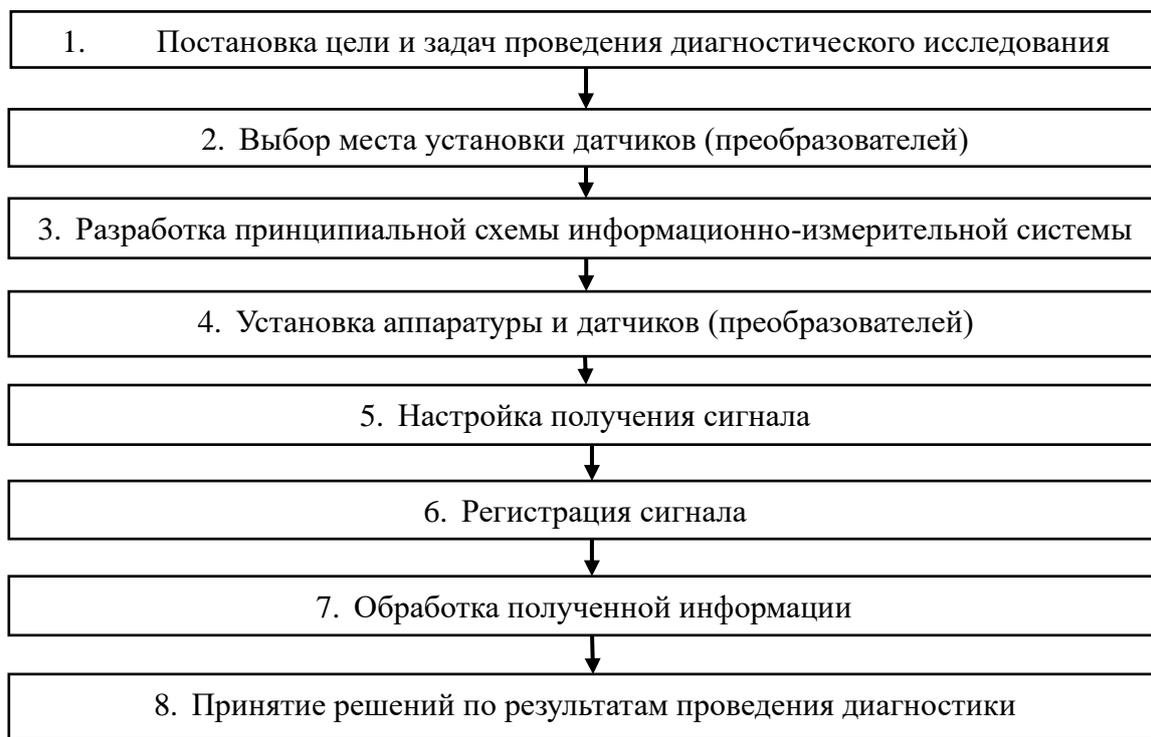


Рис. 8. Блок-схема методики проведения диагностического исследования ходового оборудования карьерного экскаватора

Установлены зависимости коэффициентов технической готовности ходового оборудования от времени работы с учетом простоев из-за дефектов ходового оборудования за каждый рассматриваемый период, установлено, что коэффициент технической готовности с наибольшей величиной достоверности аппроксимации R^2 имеет полиномиальную зависимость пятой степени вне зависимости от рассматриваемого периода (рис. 9, 10).

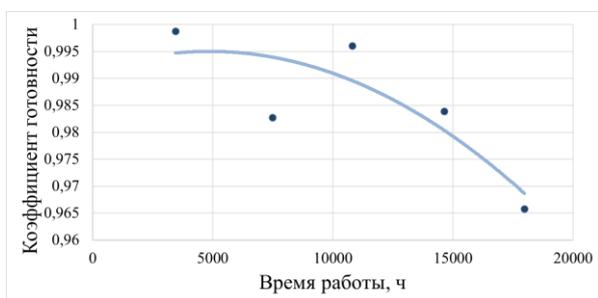


Рис. 9. Зависимость коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.01.2020 по 01.04. 2022 гг.

$$K_{ТГ} = -2E - 10T_{КФВ}^2 + 1E - 0,6T_{КФВ} + 0,9914$$

Величина достоверности $R^2=0,7$

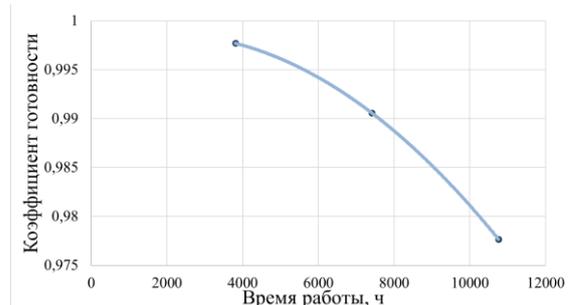


Рис. 10 Зависимость коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭКГ-10 № 333 в период с 01.04.2023 по 31.08. 2023 гг.

$$K_{ТГ} = -3E - 10T_{КФВ}^2 + 1E - 0,0003x + 0,9976$$

Величина достоверности $R^2=1$

Установлены зависимости производительности карьерного экскаватора с учетом простоев, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом ходового оборудования от коэффициента технической готовности (рис. 11, 12). Сделан вывод, что производительность карьерного экскаватора зависит от коэффициента технической готовности и повышается с увеличением межремонтного периода.

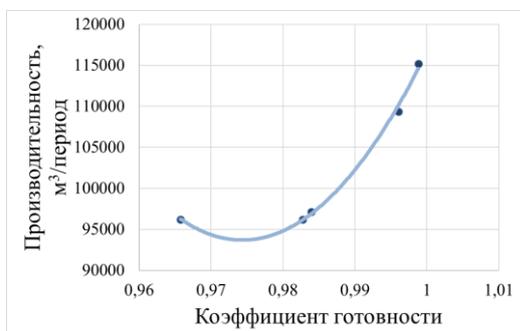


Рис. 11. Зависимость производительности от коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора

ЭКГ-10 № 333 в период с 01.01.2020 по 01.04. 2022 гг.

$$W_{\text{экспл}} = 3E + 07K_{\text{ТГ}}^2 - 7E + 07K_{\text{ТГ}} + 3E + 07$$

Величина достоверности $R^2=0,996$

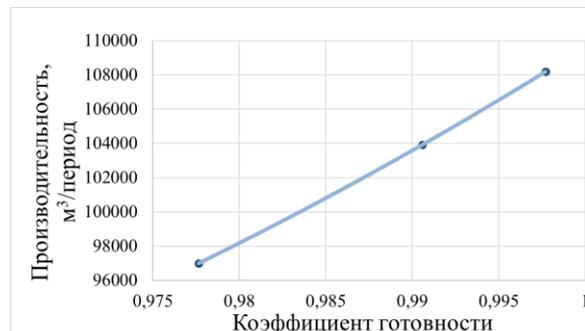


Рис. 12. Зависимость производительности от коэффициента технической готовности ходового оборудования карьерного экскаватора

ЭКГ-10 № 333 в период с 01.04.2023 по 31.08. 2023 гг.

$$W_{\text{экспл}} = 3E + 06K_{\text{ТГ}}^2 - 6E + 06K_{\text{ТГ}} + 3E + 06$$

Величина достоверности $R^2=1$

Предложен новый годовой график технического обслуживания и ремонта (ТОиР), включающий проведение диагностики элементов ходового оборудования карьерного экскаватора с применением методов неразрушающего контроля (рис. 13).

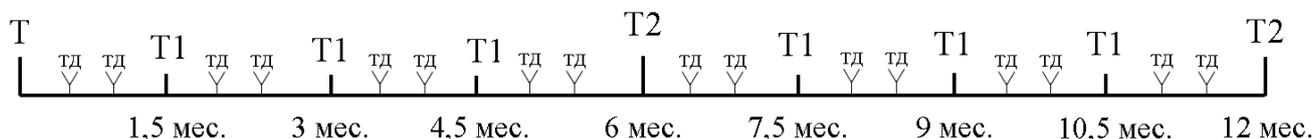


Рис. 13. Предлагаемый годовой график ТОиР карьерного экскаватора:

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

тд – проведение технической диагностики

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.

Таким образом, второе положение, выносимое на защиту, доказано.

В четвертой главе «Исследование нагрузок, действующих на ведущее колесо гусеничного хода карьерного экскаватора» проведен анализ нагрузок, действующих на ведущее колесо гусеничного хода карьерного экскаватора ЭКГ-10, и рассмотрено влияние материала на напряженно-деформируемое состояние ведущего колеса.

В программном пакете APM WinMachine проведен расчет нагрузок на ведущее колесо в двух расчетных положениях для материала ведущего колеса 35ХМЛ. Максимальное напряжение (рис. 14) было получено, когда фиксировался один кулачок (рис. 15), на который приходится вся нагрузка при перемещении экскаватора. Рассмотрен момент, в котором возникает ситуация заклинивания, когда экскаватор наезжает на крупный кусок породы, что приводит к стопорению ведущего колеса при попытке преодоления препятствия.

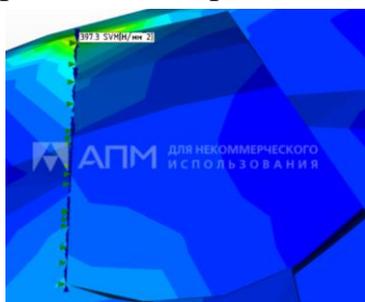


Рис. 14. Результаты статических расчетов напряженно-деформированного состояния ведущего колеса материал 35ХМЛ

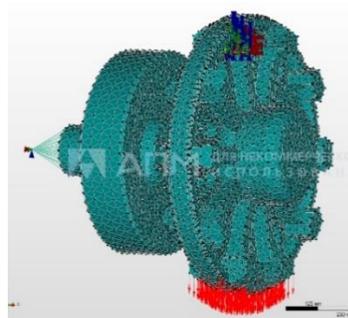


Рис. 15. Модель с приложением всех нагрузок

Проанализировано влияние материала на напряженно-деформированное состояние, рассмотрено шесть марок сталей: Рассмотрены следующие виды сталей: 35ХМЛ, 45ХН, 30ХНМЛ, 30ХГСФЛ, 35ГЛ, 14Х2ГМРЛ.

Построена диаграмма сравнения сталей по основным характеристикам (рис. 16)

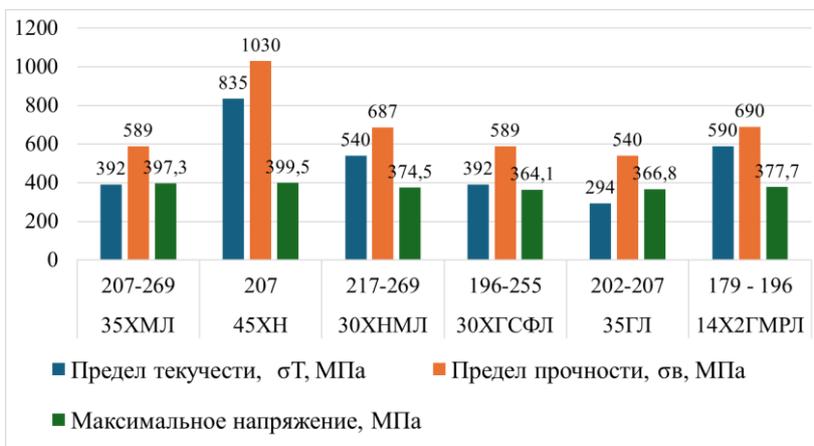


Рис. 16. Диаграмма сравнения сталей по основным характеристикам

Установлены зависимости влияния максимального напряжения ведущего колеса на предел текучести и предел прочности различных литевых сталей (рис. 17, 18).

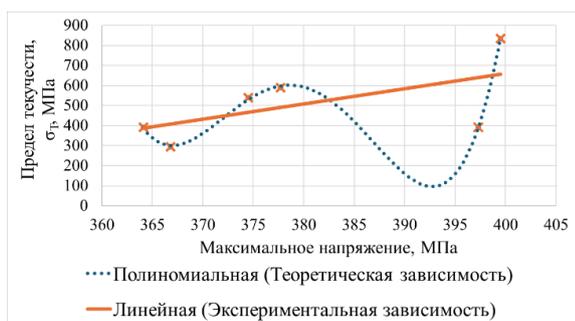


Рис. 17. Зависимости предела текучести σ_T от напряжения σ_{max}

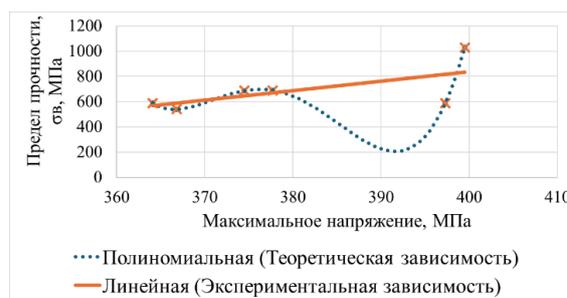


Рис. 18. Зависимости предела прочности σ_B от напряжения σ_{max}

Итоговые зависимости основных характеристик сталей от напряжения σ_{max}

Показатель	Уравнение зависимости		Величина достоверности аппроксимации R^2
Предел текучести, σ_T , МПа	Теоретическая (полиномиальная)	$\sigma_T = 0,0143\sigma_{max}^4 - 21,715\sigma_{max}^3 + 12354\sigma_{max}^2 - 3E + 06\sigma_{max} + 3E + 08$	0,9988
	Экспериментальная (линейная)	$\sigma_T = 7,5948\sigma_{max} - 2378,7$	0,516
Предел прочности, σ_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

На основании проведенного анализа применения различных марок сталей, было выявлено, что наименьшее максимальное напряжение получено при использовании стали 30ХГСФЛ, которая используется для изготовления деталей машиностроения. Сталь позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность ведущего колеса гусеничного хода карьерного экскаватора. Таким образом, эта марка стали может быть заменителем стали 35ХМЛ с высоким уровнем качества и надежности.

На основании проведенных исследований предложена новая конструкция ведущего колеса «Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства», представленное на рис. 19.

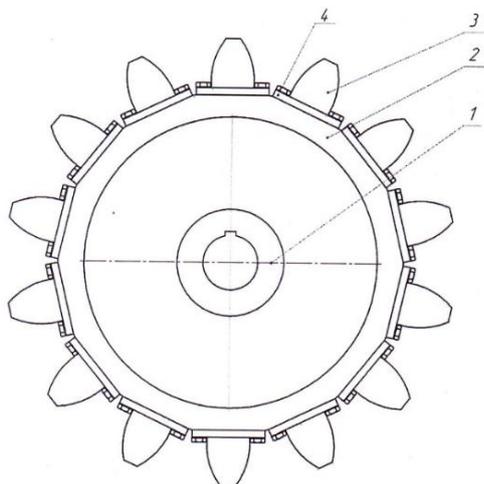


Рис. 19. Ведущее колесо привода гусеничного ходового оборудования транспортного средства

Устройство содержит ступицу 1, кольцеобразное основание 2 и зацепы 3 с опорной плитой 4. 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° и затем после износа обеих рабочих поверхностей зацепа 3 производится его замена.

Таким образом, третье положение, выносимое на защиту, доказано.

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.).

**Основные научные результаты опубликованы в следующих изданиях
Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. 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.

2. **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.

3. 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.

Публикации, индексируемые в международной базе Scopus:

4. 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. 2024. P. 440–450.

Публикации в прочих научных изданиях:

5. **Макарова, В. В.** Применение экспериментальных методов исследования узлов и механизмов горно-транспортных машин / В. В. Макарова, О. А. Лукашук, В. П. Жегульский // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2019 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2019. – С. 379–382.

6. Лукашук, М. Д. Экспериментальное исследование процессов эксплуатации подъемно-транспортных машин / М. Д. Лукашук, **В. В. Макарова**, О. А. Лукашук //

Инновационное развитие подъемно-транспортной техники : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Брянск, 03–04 октября 2019 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 143–146.

7. Летнев, К. Ю. Применение тензометрической аппаратуры в рамках образовательного процесса / К. Ю. Летнев, **В. В. Макарова**, М. С. Соколов // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта, Екатеринбург, 06 декабря 2019 года / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. – С. 128–131.

8. 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.

9. 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.

10. Оценка безопасности ходового оборудования карьерного экскаватора ЭЖ-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 нефтепромыслового оборудования. – 2023. – Т. 1. – С. 12–17.

11. 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.

12. **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.

13. 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.

14. Лагунова Ю. А., **Макарова В. В.** Особенности механизма хода карьерного экскаватора // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XXX междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 11-17 сентября 2023 г. Донецк: ДонНТУ, 2023. с. 175-176.

15. **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.

16. **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.

17. 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.

18. Лагунова, Ю. А. Исследование механизма хода карьерного экскаватора методом неразрушающего контроля / Ю. А. Лагунова, **В. В. Макарова** // Труды Международной научно-практической конференции «XVI Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», 13–14 июня 2024 г. В 3-х частях. Часть 3/ НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова». - Караганда: Изд-во КарТУ им. А.Сагинова, 2024. – С. 174–176.

Подписано в печать 08.10.2024. Формат 60x84 1/16
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 12815
Копировальный центр «Университетский»
620144, г. Екатеринбург, Университетский пер., д. 3, тел. 8-343-257-90-50