

На правах рукописи

Агагена Абдельвахаб



**ОБОСНОВАНИЕ РЕГЛАМЕНТА ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ ГИДРОЦИЛИНДРОВ КАРЬЕРНОГО
ЭКСКАВАТОРА ПРИ ДОБЫЧЕ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ В
УСЛОВИЯХ АЛЖИРА**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

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

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Викторович

Официальные оппоненты:

Великанов Владимир Семенович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Подъемно-транспортных машин и роботов», профессор;

Зверев Валерий Юрьевич

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Горная электромеханика», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится **17 сентября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 17 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Увеличение объемов добычи железной руды открытым способом во многом зависит от эффективности функционирования оборудования под влиянием ряда факторов: жесткости климата; особенностей горно-геологических условий; несовершенства системы технического обслуживания, принятой в компании.

В настоящее время на железорудных карьерах Алжира при добыче железной руды открытым способом применяются системы экскаватор-самосвал. Эксплуатация экскаватора в запыленной среде приводит к постоянному наличию статического слоя мелкой железорудной пыли на поверхности штоков силовых гидроцилиндров, что повышает интенсивность абразивного изнашивания штоков и их уплотнений. Анализ эксплуатационной надёжности карьерных гидравлических экскаваторов (КГЭ) показал, что отказы элементов гидравлического привода составляют половину от общего количества отказов. В более чем 70% случаев гидроцилиндры выходят из строя по причине изнашивания уплотнений штока.

Существующие правила технического обслуживания не в полной мере учитывают особенности природно-климатических факторов рудника района Boukhadra (Алжир). Для повышения эффективности технического обслуживания необходимо проводить периодический контроль технического состояния рабочего оборудования экскаваторов, работающих в условиях повышенной запыленности воздуха рабочей зоны КГЭ, и на его основе переходить к стратегии превентивного технического обслуживания по текущему состоянию.

В этой связи обеспечение готовности элементов гидравлической системы КГЭ, находящихся в эксплуатации на железорудных карьерах Алжира в условиях жаркого сухого климата и гористой местности, за счет соблюдения рационального регламента технического обслуживания силовых гидроцилиндров является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Решению задач повышения эффективности использования карьерного оборудования, эксплуатационной надежности горных машин и гидроприводов посвящены работы: Андреевой Л.И., Булеса П.,

Великанова В.С., Гетопанова В.Н., Евтюкова С.А., Ереско С.П., Зверева В.Ю., Иванова С.Л., Кобзова Д.Ю., Комиссарова А.И., Лагуновой Ю.А., Подэрни Р.Ю., Рахутина М.Г., Репина С.В., Слесарева Б.В. Солода Г.И. и др. а также ряда зарубежных исследователей: Ghodrati V., Kumar U. и др.

В трудах этих исследователей нашли отражение аспекты оценки уровня надёжности экскаваторов, организации обслуживания машин. Однако до настоящего времени не рассмотрены должным образом вопросы, связанные с повышением готовности экскаватора за счет применения стратегии замен выработавших свой ресурс элементов гидросистемы, которая, базируясь на обоснованных сроках их наработки в жестких условиях, обеспечивала бы снижение эксплуатационных затрат. Это требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Соответствие паспорта специальности. Тема исследования соответствует п. 16 «Техническое обслуживание и ремонт горных машин и оборудования с учетом специфики горно-геологических и горнотехнических условий их эксплуатации» области исследований паспорта научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Цель работы – повышение готовности карьерного гидравлического экскаватора при добыче железной руды в условиях рудника Boukhadra (Алжир) путем сокращения времени технического обслуживания элементов гидросистемы.

Идея работы заключается в том, что указанная цель достигается на основе выбранной стратегии с выделением эшелонов технического обслуживания по фактическому состоянию элементов гидросистемы карьерного гидравлического экскаватора с поэлементным уровнем их разукрупнения с учётом специфики введения открытых горных работ на руднике Boukhadra (Алжир).

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы и определить направления и способы повышения эксплуатационных характеристик силовых гидроцилиндров карьерных экскаваторов в условиях жесткого климата и гористой местности Алжира.

2. Выполнить анализ источников и уровня пылевого воздействия на оборудование при открытой разработке железной руды в условиях рудника Boukhadra (Алжир).

3 Провести экспериментальные исследования по оценке размерно-массовых и физико-механических характеристик образцов железорудной пыли, а также по оценке влияния загрязнения мелкодисперсной абразивной железорудной пылью поверхности штоков силовых гидроцилиндров на степень изнашивания штока и уплотнений.

4. Разработать программу и методику экспериментальных исследований и создать стендовое оборудование для ускоренных исследований процесса изнашивания пары трения шток-уплотнения в условиях запыленности абразивной железорудной пылью.

5. Разработать практические рекомендации по корректировке регламента проведения технического обслуживания силовых гидроцилиндров карьерного экскаватора и расходных элементов гидросистемы в условиях рудника Boukhadra (Алжир).

Объект исследования – процесс взаимодействия мелкодисперсной абразивной железорудной пыли с рабочей поверхностью штоков силовых гидроцилиндров карьерного экскаватора.

Предмет исследования – изменение шероховатости и фрактальной размерности рабочей поверхности штоков силовых гидроцилиндров карьерного экскаватора вследствие абразивного изнашивания мелкодисперсной железорудной пылью в зависимости от количества рабочих циклов гидроцилиндра, как факторов изнашивания.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден уровень запыленности рабочей зоны КГЭ мелкодисперсной железорудной пылью, определены размерно-массовые характеристики пыли с ее нагрузкой на поверхности штоков гидроцилиндров в условиях рудника Boukhadra, изменяющейся по экспоненциальному закону.

2. Установлена взаимосвязь интенсивности абразивного изнашивания пары трения шток-уплотнение в жестких условиях эксплуатации от числа рабочих циклов (двойных ходов) гидроцилиндра, что

требует корректировки регламента технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлено, что поле концентрации пыли в рабочей зоне при условии отсутствия ветровой нагрузки для небольших периодов времени описывается дифференциальным уравнением баланса пыли в облаке рабочей зоны экскаватора от времени осаждения по экспоненциальному закону.

2. Разработана инженерная методика ускоренных испытаний пары трения шток-уплотнение в условиях запыленности абразивной железорудной пылью с оценкой изменения шероховатости и фрактальной размерности текстуры рабочей поверхности штока для определения периода проведения технического обслуживания гидроцилиндра.

3. Предложена корректировка регламента проведения ТО на конкретном уровне разукрупнения элементов гидросистемы КГЭ, которая решается на основе выбранной стратегии с выделением эшелонов ТО по фактическому состоянию с сокращением периодичности проведения с коэффициентом 0,5 от норматива.

4. Разработано и запатентовано устройство защиты штока гидроцилиндра экскаватора от запыленности за счет установки кольцевых магнитов и упорных выступов на гофрированной трубе из полимерного материала по длине штока гидроцилиндра (Патент РФ на полезную модель № 216641).

5. Результаты исследований использованы в деятельности компании ООО «Ирбис» при разработке регламента технического обслуживания и ремонта гидравлических цилиндров экскаваторов.

Методология и методы исследования

В основу для проведения теоретических и экспериментальных исследований положен системный подход, обеспечивающий анализ запыленности воздуха на глобальном, локальном и местном уровне, влияющей на функционирование гидроцилиндров КГЭ; научный анализ и обобщение опыта технического обслуживания КГЭ при эксплуатации в жестких климатических условиях; в процессе исследований использованы положения теории трения и изнашивания;

экспериментальные и стендовые исследования выполнены на лабораторных установках с использованием современных приборов и аппаратуры. Методы проведения и обработки полученных результатов экспериментальных данных соответствовали государственным методикам и стандартам.

Основные защищаемые положения:

1. Эксплуатация карьерного гидравлического экскаватора в Северо-восточном регионе Алжира проводится в условиях повышенной фоновой запыленности региона и среднем выбросе пыли до 87 г за одну выгрузку ковша при медианном диаметре частиц пыли 14 мкм, оседающих из пылевого облака с концентрацией 0,77 г/м³ на поверхности штоков гидроцилиндров по экспоненциальному закону со скоростью 0,01 м·с⁻¹.

2. При функционировании экскаватора в условиях повышенной запыленности рабочей зоны абразивной мелкодисперсной пылью следует скорректировать регламент проведения технического обслуживания элементов гидросистемы и установить периодичность замены гидроцилиндров на запасные через каждые 240–320 тыс. циклов (двойных ходов) по причине ускоренного изнашивания в паре трения шток-уплотнения, а также внести коэффициент 0,5 от норматива на замену расходных элементов гидросистемы.

Степень достоверности и обоснованность научных положений и рекомендаций подтверждается корректной постановкой задач исследований, представительным объемом теоретических и экспериментальных данных; корректным применением методов математической статистики при обработке экспериментальных данных. Полученные результаты обосновываются корректностью использования известных, проверяемых данных и согласуются с опубликованными исследованиями по теме диссертации и по смежным областям.

Апробация результатов

Основные положения и научные результаты диссертационного исследования были представлены в качестве докладов на ряде научно-практических мероприятий: 79-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2021); VIII Международной

научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021» (Санкт-Петербург, 2021); XX, XXI и XXII международных научно-технических конференциях «Чтения памяти В. Р. Кубачека» Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (Екатеринбург, 2022, 2023 и 2024 гг.); научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2023).

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, разработке программы и методики лабораторных исследований, разработке экспериментального триботехнического стенда, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций по результатам работы и практических рекомендаций по корректировке регламента технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент РФ на полезную модель.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографического списка, содержит 136 страниц машинописного текста, 54 рисунка, 16 таблиц, список литературы из 155 наименований и 7 приложений на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, идея, задачи и научная новизна работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, соответствие паспорту специальности, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя, данные о публикациях автора.

В первой главе приведен обзор состояния изученности рассматриваемой темы диссертационного исследования. Проведен анализ состояния природной среды и общий обзор горного участка Boukhadra. Выполнен анализ особенностей технологии карьерной добычи железорудного сырья с применением систем экскаватор-самосвал. Проведен анализ специфики функционирования оборудования в исследуемых условиях. На основе выполненного анализа сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены результаты анализа внешних факторов, влияющих на работоспособность карьерного гидравлического экскаватора. Проведен анализ пылевого фона в Северной Африке на глобальном уровне, а также на локальном уровне в районе месторождения Boukhadra, в том числе при пылевых выбросах при погрузке железной руды в самосвалы на руднике Boukhadra. Получены размерно-массовые и физико-механические характеристики образцов железорудной пыли (ЖРП). Определен максимальный разовый выброс пыли при разгрузке ковша экскаватора в кузов самосвала

В третьей главе представлена разработанная программа и методики проведения экспериментальных исследований по определению размерно-массовых и физико-механических характеристик образцов железорудной пыли; приведено описание разработанного триботехнического стенда и описана методика проведения ускоренных испытаний на изнашивание пары трения шток-уплотнения; приведена методика измерения оптическим методом изменения шероховатости и фрактальной размерности текстуры поверхности штока гидроцилиндра; изложена методика измерения износа штока и проскока пыли через уплотнения.

В четвертой главе приведены результаты анализа функционирования силовых гидроцилиндров с позиций абразивного трения в паре шток-уплотнение; описаны результаты лабораторных испытаний на трибостенде в ходе анализа шероховатости поверхности штока методом оптического анализа фотоизображений поверхности и определения фрактальной размерности текстуры топографии поверхности. Выполнен анализ механизма изнашивания штока и уплотнений

силовых ГЦ под воздействием мелкой абразивной ЖРП. Рекомендуется сокращение периодичности проведения технического обслуживания элементов гидросистемы с коэффициентом 0,5 от норматива.

В заключении изложены основные выводы по результатам проведенных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. **Эксплуатация карьерного гидравлического экскаватора в Северо-восточном регионе Алжира проводится в условиях повышенной фоновой запыленности региона и среднем выбросе пыли до 87 г за одну выгрузку ковша при медианном диаметре частиц пыли 14 мкм, оседающих из пылевого облака с концентрацией 0,77 г/м³ на поверхности штоков гидроцилиндров по экспоненциальному закону со скоростью 0,01 м·с⁻¹.**

На эффективность применения одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов оказывают отрицательное влияние ряд внешних факторов, в частности климатические и горно-геологические условия, а также несвоевременность замен расходных и изнашивающихся элементов гидравлических систем машин.

Месторождение железной руды Boukhadra расположено на северо-востоке Алжира, который является одним из самых запыленных районов мира и относится к так называемому «пылевому поясу» Северной Африки. Внешняя среда представляет собой засушливую зону. На участке добычи на высоте 1463 м над уровнем моря водоносный горизонт отсутствует. Частицы пыли диаметром в диапазоне $10 < d_v < 20$ мкм держатся в воздухе около суток. Изменчивость суточного количества оседающей пыли свидетельствует о высокой фоновой запыленности с нагрузкой 300–4000 мкг/м².

Согласно ИТС 25–2021 выбросы пыли составляют 7,0–61,0 г на тонну добываемой горной массы при концентрации пыли до 7,5 мг/м³.

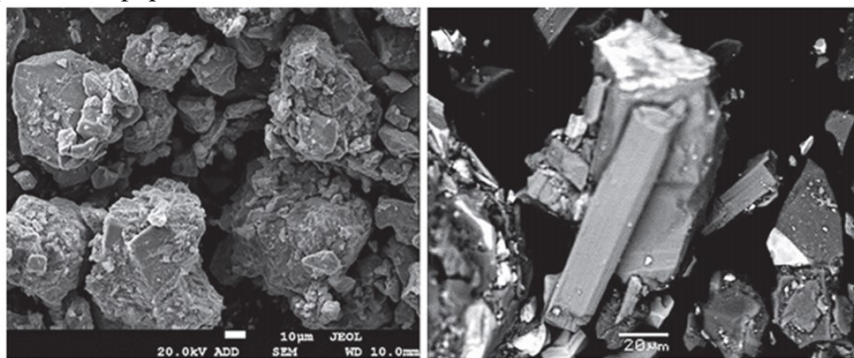
Анализ размерно-массовых характеристик ЖРП проводился на образцах (рудник Boukhadra и Лебединский ГОК). Преобладающий минерал – гематит (Fe₂O₃), плотность – 2,7 т/м³. Содержание железа в руде варьируется от 55 до 60%. Содержание оксида кремния

(SiO₂) – 6-9% свидетельствует о средней абразивности железорудной пыли.

Распределение размеров частиц ЖРП проанализировано на лазерном анализаторе LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer. По результатам анализа распределения размеров частиц образцов железорудной пыли за основу при дальнейшем анализе процесса осаждения пылевых частиц на поверхности штоков силовых гидроцилиндров карьерного экскаватора принят медианный диаметр как средний кумулятивный диаметр по совокупности 13,658 мкм (рудник Boukhadra) и 14,072 мкм (Лебединский ГОК).

На рисунке 1 представлена полученная на растровом электронном микроскопе (РЭМ) съемка образцов железорудной пыли, по которой можно судить о форме и размерах частиц.

По результатам экспериментальных измерений влажность образцов ЖРП составила 2,36% при насыпной плотности оседающей пыли 991 кг/м³. При анализе вертикального оседания частиц пыли в воздухе под действием силы тяжести справедлива формула Стокса при размерах взвешенных частиц в диапазоне $1 < d_p < 70$ мкм. Скорость витания частиц железорудной пыли $d_p = 14$ мкм с учетом коэффициента формы частиц составляет 0,01 м/с.



а)

б)

Рисунок 1 – Форма и размеры частиц железорудной пыли (а); высокоабразивных частиц кварца (б)

Погрузка железной руды в транспортные средства на руднике Boukhadra осуществляется экскаваторами Komatsu PC1250 с вместимостью ковша 6,5 м³ в самосвалы Caterpillar 775G грузоподъемностью 70 т (42 м³).

Для забоя одного экскаватора принимается плоский источник с размерами, примерно равными площади горизонтальной проекции кузова карьерного самосвала.

Максимальный разовый выброс пыли при разгрузке ковша экскаватора в кузов самосвала определен согласно Методике ИГД им. А.А. Скочинского по расчёту вредных выбросов при открытых горных работах (1):

$$m_э = q_{уд} \rho E k_e k_1 k_2, \quad (1)$$

где $q_{уд}$ – удельное выделение пыли с 1 м³ отгружаемого материала, г/м³; ρ – плотность железной руды, т/м³; E – вместимость ковша экскаватора, м³; k_e – коэффициент экскавации; k_1 – коэффициент, учитывающий скорость ветра, (м/с); k_2 – коэффициент, учитывающий влажность пыли.

При разгрузке ковша экскаватора с максимальным разовым выбросом пыли 87 г в воздухе рабочей зоны образуется пылевое облако. Объем шарового сегмента радиусом 3 м составляет 113,11 м³. Площадь горизонтальной проекции пылевого облака 59,45 м². Начальная концентрация пыли в облаке – 0,77 г/м³.

Поле концентрации пыли в рабочей зоне при условии отсутствия ветровой нагрузки для небольших периодов времени описывается следующим уравнением баланса пыли в облаке (2)

$$V_{оп} \frac{dc}{dt} = m_э - F c v_в V_{оп}, \quad (2)$$

где $m_э$ – разовый выброс пыли в рабочей зоне, г; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость осаждения; $v_в$ – скорость витания пыли в воздухе, м/с, $V_{оп}$ – объем облака пыли, м³.

Решение данного уравнения (3)

$$c = c_0 / (F v_в t - 1), \quad (3)$$

где c_0 – начальная концентрация пыли в рабочей зоне, г/м³.

По выражению 3 построен график снижения концентрации пыли в облаке рабочей зоны со временем осаждения t (рисунок 2).

Снижение концентрации пыли в облаке рабочей зоны со временем осаждения аппроксимируется экспоненциальным законом (4):

$$c_t = 0,62e^{-0,01t}. R^2 = 0,931. \quad (4)$$

В итоге определено, что в течение каждого рабочего цикла экскаватора $t_{\text{ц}}=30$ с, учитывая остатки пыли в облаке от предыдущего цикла разгрузки, на поверхности штока оседает пыль с нагрузкой $0,438 \text{ г/м}^2$ при средней толщине слоя пыли $0,44 \text{ мкм}$.

2. При функционировании экскаватора в условиях повышенной запыленности рабочей зоны абразивной мелкодисперсной пылью следует скорректировать регламент проведения технического обслуживания элементов гидросистемы и установить периодичность замены гидроцилиндров на запасные через каждые 240–320 тыс. циклов (двойных ходов) по причине ускоренного изнашивания в паре трения шток-уплотнения, а также внести коэффициент 0,5 от норматива на замену расходных элементов гидросистемы.

Анализ рабочего хода штока гидроцилиндров экскаватора выполнен в результате обработки реальных видеogramм при функционировании гидроманипулятора экскаватора (таблица 1).

При рабочем ходе уплотнения из эластичного материала скользят по металлической поверхности штока. Шероховатая поверхность штока, а также наличие слоя абразивной железорудной пыли приводят к увеличению силы трения в паре шток-уплотнение, интенсивному изнашиванию деталей, увеличению утечки гидравлической жидкости.

Рабочий ход блока уплотнений по штоку составляет 17 мм при регулируемой частоте возвратно-поступательного движения блока 1000 ходов/мин. Для проведения экспериментов использовался натуральный шток $\varnothing = 20$ мм, длиной 200 мм: марка стали 20MnV6; допуск на наружный диаметр f7; шероховатость $R_a < 0,20 \text{ мкм}$; толщина хромового покрытия $< 20 \text{ мкм}$; твердость хрома HRC 66-69 (HV 0,1/HV 850-1000), грязесъемник типа SA из полиуретана, уплотнение штока из полиуретана типа ТТ1 и гидравлическая жидкость НІТАСНІ Super EX46HN.

В работе принят метод ускоренных ресурсных испытаний (ГОСТ 23.205-79) предназначенных для оценки ресурса пары трения

штока-уплотнение с имитацией эксплуатационных условий и моделированием циклов возвратно-поступательного движения штока (двойных ходов) на разработанном триботехническом стенде (рисунок 3).

Анализ результатов лабораторных экспериментов показал, что в зоне контакта штока с уплотнениями имеет место сложный вид изнашивания, обусловленный наличием повышенного количества минерального абразива, шаржированного в поверхность трения и свободно перекатывающегося в зазоре пары трения (рисунок 4).

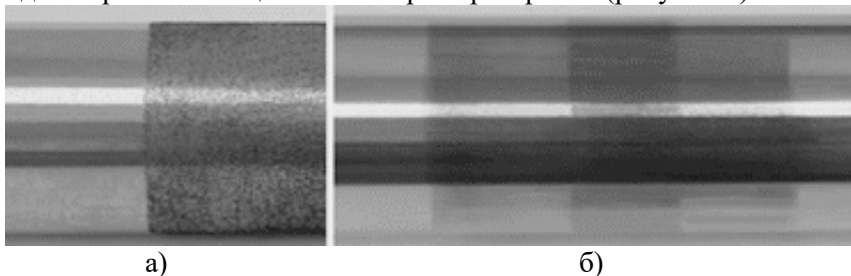


Рисунок 4 – Осаждение железорудной пыли на поверхности штока (а) и шток со следами изнашивания (б)

Микрофотографии рабочей поверхности штока до и после изнашивания в трех разных сечениях выполнялись на металлографическом инвертированном микроскопе Leica DM ILM HC с увеличением 20х с помощью отраженного света в светлом поле.

Обработка снимков проводилась в среде Corel PHOTO-PAINT версии 21 и FastStone Image Viewer версии 7.7. Для проведения анализа выбиралась область с разрешением 66×66 пикселей и глубиной 24 бита. Изображения использовались для получения параметров шероховатости и фрактальной размерности поверхностей в среде Gwyddion версии 2.62.

При эксплуатации гидроцилиндра в нормальных условиях происходит постепенное изнашивание уплотнений и поверхности штока с ростом числа циклов (двойных ходов) (Таблица 2).

Изменение шероховатости поверхности штока при изнашивании в нормальных условиях в диапазоне $R_a = 0,139-0,128$ мкм показано на рисунке 5, а (кривая 1), в диапазоне $R_a = 0,139-0,102$ мкм при

изнашивании с пылью (рисунок 5, а (кривая 2). В условиях запыленности на начальной стадии изнашивания штока значение фрактальной размерности увеличивается до $D = 2,75$ при $z = 80$ тыс. циклов, затем уменьшается до минимального значения $D = 2,66$ при $z = 240-320$ тыс. циклов (рисунок 5, б, кривая 2).

Пики шероховатости поверхности изнашиваются более интенсивно в присутствии абразивной железорудной пыли (рисунок 6, а), появляется зазор, способствующий прониканию пылевых частиц внутрь гидроцилиндра и загрязнению рабочей жидкости.

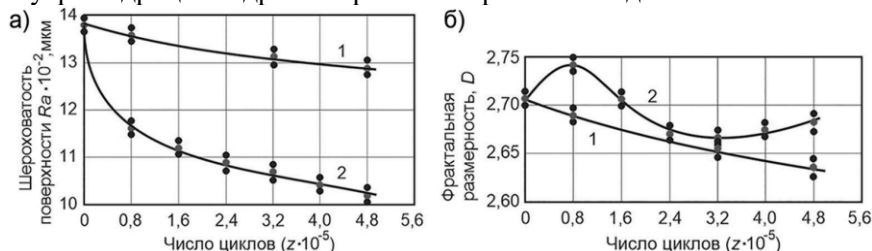


Рисунок 5 – Изменение шероховатости поверхности штока (а) и значения фрактальной размерности (б) в зависимости от числа циклов z в нормальных условиях (1) и в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью (2)

Пики шероховатости поверхности изнашиваются более интенсивно в присутствии абразивной железорудной пыли (рисунок 6, а), появляется зазор, способствующий прониканию пылевых частиц внутрь гидроцилиндра и загрязнению рабочей жидкости.

На основе лабораторных экспериментов измерено количество пропускаемой железорудной пыли через уплотнения штока с увеличением числа циклов z (рисунок 6, б).

В результате проведенных исследований показан негативный характер влияния абразивной мелкодисперсной железорудной пыли с высокой поверхностной концентрацией частиц на интенсивность изнашивания штока и уплотнений гидроцилиндра. В период 240-320 тыс. циклов в гидросистему экскаватора попадает 100-200 мкг пыли.

Экспериментально подтверждена возможность применения бесконтактного оптического метода измерения топографии поверхности штока при его изнашивании с абразивной мелкодисперсной пылью.

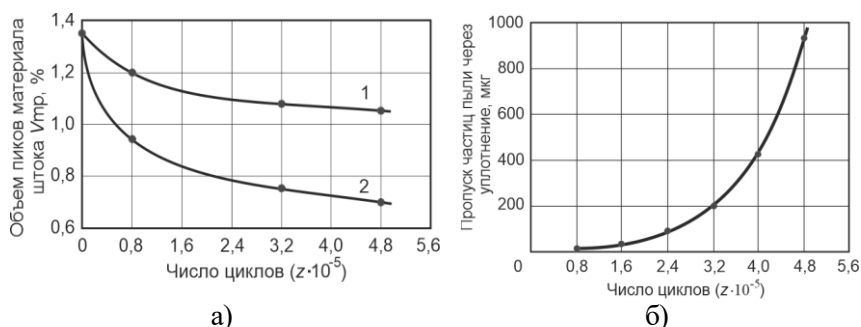


Рисунок 6 – Изменение объема пиков материала V_{mp} (а) при изнашивании штока и пропуск железорудной пыли через уплотнения штока (б) в зависимости от числа циклов z

Масса пропускаемой пыли с ростом числа циклов z может быть оценена экспонентой (5)

$$m_{п} = 4,73e^{0,91z}. \quad R^2 = 0,989. \quad (5)$$

По результатам исследования отмечено, что в диапазоне числа циклов (двойных ходов) 240-320 тыс. наблюдается снижение значения фрактальной размерности текстуры поверхности штока до $D = 2,66$ и при минимуме среднеквадратичного значения высоты поверхности штока Sq при постепенном снижении шероховатости поверхности штока R_a .

Существующие правила технического обслуживания не в полной мере учитывают особенности природно-климатических факторов рудника Boukhadra.

Перечень задач ТО на конкретном уровне разукрупнения элементов гидросистемы КГЭ следует решать на основе выбранной стратегии с выделением эшелонов технического обслуживания по фактическому состоянию: силовых гидроцилиндров в стационарных условиях и расходных материалов в условиях рудника.

В таблице 3 показаны предложения по корректировке регламента технического обслуживания элементов гидросистемы КГЭ при эксплуатации в условиях рудника Boukhadra с сокращением периодичности с коэффициентом 0,5 от норматива.

Система ЗИП включает в себя групповой комплект ЗИП-Г для обеспечения эксплуатации (технического обслуживания) элементов гидросистемы экскаватора. Значение числа циклов 240-320 тыс. может использоваться в качестве базового при корректировке регламента технического обслуживания с выделением эшелонов ТО по фактическому состоянию элементов.

Разработано устройство защиты штока гидроцилиндра экскаватора от запыленности за счет установки кольцевых магнитов и упорных выступов на гофрированной трубе из полимерного материала по длине штока гидроцилиндра (рисунок 7).

Гофрированная труба снижает появление статического слоя пыли на поверхности штоков гидроцилиндров. Фиксация трубы кольцевыми магнитами ускоряет монтаж и демонтаж устройства при техническом обслуживании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научной работой, в которой на основе результатов проведенных исследований изложены научно обоснованные технические решения по структуре проведения технического обслуживания по фактическому состоянию на конкретном уровне разукрупнения элементов гидросистемы КГЭ. Реализация результатов исследований вносит существенный вклад в совершенствование процессов технического обслуживания карьерного экскаватора.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы определено, что одним из способов повышения готовности карьерных экскаваторов в условиях жесткого климата и гористой местности Алжира является превентивное техническое обслуживание элементов гидросистем.

2. На основе системного анализа запыленности воздушной среды района рудника Boukhadra выявлена изменчивость суточного

количества оседающей пыли, пределы которой свидетельствует о высокой глобальной фоновой запыленности с нагрузкой 300–4000 мкг/м².

3. На основе оценки характеристик образцов железорудной пыли с рудника Boukhadra определен максимальный выброс пыли в рабочую зону экскаватора до 87 г за одну выгрузку ковша при медианном диаметре частиц пыли 14 мкм, оседающих из пылевого облака с концентрацией 0,77 г/м³ на поверхности штоков гидроцилиндров по экспоненциальному закону со скоростью 0,01 м·с⁻¹.

4. Разработан триботехнический стенд, а также программа и методика для ускоренных исследований процесса изнашивания пары трения шток-уплотнения при запыленности абразивной железорудной пылью.

5. С применением бесконтактного оптического метода измерения топографии поверхности штока при его изнашивании в абразивной мелкодисперсной среде отмечено, что в диапазоне числа циклов (двойных ходов) 240–320 тыс. гидроцилиндра наблюдается снижение значения фрактальной размерности текстуры поверхности штока до $D = 2,66$ при постепенном снижении шероховатости поверхности штока в диапазоне $R_a = 0,139–0,102$ мкм. Рост массы пропуска пыли через уплотнения штока в зависимости от числа циклов z описывается экспоненциальной функцией.

6. Корректировка регламента проведения ТО на конкретном уровне разукрупнения элементов гидросистемы КГЭ решается на основе выбранной стратегии с выделением эшелонов ТО по фактическому состоянию с сокращением периодичности проведения с коэффициентом 0,5 от норматива.

7. Рекомендовано в состав системы ЗИП включать групповой комплект ЗИП-Г для технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора: фильтрующие элементы (запасные части), гидравлическая жидкость (расходный материал восстанавливаемый), гидроцилиндры (заменяемые части с восстановлением).

8. Разработано устройство защиты штока гидроцилиндра экскаватора от запыленности (Патент РФ на полезную модель № 216641).

9. Результаты диссертационной работы использованы в деятельности компании ООО «Ирбис» в разработке регламента технического обслуживания и ремонта гидравлических цилиндров экскаваторов (акт (справка) о внедрении от 04.04.2024).

10. В качестве дальнейшего развития исследований по теме диссертации важно довести предлагаемые технологические решения по корректировке регламента технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора с учетом специфики его эксплуатации в условиях сухого жаркого климата и гористой местности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. **Агагена, А.** Влияние погодно-климатических, горно-геологических и организационно-технических факторов на ресурс карьерного экскаватора / **А. Агагена, А. В. Михайлов, А. С. Елисеев** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №17-2. – С. 294-298. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-17-294-298.

2. **Агагена, А.** Корректировка регламента технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора на руднике Бухадра / **А. Агагена, К. С. Репкина, А. В. Михайлов** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 146-151. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-146-151.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Михайлов, А. В. Анализ структуры мобильного комплекса для добычи органогенного сырья карьерным способом / А. В. Михайлов, Ю. А. Казаков, Д. Р. Гарифуллин, О. Ю. Короткова, **А. Агагена** // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 6-1. - С. 317-330. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_317.

4. **Агагена, А.** Влияние железорудной пыли на изнашивание поверхности штоков гидроцилиндров карьерного экскаватора / **А. Агагена, А. В. Михайлов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №11-1. – С. 5–23. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_5.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Агагена, А.** Особенности применения гидравлических экскаваторов в условиях рудника Boukhadra (Алжир) / **А. Агагена, А. В. Михайлов** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й междунар. научно-техн. Конфер – Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. университет им. Г. И. Носова, 2020. Т.1. - С. 46.

6. **Агагена, А.** Особенности применения горных машин в условиях рудника Boukhadra / **А. Агагена** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. VIII Междунар. научно-практ. конфер. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. - С. 4-7.

7. **Agaguena, A.** Influence of the main operational factors on the working capacity of a mining hydraulic excavator / **A. Agaguena, D. Chishegorov, S. Ivanov, A. Mikhailov** // E3S Web of Conferences 326, 00007 (2021), International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600007.

8. **Агагена, А.** Запыленность рабочей зоны карьерного гидравлического экскаватора и изменение состояния сопряжения штоку-уплотнение / **А. Агагена** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: XXI междунар. научно-техн. конфер. – Екатеринбург: УГГУ, 2023. - С.18-20.

9. **Агагена, А.** Особенности технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора в условиях рудника Бухадра / **А. Агагена, К.С. Репкина** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: XXII междунар. научно-техн. конфер. – Екатеринбург: УГГУ, 2024. - С. 381-384.

Патент:

10. Патент на полезную модель № 216641 Российская Федерация, МПК F15B 15/20 (2006.01). Устройство защиты штока гидроцилиндра экскаватора от запыленности: № 2022133285: заявл. 19.12.2022; опубл. 16.02.2023 / **А. В. Михайлов, Агагена Абдельвахаб, А. С. Федоров**; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Бюл. № 5.

Таблица 1 – Параметры рабочего хода гидроцилиндров Komatsu PC-1250-7

Гидроцилин-дры	Диаметр штока, мм	Средний рабочий ход, м	Площадь открытой поверхности штока, м ²	Количество пыли на штоке за рабочий ход, г
Стрела (2 шт.)	160	1500	1,201	0,330
Рукоять (1шт.)	170	1900	1,300	0,445
Ковш (2 шт.)	110	1450	0,631	0,219

Таблица 2 – Изменение размеров штока и уплотнений в процессе изнашивания

Элемент	Исходный размер, мм	После изнашивания, мм	
		без пыли	с пылью
Шток (наружный диаметр)	19,980	19,979	19,974
Грязесъемник (внутренний диаметр)	19,780	19,865	19,985
Уплотнение (внутренний диаметр)	19,360	19,441	19,785

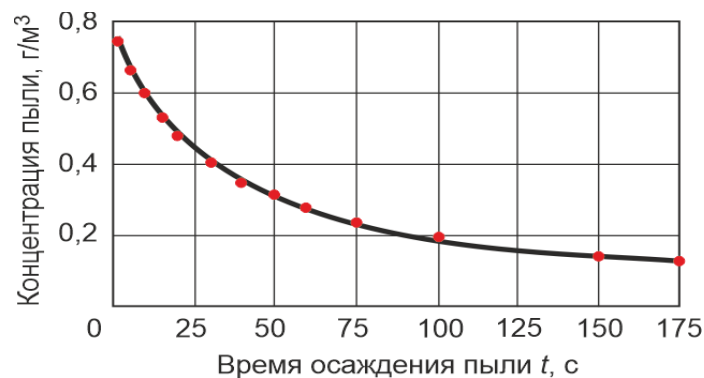


Рисунок 2 – Снижение концентрации пыли со временем

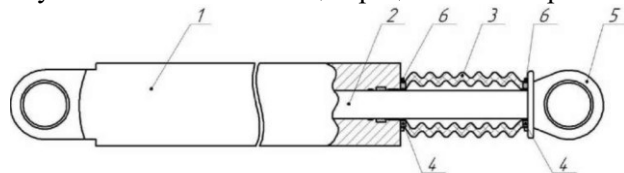


Рисунок 7 – Схема устройства: 1 – корпус гидроцилиндра; 2 – шток гидроцилиндра; 3 – гофрированная труба; 4 – кольцевые магниты; 5 – ухо штока гидроцилиндра; 6 – упорный выступ.



Рисунок 3 – Внешний вид лабораторного триботехнического стенда (а); установка грязесъемника и уплотнения на штоке (б)

Таблица 3 – Сокращение периодичности технического обслуживания элементов гидросистемы КГЭ

Элементы гидросистемы	Периодичность технического обслуживания, мото-ч.			
	500	1000	2000	4000
Фильтрующий элемент линейного фильтра всасывания	-	-	норма – очистка	норма – замена
	очистка	очистка	замена	замена
Фильтрующий элемент фильтра управляющего контура	-	норма – очистка	норма – очистка	норма – очистка
	очистка	очистка	замена	замена
Фильтрующий элемент сливного фильтра	-	норма – очистка	норма – очистка	норма – очистка
	очистка	замена	замена	замена
Фильтрующий элемент фильтра возвратного контура	-	норма – очистка	норма – замена	норма – замена
	очистка	замена	замена	замена
Сетчатый фильтр гидробака	-	норма – очистка	норма – замена	норма – замена
	очистка	замена	замена	замена
Гидравлическая жидкость	-	-	-	норма – замена
	-	-	замена	замена
Гидробак	-	-	-	норма – промывка
	-	-	промывка	промывка
Гидравлический цилиндр	-	-	-	норма – ТО
	-	-	замена	замена