

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Михайлов Александр Викторович

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ особенностей добычи железной руды	11
1.2 Общий обзор горного участка Бухадра и геоминералогическое описание месторождения	12
1.3 Анализ климатических данных провинции Тебесса	15
1.4 Организация добычи железной руды на руднике Бухадра.....	18
1.5 Анализ условий функционирования карьерного гидравлического экскаватора.....	20
1.6 Выводы по первой главе.....	26
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН	29
2.1 Анализ пылевого фона в районе месторождения Бухадра (Boukhadra)....	29
2.1.1 Анализ пылевого фона Северной Африки на глобальном уровне	29
2.1.2 Анализ пылевого фона на локальном уровне в районе месторождения Бухадра (Boukhadra).....	31
2.2 Анализ пылевых выбросов при погрузке железной руды в самосвалы на руднике Бухадра (Boukhadra).....	34
2.2.1 Анализ размерно-массовых характеристик железорудной пыли	34
2.2.2 Анализ физико-механических характеристик железорудной пыли	39
2.3 Анализ осаждения железорудной пыли после разгрузки ковша в кузов самосвала.....	42
2.4 Выводы по второй главе	49
ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	50
3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований...	50
3.2 Методики проведения экспериментальных исследований.....	51
3.2.1 Методики анализа образцов железорудной пыли	51
3.2.2 Методика абразивного изнашивания пары трения шток-уплотнения ...	57
3.3 Методика обработки результатов экспериментов	65

3.4 Выводы по третьей главе.....	66
ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ ШТОК-УПЛОТНЕНИЕ ГИДРОЦИЛИНДРА	67
4.1 Анализ функционирования силовых гидроцилиндров экскаватора в условиях запыленности ЖРП.....	67
4.1.1 Анализ конструктивных особенностей силовых гидроцилиндров экскаватора.....	67
4.1.2 Анализ процесса изнашивания ходовой пары шток-уплотнение в абразивной прослойке.....	73
4.2 Результаты лабораторных исследований процесса изнашивания в ходовой паре шток-уплотнение	78
4.3 Рекомендации по корректировке регламента технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора.....	89
4.4 Выводы по четвертой главе	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А Гидравлический экскаватор Komatsu PC1250-7 прямая лопата.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ В Грязесъемные уплотнения штока SAF	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Уплотнение штока с асимметричным профилем А	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Пример определения текстуры и шероховатости поверхности штока в программе Gwiddion	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Патент на полезную модель	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Акт о промышленном внедрении результатов диссертации	136

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

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 [1].

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 [4].

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 паспорту 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, Приложение Е).

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

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: тезисы докладов (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 (пункты списка литературы №1-5, 54, 69, 99, 103), 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, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент РФ на полезную модель (Приложение Е).

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.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ особенностей добычи железной руды

В настоящее время в мире добывается 2,5 млрд. т железной руды; 90% мирового объема добывается крупнейшими мировыми компаниями (Vale, Rio Tinto, BHP, FMG, Anglo American.) [137]. Уровень мировой добычи железной руды по данным геологической службы США (U.S. Geological Survey) в 2019 г. составил 2,5 млрд. т. Крупнейшими производителями железорудного сырья являются Австралия, Бразилия и Китай, Россия занимает пятое место (Австралия – 930, Бразилия – 480, Китай – 350, Индия – 210, Россия – 99 млн. т) [87].

Рост добычи железной руды открытым способом в значительной степени зависит от эффективности применения одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов, на работоспособность которых оказывают отрицательное влияние ряд факторов: климатические и горно-геологические условия, несвоевременность замен расходных и изнашивающихся элементов гидравлических систем [13].

Ухудшение состояния воздушного бассейна, обусловленное выбросами промышленности и транспортным комплексом, оказывает негативное воздействие на окружающую среду в целом [16]. К основным источникам выбросов в атмосферу при открытой добыче полезных ископаемых относятся движение транспортных средств по подъездным дорогам, а также погрузка рудных материалов [147].

Согласно ISO и Британскому институту стандартов [108; 120], пыль определяется как мелкие твердые частицы, условным диаметром менее 75 мкм, которые оседают под действием собственного веса, но могут некоторое время оставаться во взвешенном состоянии. Частицы пыли из образцов горных пород имеют размер от микрометра до 100 мкм и обычно имеют неправильную форму [118]. Размер частиц, концентрация и химический состав являются наиболее важными свойствами пыли. Такие индикаторы, как

PM₁₀ (частицы с аэродинамическим диаметром меньше или равным номинальным 10 мкм) и PM_{2,5} (частицы с аэродинамическим диаметром меньше или равным номинальным 2,5 мкм), обычно используются для определения стандартов и пределов [151].

В каждом рабочем цикле погрузки абразивная мелкая железорудная пыль PM₁₀ и PM_{2,5} составляет 25% общей фракции ЖРП в воздухе (35 мкг/м³); пыль оседает на поверхностях штоков силовых гидроцилиндров экскаватора, вызывая повышение интенсивности изнашивания поверхности штоков и уплотнений гидроцилиндров. Этот процесс характерен для экскаваторов, работающих в условиях жаркого сухого климата при температуре выше 40 °С [119].

В районах с сухим и жарким климатом не только температура воздуха может достигать 40–50 °С в тени, но также отмечается низкая влажность воздуха, большое количество пыли. Солнечная радиация и сложные дорожные условия пустынно-песчаной местности при отсутствии соблюдения специальных рекомендаций негативно влияют на эффективность работы горной техники [2].

При эксплуатации машин на всех поверхностях образуется толстый слой очень мелкой пыли, причем, взвешенная в воздухе, эта пыль долго не оседает, в безветренную погоду – в течение 2-3 ч [3].

Обеспечение высокой готовности гидравлических экскаваторов при добыче железной руды в условиях жаркого сухого климата, за счет повышения надежности элементов гидравлической системы, сокращения количества отказов, снижения длительности простоев в ремонте, является актуальной задачей.

1.2 Общий обзор горного участка Бухадра и геоминералогическое описание месторождения

Эксплуатируемое в настоящее время железорудное месторождение Бухадра является одним из крупнейших в Алжире (рис. 1.1) [125]. Оно

расположено на северо-востоке Алжира, в 45 км к северу от столицы провинции Тебесса, в 13 км от алжиро-туниССкой границы и в 190 км к югу от сталелитейного комплекса Аннаба.

Национальная компания Ferphos (Fer et Phosphate) взяла на себя разработку и развитие исследований на всех месторождениях железной руды, существующих на территории страны [148]. Объем добычи железной руды, по данным компании Ferphos в 2022 г., составил в среднем 300 тыс. т., из них 280 тыс. т. добывается открытым способом [129].

Месторождение железной руды Бухадра расположено в горной местности Джебель Бухадра, относится к атласско-сахарской серии и характеризуется простой антиклинальной структурой СВ-ЮЗ [115]. Эта антиклинальная структура простирается на 7-8 км в длину и 3-5 км в ширину в направлении СВ-ЮЗ (рис. 1.2). толщина от 10 до 15 м. Она состоит в основном из мезозойско-кайнозойских образований, покрытых четвертичными отложениями [149; 124]. Триасовый диапир контактирует с меловыми известняками в западной, южной и юго-восточной частях антиклинали [117].

Нижнее и верхнеаптские, третичные (миоценовые) и четвертичные образования, состоящие из известняка, песчаника и конгломерата, являются основными геологическими формациями, влияющими на массив [112]. С литологической точки зрения породы, окружающие месторождение, характеризуются рыхлыми (песок, глина, мергель) и консолидированными (песчаник, известняк, доломит и т. д.) образованиями.

Джебель Бухадра представляет собой изолированный массив карбонатных пород, возвышающийся над долиной Морсотт на высоте от 700 до 800 м. С высшей точкой 1463 м. Широта и долгота этого участка: 35° 40' и 35° 50' северной широты и 8° 01' и 8° 04' восточной долготы с приблизительной площадью поверхности 3,7 км² [142].

Внешняя среда представляет собой засушливую зону с обычно высоким фоновым уровнем запыленности. Климат района континентальный

и сухой, температура колеблется от 40 °С летом до 0 °С зимой, осадков мало, иногда выпадает небольшой снег. На участке добычи на высоте 1463 м над уровнем моря водоносный горизонт отсутствует [107].

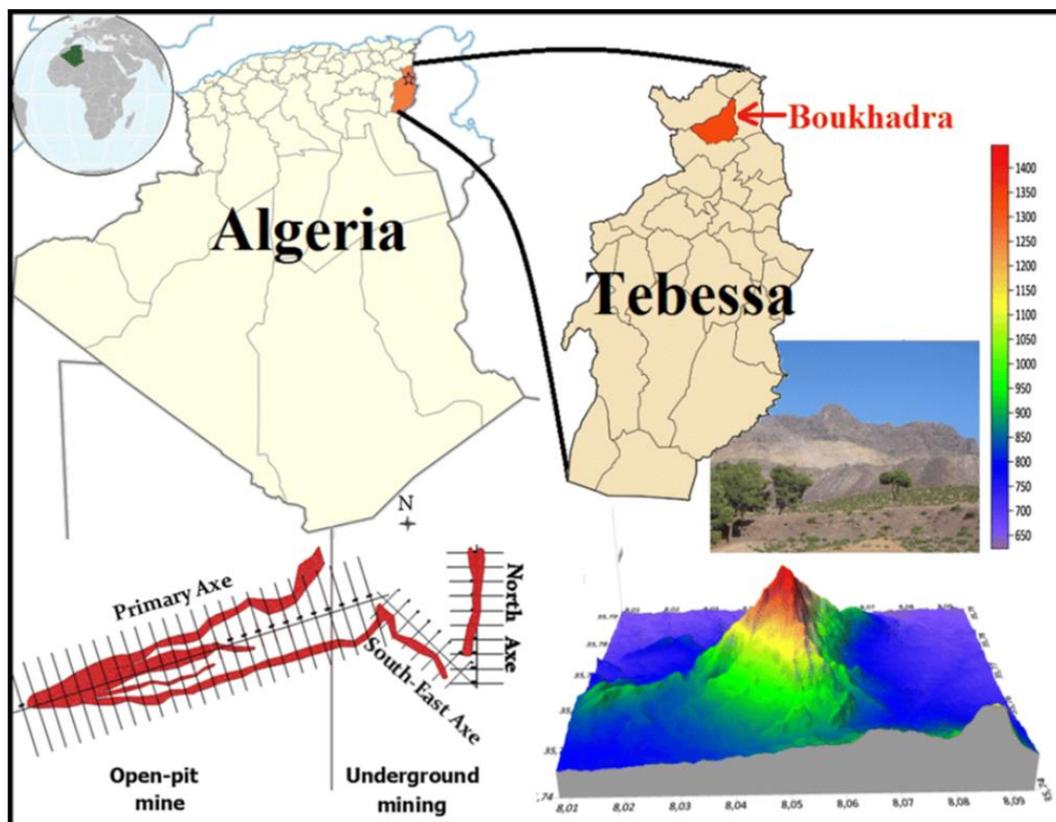


Рисунок 1.1 – Географическое расположение железорудного месторождения Бухадра [125]



Рисунок 1.2 – Железорудное месторождение Бухадра [125]

Рудник Бухадра – один из самых важных в алжиро-туниской

пограничной зоне. Железный рудник Джебель-Бухадра был открыт в 1878 году французским инженером Тиссо, а в 1903 году на нем начался выпуск продукции.

Месторождение содержит большое количество нефосфористой железной руды, очень богатой и очень чистой, с эксплуатационными запасами более 50 млн. т.

Железное месторождение Бухадра подстилается известняками аптской фации, которые уступили место толстым слоям лимонита и красного гематита. Преобладающая минерализация – железный гематит Fe_2O_3 , плотность которого составляет $2,7 \text{ т/м}^3$. Содержание железа в руде колеблется от 55 до 60%. Железная руда Бухадра содержит небольшое количество марганца (2,5%), низкое содержание извести (2,5%) и иногда кремнезема (4%). Она содержит мало Al_2O_3 (0,86%).

В таблице 1.1 представлены физико-механические характеристики железной руды рудника Бухадра [115].

Таблица 1.1. – Физико-механические характеристики железной руды рудника Бухадра

Модуль упругости E , GPa	Коэффициент Пуассона ν	Плотность γ_h , кг/м ³	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , °	Твердость	Предел прочности при сжатии R_c , МПа
21	0,25	2700	0,32	45	5	78,4

Технические параметры рудника делают его приоритетным и стратегическим объектом для разработки и переработки железной руды.

1.3 Анализ климатических данных провинции Тебесса

Климатические данные провинции Тебесса показывают, что климатический цикл делится на два почти равных и нерегулярных периода: холодный и ветренный, и сухой и теплый; довольно холодная зима и довольно жаркое лето.

Горные условия Бухадры являются естественной лабораторией, где наблюдается высокая интенсивность солнечной радиации в сочетании с высокими температурами, сухостью воздуха и почвы.

Как показано на рисунке 1.3, летние температуры очень высоки: максимальная температура в июле составляет 37,6 °С, минимальная - 1,2 °С зимой в январе, а среднегодовая составляет 17,0 °С.

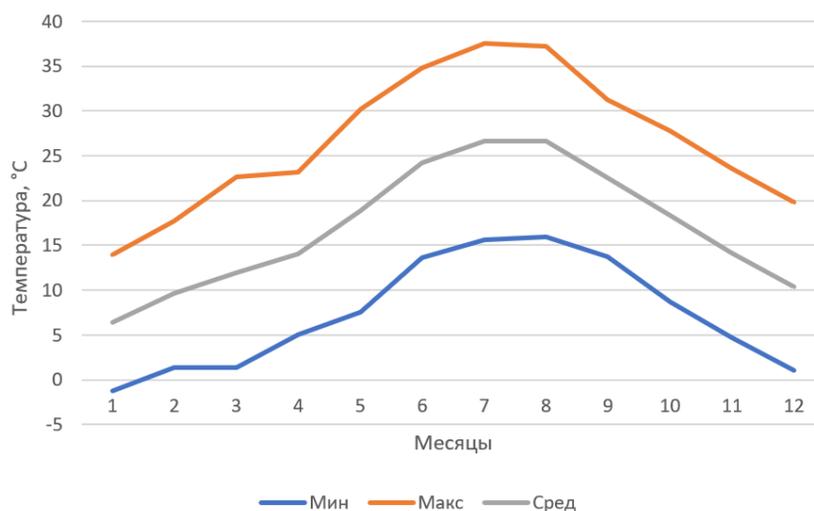


Рисунок 1.3 – Среднемесячные температуры (2013–2022 гг.) - станция Бухадра [155]

Годовое количество осадков составляет около 261 мм, при этом минимальное количество осадков в июле составляет 5,6 мм, а максимальное - 30,5 мм в сентябре (рисунок 1.4).

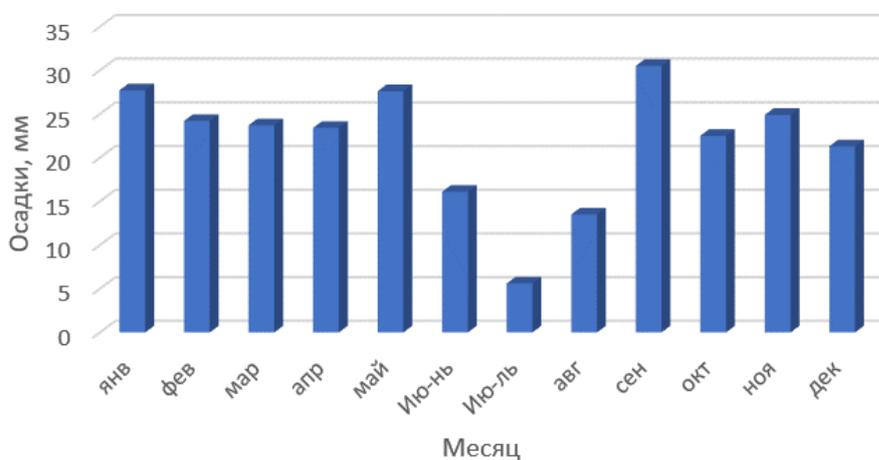


Рисунок 1.4 – Среднемесячное количество осадков (1969-2018) - станция Бухадра [155]

Преобладающие ветры в зимний период, максимальная средняя скорость 3,8 м/с наблюдается в апреле. Месячная скорость ветра за год показана на рисунке 1.5.

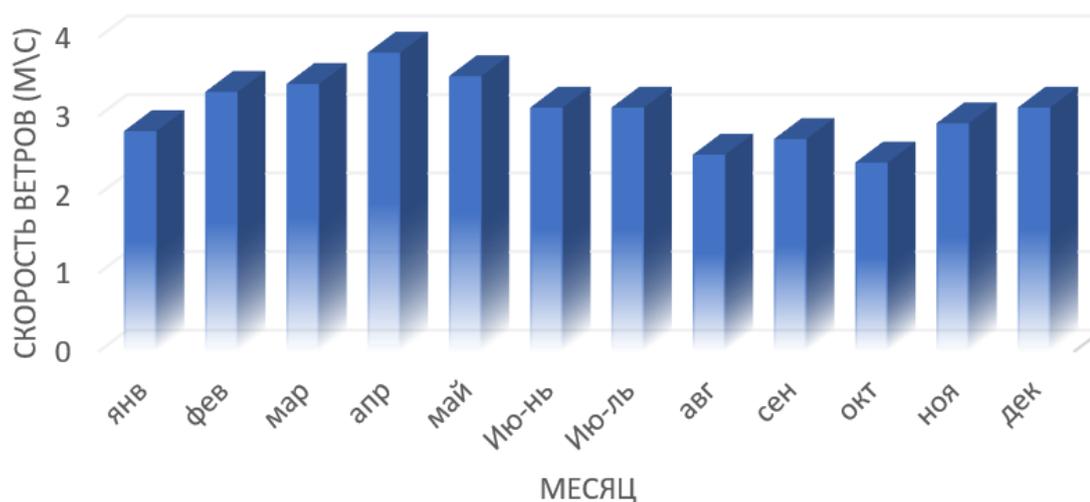


Рисунок 1.5 – Месячная скорость ветра за год (2022) - станция Тебесса [155]

В районе исследований преобладают западно-северо-западные и северо-западные ветры (ноябрь, декабрь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль), менее значительные ветры дуют с юга (рисунок 1.6).

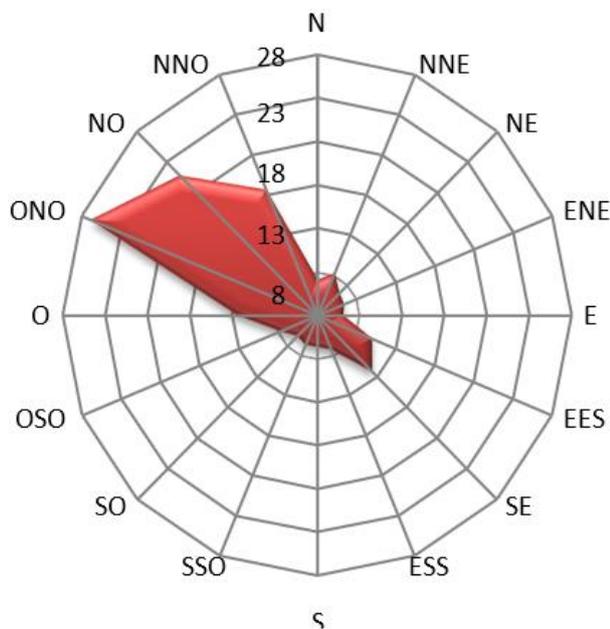


Рисунок 1.6 – Роза ветров для провинции Тебесса и ее регионов - 2022 год

Ветры активны (часты) в зимний период, максимальная средняя скорость 3,8 м/с наблюдается в апреле. Жаркие, сухие ветры вызывают

одновременное снижение влажности воздуха и резкое повышение температуры.

1.4 Организация добычи железной руды на руднике Бухадра

В топографическом отношении участок Бухадра характеризуется горным рельефом с углом наклона склонов от 35° до 40° . По классификации академика Режевского для данного типа месторождений принят метод проходки с разработкой сверху вниз. Начинается она с подготовки верха одной выемочной кромкой, чтобы иметь достаточную рабочую площадку для размещения оборудования. По мере продвижения по верхней ступени с этого уровня открывается нижняя ступень. Доступ к месторождению осуществляется через общую полутраншею для облегчения движения погрузочной и буровой техники.

Производственный цикл состоит из буровых, взрывных, погрузочных и транспортных операций (рисунок 1.7).

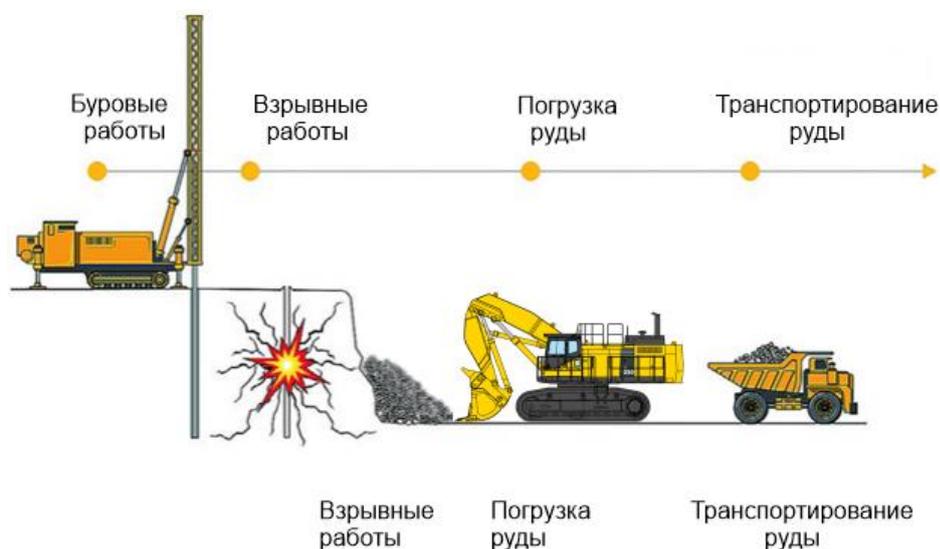


Рисунок 1.7 – Схема добычи железной руды на руднике Бухадра

Целью погрузочно-транспортного процесса является погрузка материала, предварительно раздробленного в результате буровзрывных работ, с помощью экскаваторов, а затем его транспортировка самосвалами в соответствующие пункты назначения [102; 131].

Добыча железной руды организована в 2 смены продолжительностью 8 ч. [112]. Планируемый годовой объем производства 287,45 тыс. т/год.

Месторождение отрабатывается двумя способами: открытым (полутраншейным) и подземным (забойным подэтажами).

Добыча железной руды открытым способом вскрывается полутраншеей со ступенями высотой 10-15 м и углом наклона 80° , ведется буровзрывным способом (вращательным ударным буром) погрузка взорванной массы осуществляется гидравлическим экскаватором KOMATSU с ковшем вместимостью $6,7 \text{ м}^3$ с продолжительностью цикла от 30 до 35 с. транспортируется самосвалами грузоподъемностью 60 т. [Приложение А; Б]

На руднике Бухадра компания использует карьерные самосвалы типа Caterpillar 775G (Приложение А; Б) грузоподъемностью 70 т (42 м^3) для перевозки руды к дробилке (рис. 1.8). на расстояние 4 км [136].



Рисунок 1.8 – Схема циклического транспортирования железной руды от забоя до дробильной станции

Дробленая руда загружается в вагоны и транспортируется по железной дороге на сталелитейный комплекс Эль-Хаджар Аннаба.

Учитывая текущее состояние рудника Бухадра, открытый способ добычи является более целесообразным, чем подземный:

- более высокая производительность;
- низкие потери руды;
- большая стабильность и безопасность грунта;

- меньшие расстояния транспортировки;
- более высокая экономическая эффективность.

1.5 Анализ условий функционирования карьерного гидравлического экскаватора

Влиянию высоких температур на производительность и работоспособность машин, оснащенных гидроприводом и исследованию теплового режима гидропривода в условиях эксплуатации посвящены работы Вайскранца В.М., Каверзина С.В., Кобзова Д.Ю., Иванова С.Л., Сорокина Е.А., Тинь Н.В., Чебунина А.Ф., Мехег I. и других [122; 14; 59; 83; 33;132].

Исследования, посвящённые влиянию климатических условий на работу гидравлических экскаваторов и их производительность, выявили, что температура окружающей среды существенно влияет на эффективность работы гидропривода. Это связано с тем, что изменение температуры приводит к изменению физических свойств гидравлической жидкости [59].

При высокотемпературном режиме наблюдается интенсивное изнашивание элементов гидросистемы вследствие снижения смазывающей способности трущихся поверхностей, изменения линейных размеров нагреваемых элементов. Гидравлические экскаваторы, эксплуатируемые в условиях повышенных температур, требуют проведения ряда мероприятий по совершенствованию системы технического обслуживания [59].

При эксплуатации одноковшового экскаватора происходит повышение рабочей температуры гидравлической жидкости. Результаты экспериментальных исследований показали, что при температуре окружающей среды около +30 °С температура рабочей жидкости может достигать в гидросистеме одноковшовых экскаваторов с тяжелым режимом работы +100 °С [59].

Повышение температуры гидравлической жидкости до +70 °С становится причиной уменьшения производительности одноковшовых экскаваторов на 35 % из-за увеличения времени рабочего цикла. Если

температура жидкости возрастает до 90 °С, то рабочие скорости штоков силовых гидроцилиндров снижаются, а время рабочего цикла увеличивается в 2–3 раза. При этом давление нагнетания в системе падает с 25 МПа до 20 МПа, а техническая производительность уменьшается примерно вдвое [89].

При низкой влажности воздуха материалы становятся хрупкими, ломкими, в них интенсивнее развиваются трещины и микроразрушения.

В реальных условиях климатическая надежность горных машин характеризуется комплексным воздействием климатических факторов [55].

Интенсивность воздействия комплекса климатических факторов на свойства материалов и надежность технических систем определяется как техническая жесткость климата [98] как функция ряда факторов можно записать в виде (1)

$$S = f(Q, t, \varphi, \sigma, v), \quad (1)$$

где Q – суммарная солнечная радиация; t – температура воздуха; φ – относительная влажность воздуха; σ – средняя амплитуда суточных колебаний температуры воздуха; v – средняя скорость ветра.

Изменения свойств материалов уплотнений штока зависят от интенсивности и продолжительности воздействия перечисленных факторов. Комплексное воздействие солнечной радиации и повышенной температуры ускоряет процесс старения эластомеров, при котором изменяются структура, химический состав, определяющие их физико-механические свойства: твердость, прочность, эластичность. Повышение температуры на металлополимерном трибоконтакте инициирует термодеструкцию полимеров, происходит накопление необратимых микрповреждений рабочих поверхностей уплотнений штока [62].

В работах Булеса П. [12-13] показано, что при работе гидравлических экскаваторов Komatsu следует учитывать негативное влияние факторов окружающей среды: температура, давление, влажность, запыленность.

В работах Иванова С.Л. [94-96] отмечается, что в экскаваторе, работающем в условиях повышенной температуры, наиболее

проблематичными являются детали, изготовленные из эластомеров (уплотнения штоков силовых гидроцилиндров). Данная группа элементов гидросистемы подвержена ускоренному процессу старения. Запыленность рабочей зоны экскаватора ускоряет изнашиваемость трущихся пар, загрязняет рабочую жидкость, снижает срок службы фильтрующих элементов гидравлической жидкости.

Гидроцилиндры широко применяют в гидросистемах для привода рабочих органов горного оборудования. По функциональным признакам гидроцилиндры – это объемные гидродвигатели, предназначенные для преобразования энергии потока рабочей жидкости в механическую энергию выходного звена с возвратно-поступательным движением (шток гидроцилиндра) [6].

В работе Е. В. Гранкиной [24] установлено, что «около 6...15 % отказов гидронавесной системы новых сельскохозяйственных тракторов тягового класса 1,4 и 3,0 связано с выходом из строя гидроцилиндров, из которых 42...45 % случаев обусловлены неисправностями уплотнительных узлов – 52 % отказов штокового узла и 40 % – поршневого».

Основными элементарными процессами являются упругое деформирование уплотнений и микрорезание-царапание поверхности штока твердыми частицами пыли. Многократная упругая деформация поверхности уплотнения способствует усталостным повреждениям этой поверхности с образованием трещин и выкрашивания. Абразивное действие частиц пыли возрастает с увеличением их твердости и механической прочности.

Твердые абразивные частицы железорудной пыли (ЖРП) внедряются в поверхность эластичного уплотнения штока, что способствует изнашиванию поверхности штока. Частицы мелкодисперсной железорудной пыли могут проникать в зазор пары трения, обладают острыми краями, способными к микрорезанию металла штока. Кварц и оксиды железа обладают высокими абразивными свойствами. Их высокая твердость и прочность препятствует дроблению частиц в зоне контакта штока и уплотнения. Металл штока имеет

структуру, состоящую из зерен различной твердости [25]. В таблице 1.2 приведены значения микротвердости ряда компонентов металла и составляющих железорудной пыли.

Таблица 1.2. – Микротвердость ряда компонентов металла и составляющих железорудной пыли [25]

Материал	Микротвердость, МПа
Карбид хрома	10 000-15 000
Мартенсит	7 000-13 000
Кварц	10 500-12 250
Оксид железа	9 000
Аустенит, цементит (карбид железа)	7 000-8 000

В работах Кобзова Д.Б. [36-41] показано, что проведенные ВНИИСтройдормаш обследования одноковшовых гидравлических строительных экскаваторов III-V типоразмерных групп в реальных условиях эксплуатации показали, что общий процент выходов из строя гидроцилиндров достигает 80%. Разгерметизация уплотнительных узлов гидроцилиндров является причиной отказов штокового узла в 52% случаев. Отмечены: повреждение штока: износ поверхностей штока с образованием очагов коррозии, риск, царапин, задиров и вмятин; повреждения уплотнителей: по причине старения материала, неравномерного по периметру и ширине уплотнителя износа с появлением риск, царапин и разрывов.

Воздействие высоких температур существенно сокращает срок службы узлов и агрегатов горного оборудования. Из-за перегрева рабочие жидкости теряют вязкость, уплотнители быстрее изнашиваются, что приводит к утечкам. Летом через 400 часов работы давление в гидросистеме обычно падает с 7,5 МПа до 5,0 МПа. В результате производительность машины снижается до 55–75 % от проектной [90].

Работа всех систем машины сильно зависит от уровня запылённости воздуха. Когда пыль попадает в места соединения деталей, это значительно ускоряет износ узлов и агрегатов. Кварцевая пыль становится основным

источником абразивного износа, а её мелкодисперсные частицы практически не задерживаются фильтрующими элементами гидросистемы [90].

В пустынно-песчаных районах с жарким климатом ухудшаются эксплуатационные качества горючих и смазочных материалов; повышаются напряженность работы и интенсивность изнашивания агрегатов, механизмов и деталей; усложняются работы по техническому обслуживанию машин [91].

Для районов с сухим жарким климатом характерна не только высокая температура воздуха (до 40-50°C в тени), но и низкая его влажность. Большая запыленность, а также солнечная радиация и неблагоприятные условия пустынно-песчаной местности при несоблюдении специальных рекомендаций отрицательно влияют на работоспособность машин/ Эксплуатация машин в условиях жаркого климата и повышенной запыленности воздуха требует проведения специальных организационных и технических мероприятий. ТО-1 и ТО-2 проводится с уменьшенной периодичностью по сравнению с обычными условиями [92].

В каждом рабочем цикле погрузки абразивная мелкая железорудная пыль размерами PM_{10} и $PM_{2,5}$ составляет 25% общей фракции пыли в воздухе рабочей зоны; пыль оседает на поверхностях штоков силовых гидроцилиндров экскаватора, вызывая повышение интенсивности изнашивания поверхности штоков и уплотнений гидроцилиндров. Этот процесс характерен для экскаваторов, работающих в условиях жаркого сухого климата при температуре выше 40 °C [119].

Солнечная радиация, высокая температура воздуха до +40 °C, запыленность до 3,2 г/м³, категория полезного ископаемого, создают условия для повреждаемости штоков и уплотнений гидроцилиндров.

На рисунке 1.9 приведены данные по количеству отказов элементов гидравлической системы [79].

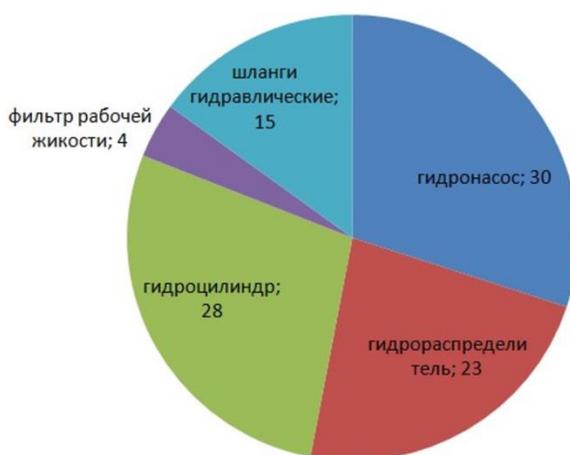


Рисунок 1.9 – Статистика отказов элементов гидравлической системы

К факторам, определяемым окружающей средой, в первую очередь относятся метеорологические и климатические: температура, давление, влажность, количество осадков, а также запыленность [12]. Кроме этого, на готовность экскаватора влияют тип системы технического обслуживания и ремонта, уровень технического обслуживания, длительность и полнота ремонта, качество запасных частей, квалификация персонала, занимающегося обслуживанием экскаватора [100].

В экскаваторе, работающем в условиях повышенной температуры, наиболее проблематичными являются детали, изготовленные из пластмасс. Данная группа элементов подвержена ускоренному процессу старения. Работа в условиях повышенной температуры также приводит к снижению вязкости рабочей жидкости, что, в свою очередь, может быть причиной значительных объемов утечек через зазоры и уплотнения. Запыленность воздуха ускоряет изнашиваемость трущихся пар, загрязняет рабочую жидкость, уменьшает срок службы фильтрующих элементов [94].

В работах Репина С. В. [75] показано, что, содержание загрязняющих примесей в гидросистемах экскаваторов составляет в среднем 0,022% по массе, что превышает в 4,5 раза допустимое значение. Частицы размером 10...40 мкм составляют 42% загрязнений гидравлической жидкости. Указанные размеры частиц загрязнений соизмеримы с зазорами в парах

трения элементов гидросистемы и оказывают значительное влияние на изнашивание деталей гидроцилиндров.

Производственный опыт эксплуатации горных машин, а также анализ статистических данных показал, что на отказы гидроцилиндров приходится до 40...50% отказов всей машины [49].

Интенсивность изнашивания пары трения шток-уплотнения гидроцилиндров определяется: отсутствием системы изоляции поверхности от загрязнений; частыми остановками и возвратно-поступательным движением; переменным характером трения по длине штока. Знакопеременные нагрузки ускоряют процесс образования дефектов на поверхности штока и уплотнений [80]. Под воздействием циклических нагрузок в условиях граничной смазки, характерной для соединений гидроцилиндра, масляная пленка на поверхности штока быстро разрушается, что приводит к непосредственному контакту поверхностей деталей соединений. До 55% случаев выхода из строя гидроцилиндров происходит из-за изнашивания уплотнений штока [80].

Повышение температуры штока и гидравлической жидкости до 70 °С вызывает ухудшение условий контактирования поверхностей трения, износ уплотнений увеличивается в 1,5 раза [59].

1.6 Выводы по первой главе

На основании проведенного анализа состояния вопроса можно сделать следующие выводы:

- рост добычи железной руды зависит от эффективности применения одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов, на работоспособность которых оказывают отрицательное влияние: климатические и горно-геологические условия, запыленность рабочей зоны, несвоевременность замен расходных и изнашивающихся элементов гидравлических систем;

- месторождение Бухадра содержит нефосфористую железную руду с эксплуатационными запасами более 50 млн. т. Планируемый годовой объем производства 287,45 тыс. т/год;

- внешняя среда горного участка Бухадра представляет собой засушливую зону с обычно высоким фоновым уровнем запыленности. Климат района континентальный и сухой;

- добыча железной руды открытым способом вскрывается полутраншеей со ступенями высотой 10-15 м и углом наклона 80°, ведется буровзрывным способом; погрузка взорванной массы осуществляется гидравлическим экскаватором KOMATSU с ковшом 6,7 м³ с продолжительностью цикла от 30 до 35 с. транспортируется самосвалами грузоподъемностью 60 т.

- комплексное воздействие солнечной радиации и повышенной температуры ускоряет процесс старения уплотнений гидроцилиндров. Кварцевая пыль, является основным источником абразивного изнашивания, причем мелкодисперсные частицы пыли, практически не задерживаются фильтрующими элементами гидросистемы экскаватора;

- обеспечение высокой готовности гидравлических экскаваторов при добыче железной руды в условиях жаркого сухого климата, за счет повышения надежности элементов гидравлической системы, сокращения количества отказов, снижения длительности простоев в ремонте, является актуальной задачей.

По результатам проведенного анализа сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

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

Основные задачи исследования:

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, и 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 при 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).

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ГОРНЫХ МАШИН

2.1 Анализ пылевого фона в районе месторождения Бухадра (Boukhadra)

2.1.1 Анализ пылевого фона Северной Африки на глобальном уровне

Восточный регион Алжира рассматривается, как самый запыленный район мира. Добыча железной руды на месторождении Бухадра (Boukhadra) происходит на фоне мощных пылевых выбросов как пустынь, так и антропогенные выбросы из так называемого «пылевого пояса» Северной Африки [127].

На долю региона-источника Северной Африки (западную часть Северной Африки, восточную часть Северной Африки и Сахель) приходится почти половина мировых выбросов пыли [154], (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Координаты областей источников Северной Африки, где:
 1 – западная часть Северной Африки (20 з. д. – 7,5 в. д.; 18 с. ш. – 37,5 с. ш.);
 2 – восточная часть Северной Африки (7,5 в. д. – 35 в. д.; 18 с. ш. – 37,5 с. ш.)

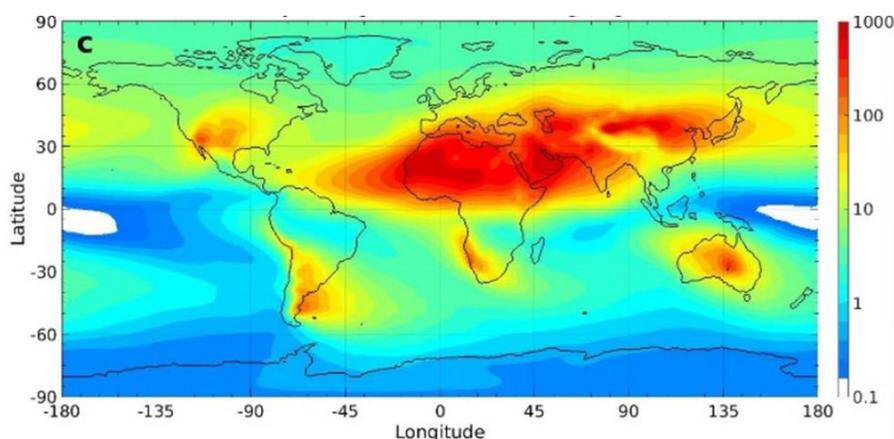


Рисунок 2.2 – Среднегодовая пылевая нагрузка Северной Африки ($\text{мг}/\text{м}^2$)

Пылевая нагрузка ($\text{мг}/\text{м}^2$) составляет $0,019 \text{ мкг}/\text{м}^2$ в секунду. На рисунке 2.3 приведены выборочные данные прогноза университета Афин по состоянию на 18.02.2024 по изменению количества оседающей пыли в районе рудника Бухадра (Boukhadra) (на 12.00 и 18.00) [114].

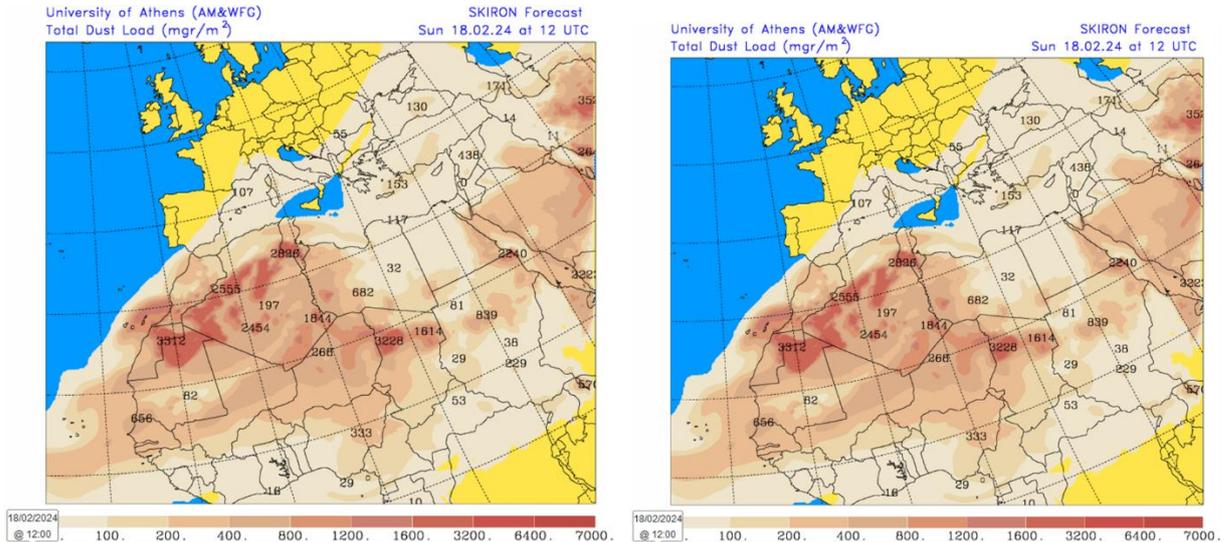


Рисунок 2.3 – Выборочные данные прогноза университета Афин по состоянию на 18.02.2024 по изменению количества оседающей пыли в районе рудника Бухадра (Boukhadra) (на 12.00 и 18.00)

В таблице 2.1 приведены данные прогноза университета Афин по состоянию на 18.02.2024 по изменению количества оседающей пыли в районе рудника Бухадра (Boukhadra) в течение суток [114].

Таблица 2.1 – Прогноз изменения количества оседающей пыли в течении суток (18.02.2024) в районе рудника Бухадра (Boukhadra)

Время	Пылевая нагрузка, $\text{мкг}/\text{м}^2$
00:00	1760
06:00	384
12:00	2836
18:00	4017
24:00	301

Следует отметить, что частицы пыли диаметром в диапазоне $10 < d < 20 \text{ мкм}$ держатся в воздухе около суток. Изменчивость прогноза количества

оседающей пыли свидетельствует об относительно высокой фоновой запыленности глобального масштаба с нагрузкой 300–4000 мкг/м² [114].

На рисунке 2.4 приведен график, показывающий время нахождения пыли в воздухе [127].

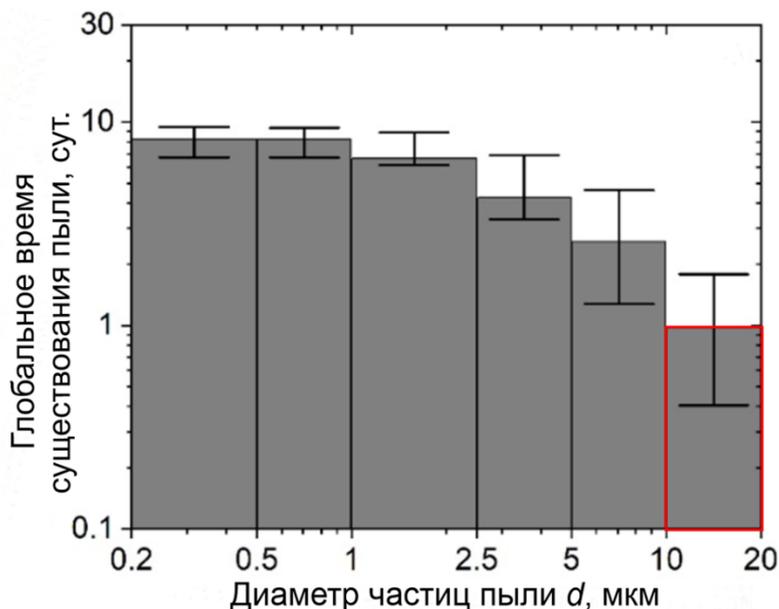


Рисунок 2.4 – Размерно-разрешенное по размерам глобальное время нахождения пыли в воздухе

Анализ моделирования глобальной пылевой нагрузки показал, что 77–91% выбрасываемой пыли оседает обратно на поверхность континентов, а 9–23% из них оседает на поверхность океана [154].

2.1.2 Анализ пылевого фона на локальном уровне в районе месторождения Бухадра (Boukhadra)

Открытая добыча полезных ископаемых приводит к гораздо большему ухудшению качества воздуха в отношении пыли и газообразных загрязняющих веществ на территории горнодобывающих комплексов и вокруг них, чем подземная добыча [152].

Основными источниками пылеобразования являются взрывные работы, бурение, экскавация, транспортирование горной массы, складирование и т. д.

Средние многолетние газопылевые выбросы Лебединского и Стойленского горнообогатительных комбинатов оцениваются примерно в

30 тыс. т/год. При массовом взрыве основная масса пыли объемом 15-20 млн. м³ выбрасывается на высоту до 300 м и распространяется далеко за контуры карьеров. За их пределами через 15 ч после взрыва в радиусе до 4 км имеет место превышение ПДК содержания пыли – в 2-10 [17].

В таблице 2.2 приведены данные по среднегодовой нагрузке пылевых выбросов на атмосферу Лебединского ГОКа [60].

Таблица 2.2 – Среднегодовая нагрузка пылевых выбросов на атмосферу Лебединского ГОКа

Процессы	Масса пылегазовых выбросов, т	Процент от суммы
Бурение	5,2	0,076
Взрывание	3682,4	54,165
Экскавация	921,0	13,547
Транспортирование	1700,0	25,005
Отвалообразование	490,0	7,207
Всего	6798,6	100,000

Факторы, влияющие на объемы пылевых выбросов: погрузочно-разгрузочные операции, перемещение горной массы: гранулометрический состав и свойства перемещаемой горной массы (крепость, влажность), климатические и метеорологические условия, технические характеристики оборудования, количество оборудования [57].

Суммарная масса пыли, поступающая в атмосферу в процессе функционирования ГОКа (рисунок 2.5), формируется из выбросов пыли: [57]

- в результате технологических работ (выемка и транспортирование вынимаемой горной массы на отвалы вскрышных пород, склады;
- в результате технологических работ (складирование вскрышных и сопутствующих пород);
- в результате технологических работ, связанных со складированием полезного ископаемого и его транспортированием на переработку;
- образующихся при переработке полезного ископаемого на площадке ГОКа и складированием отходов обогащения;
- выделяющейся от обнаженных поверхностей карьера, отвалов, складов.

Концентрация пыли достигает $7,5 \text{ мг/м}^3$ [44].



Рисунок 2.5 – Блок-схема процессов открытых горных работ

При открытой добыче железных руд дробление скальных пород при помощи взрывов сопровождается образованием пыли в количестве 45–110 г/т руды, а ее дальнейшая переработка в карьере связана с дополнительным выделением пыли в количествах 50–150 г/т [86].

Средние многолетние газопылевые выбросы Лебединского и Стойленского ГОКов оцениваются примерно в 30 тыс. т/год. При массовом взрыве основная масса пыли и газов объемом $\sim 250 \text{ млн м}^3$ выбрасывается на высоту до 600 м и не распространяется далеко за контуры карьеров. В условиях добычи железной руды открытым способом взрывные работы приводят к образованию пылевого облака. При скорости ветра $\sim 3 \text{ м/с}$ основное количество пыли выпадает вблизи карьера (400–500 мг/м²). За год выпадает до 1000 кг/га, загрязнение окружающей среды отмечается в зоне 0–10 км от карьера [66].

При открытой добыче железных руд дробление скальных пород при помощи взрывов сопровождается образованием пыли в количестве 45–110 г/т руды, а ее дальнейшая переработка в карьере связана с дополнительным выделением пыли в количествах 50–150 г/т [9].

В зависимости от размера частиц (дисперсности) различают видимую пыль размером более 10 мкм (быстро выпадающую из воздуха), микроскопическую – размером от 0,25 до 10 мкм (медленно выпадающую из воздуха), ультрамикроскопическую – менее 0,25 мкм (длительно парящую в воздухе по законам броуновского движения).

В промышленно развитых районах Индии, известных добычей железных руд, средняя нагрузка выпадения атмосферной пыли колебалась от 7,23 до 76,99 г/м² /мес. в летний сезон и от 6,48 до 73,92 г/м² /мес. в зимний период [101].

Для оценки существующего состояния качества воздуха в районе Саранда округа Западный Сингбхум штата Джаркханд в Индии проводился мониторинг качества воздуха на рудниках по добыче железной руды. Данные мониторинга на 25 станциях отбора проб показывают, что среднее за 24 ч значение базовых концентраций РМ₁₀, РМ_{2,5}, варьировалось при погрузке железной руды 249.9 и 112.53 мкг м⁻³ соответственно [110-111].

Согласно ИТС 25–2021 Добыча и обогащение железных руд [31] выбросы пыли составляют 7,0-61,0 г/т добываемой горной массы (общее количество вскрышных пород и добытой руды, т/год).

2.2 Анализ пылевых выбросов при погрузке железной руды в самосвалы на руднике Бухадра (Boukhadra)

2.2.1 Анализ размерно-массовых характеристик железорудной пыли

Пыли – это наиболее широко распространенный класс промышленных аэрозолей, которые образуются в результате диспергирования твердых материалов в газообразной среде (Рис.2.6). Форма частиц в пылях обычно неправильная, соответствующая обломкам твердых тел [32].

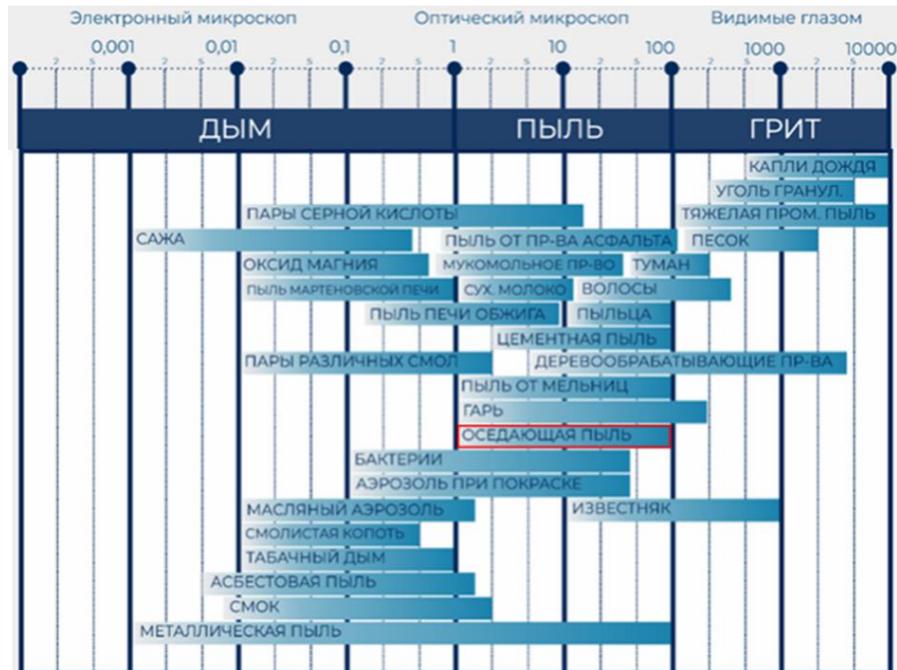


Рисунок 2.6 – Фракционный состав частиц пыли [63]

Анализ размерно-массовых характеристик железорудной пыли проводился на образцах, полученных на руднике Бухадра (Boukhadra) и Лебединском ГОКе. На рисунке 2.7 показаны результаты распределения размеров частиц образца железорудной пыли с рудника Бухадра (Boukhadra), полученных на лазерном анализаторе размеров частиц LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer.

По результатам анализа распределения размеров частиц образца железорудной пыли (рудник Бухадра (Boukhadra)) 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.

При этом содержание твердых частиц с эквивалентным аэродинамическим размером частиц менее 50 мкм в диаметре составляет 82,54%; содержание частиц пыли диаметром менее PM_{10} составляет 47,04%. Содержание частиц пыли диаметром менее $PM_{2,5}$ составляет 27,02%.

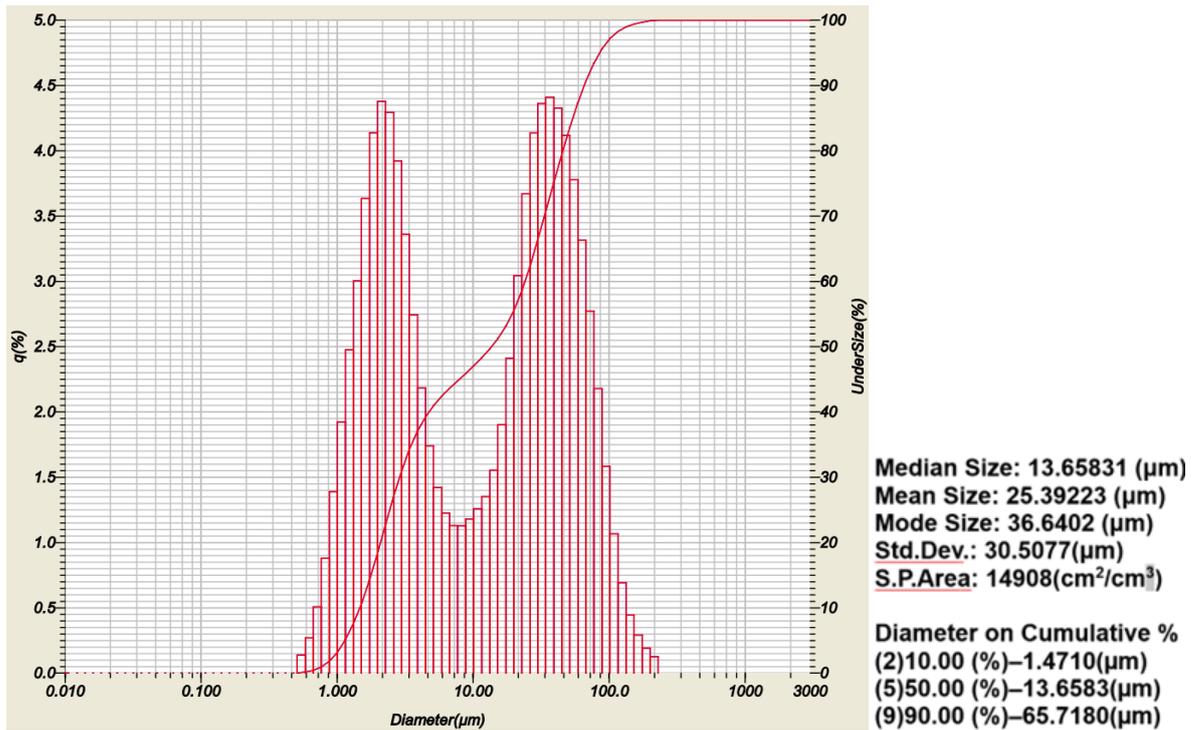


Рисунок 2.7 – Графические результаты анализа распределения размеров частиц образца железорудной пыли (рудник Бухадра (Boukhadra))

На рисунке 8 показаны результаты распределения размеров частиц образца железорудной пыли (Лебединский ГОК). По результатам анализа распределения размеров частиц образца железорудной пыли (Лебединский ГОК) 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 14,072 мкм.

При этом содержание твердых частиц с эквивалентным аэродинамическим размером частиц менее 50 мкм в диаметре составляет 82,90%; содержание частиц пыли диаметром менее PM_{10} составляет 32,60%. Содержание частиц пыли диаметром менее $\text{PM}_{2,5}$ составляет 0,75%. Минералогический состав пыли, возникающей в процессе добычи практически идентичен минералогическому составу тех разрабатываемых горных пород, из которых образуется пыль [56].

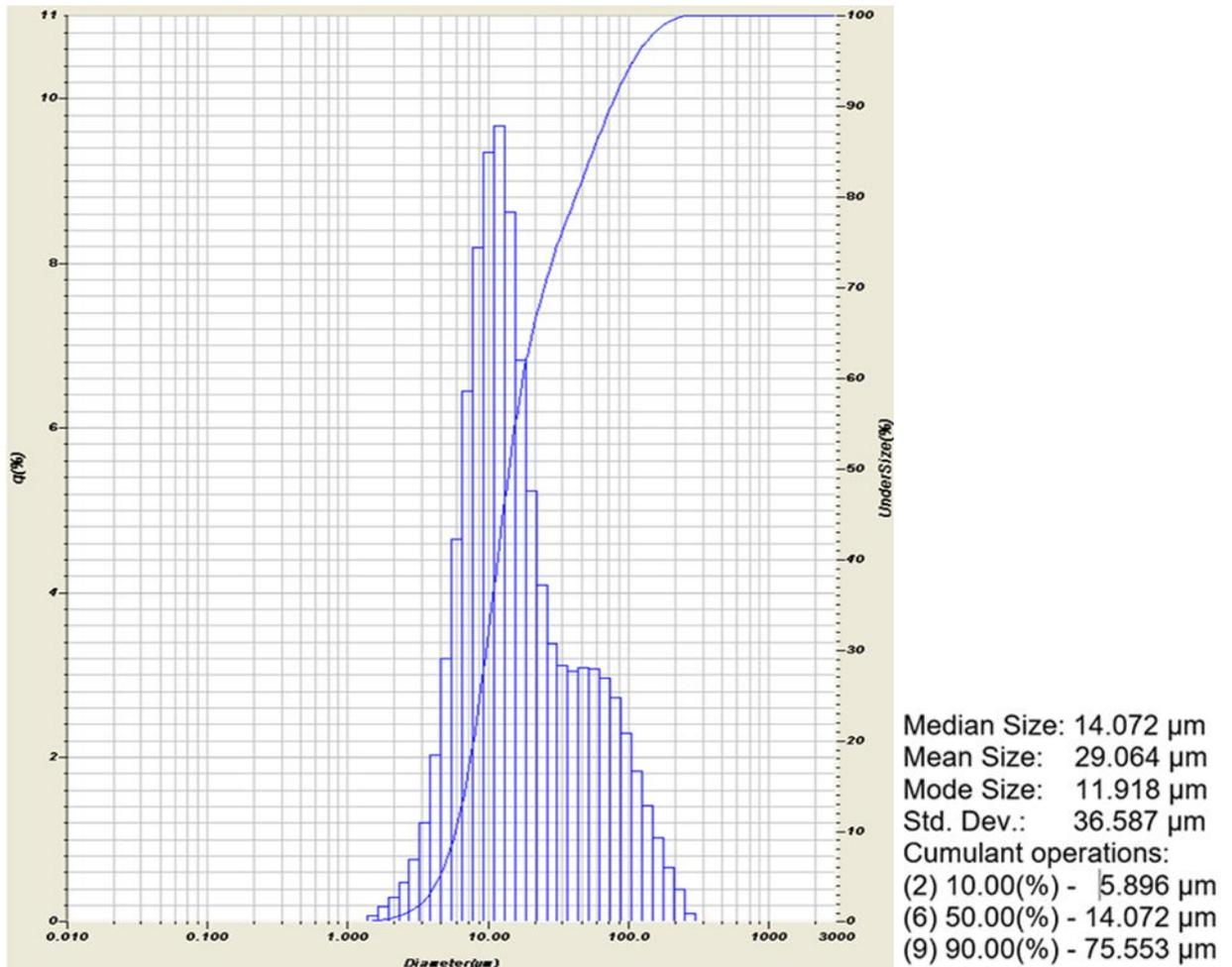


Рисунок 2.8 – Графические результаты анализа распределения размеров частиц образца железорудной пыли (Лебединский ГОК)

Преобладающий минерал в составе железорудной пыли – гематит (Fe_2O_3), плотность которого составляет $2,7 \text{ т/м}^3$. Содержание железа в руде варьируется от 55 до 60%. Химические компоненты, входящие в минеральный состав руды месторождения Бухадра (Boukhadra), показаны в таблице 2.3 [155].

Анализ данных таблицы 2.4 показывает, что основными компонентами железорудной пыли являются Fe_2O_3 – 86,44% и SiO_2 – 8,79%. Эти элементы обладают высокой прочностью, крепостью.

По результатам анализа состава железорудной пыли массовые доли оксида железа и соединений кремния являются наибольшими. Исходя из полученных данных, заметно выделение кремния на фоне остальных компонентов, что объясняет высокую абразивность железорудной пыли.

Таблица 2.3 – Составляющие минерального состава месторождения Бухадра (Boukhadra)

Состав элементов	%
Марганец (Mn)	2,0-3,0
Фосфор Фтор (P.F)	6-10
Медь (Cu)	следы
Оксид кальция (CaO)	3,5-8,0
Оксид магния (MgO)	0,2- 0,40
Сера (S)	0,04-0,10
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	0,5 -0,3
Натрий-калий оксид (Na ₂ O) + (K ₂ O)	0,05 - 0,3
Фосфор (P)	0,002 - 0,01
Оксид кремния (SiO ₂)	6-9
Влажность (H ₂ O)	2-6
Свинец (Pb)	0,005 - 0 ,02
Цинк (Zn)	< 0 ,01

В таблице 2.4 приведены результаты элементного анализа образца железорудной пыли с Лебединского ГОКа.

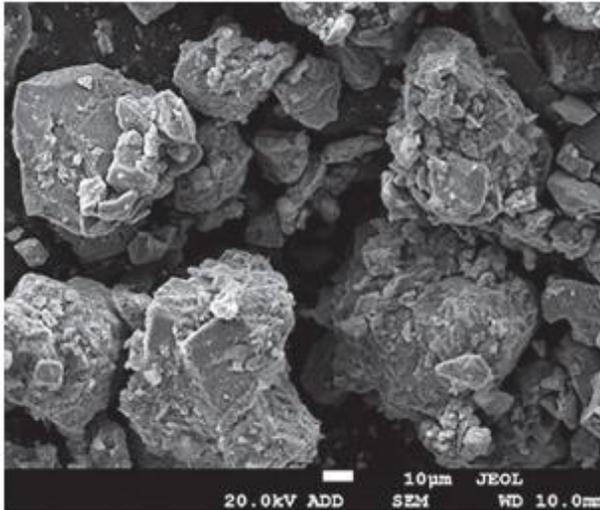
Таблица 2.4 – Результаты элементного анализа образца железорудной пыли с Лебединского ГОКа

Analyte	Result	Proc-Calc	Line	Net Int.	BG Int.
Fe203	86.4416 %	Quant.-FP	FeKa	2080.066	3.158
Si02	8.7871 %	Quant.-FP	SiKa	36.454	0.289
Al203	2.5826 %	Quant.-FP	AlKa	13.097	0.669
Ca0	0.9367 %	Quant.-FP	CaKa	28.790	1.311
Mg0	0.9081 %	Quant.-FP	MgKa	1.239	0.181
P205	0.1162 %	Quant.-FP	P Ka	1.043	0.437
Ti02	0.0899 %	Quant.-FP	TiKa	0.784	0.325
S03	0.0856 %	Quant.-FP	S Ka	0.712	0.453
K20	0.0522 %	Quant.-FP	K Ka	1.950	0.968

При дальнейшем увеличении рассматривались форма и размеры частиц железорудной пыли. Эти частицы являются гранеными кристаллическими структурами, что определяет абразивность железорудной пыли в целом и ускоряет процесс изнашивания штока гидроцилиндра (рис. 2.9). На рис. 9 представлена полученная на растровом электронном микроскопе (РЭМ)

съемка образцов железорудной пыли, по которой можно судить о форме и размерах частиц.

a)



б)

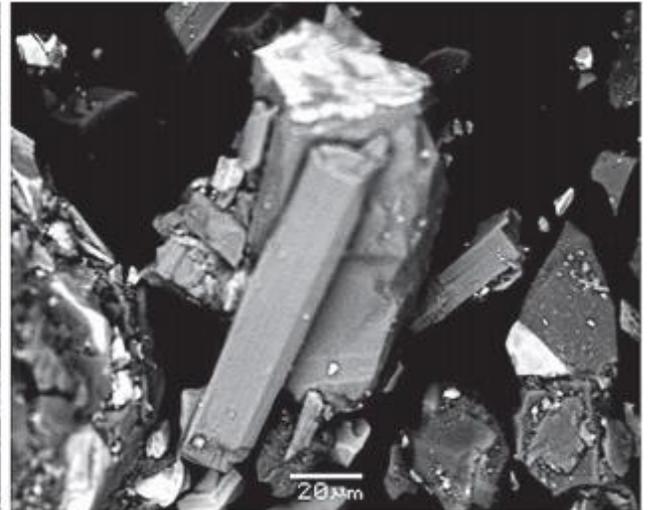


Рисунок 2.9 – Форма и размеры частиц железорудной пыли (*a*);
высокоабразивных частиц кварца (*б*)

По результатам лабораторных исследований характеристик горных пород рудного месторождения Бухадры (Boukhadra) пористость горных пород высокая (14%). Значение сжимающего напряжения образца цилиндрической формы диаметром 50 мм и длиной 100 мм $R_c=51,01$ МПа [45; 144]

2.2.2 Анализ физико-механических характеристик железорудной пыли

С физической точки зрения насыпная плотность порошка определяется тремя факторами: фактической плотностью данного материала, плотностью упаковки частиц порошка в данном объеме и состоянием поверхности частиц; более гладкие пакуются лучше, более шероховатые – менее плотно. Насыпная плотность зависит как от формы частиц, так и от фракционного состава порошка. При прочих равных условиях сферические частицы, заполняя определенную форму, располагаются в ней более плотно, чем частицы фрагментарного или дендритного типа. Наличие крупных частиц в порошке приводит к образованию между ними более крупных воздушных

промежутков. В случае тонких порошков силы сцепления между частицами могут быть соизмеримы с силой гравитационного притяжения частиц, и тогда такие частицы образуют прочные коагуляционные структуры в виде хаотичных сеток, препятствующих равномерному распределению частиц порошка в объеме и их плотная упаковка [11].

Результаты определения насыпной плотности железорудной пыли фракции $d < 100$ мкм после осаждения из пылевого облака приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты определения насыпной плотности железорудной пыли

Номер опыта	Масса цилиндра $m_1, 10^{-2}$ кг	Масса цилиндра с материалом $m_2, 10^{-2}$ кг	Объем цилиндра $V,$ 10^{-6} м ³	Насыпная плотность $\rho,$ кг/м ³
1	2,5	5,95	3,5	985
2	2,5	6,05	3,5	1014
3	2,5	5,91	3,5	974
среднее значение				991

Результаты определения влажности железорудной пыли фракции $d < 100$ мкм приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты определения влажности железорудной пыли

Номер опыта	Масса бюксы $m_T, 10^{-3}$ кг	Масса пыли $m_1, 10^{-3}$ кг	Масса пыли $m_2, \text{кг}$	Влажность $w,$ %
1	8,00	3,95	3,85	2,53
2	7,73	4,12	4,03	2,18
3	7,43	4,18	4,08	2,39
среднее значение				2,36

Результаты определения угла естественного откоса железорудной пыли фракции $d < 100$ мкм на приборе системы Литвинова приведены в таблице 2.7.

Адгезия характеризует прочность сцепления частиц с различными макроскопическими поверхностями. Адгезионные свойства могут проявиться в монослое частиц, осевших на какой-либо поверхности. Аутогезия

определяет прочность сцепления частиц между собой. По степени слипаемости железорудная пыль может быть отнесена к среднеслипающимся [32].

Таблица 2.7 – Результаты определения угла естественного откоса железорудной пыли фракции $d < 100$ мкм

Показатели измерений	Опыт		
	1	2	3
Высота откоса h , мм	45	46	46
Заложение откоса l , мм	60	63	58
Тангенс угла естественного откоса $\operatorname{tg}\alpha$	0,75	0,73	0,80
Угол естественного откоса, α°	37	36	39
Среднее значение угла, α°	37		

Рассеяние пыли в воздухе представляет собой двухфазную систему типа "газ-твердые частицы". Процесс сопровождается осаждением твердых частиц пыли на обтекаемые рабочие поверхности элементов гидросистемы рабочего органа экскаватора, что приводит к ухудшению их эксплуатационных характеристик [35].

На основе анализа результатов многочисленных исследований осаждение частиц на обтекаемые поверхности элементов гидросистемы экскаватора можно условно разделить на две стадии:

- перенос частиц к поверхности штока с последующим контактом;
- адгезия частиц к поверхности штока.

Перенос определяется гидродинамикой обтекания цилиндрической поверхности штока двухфазным потоком воздушно-пылевым потоком. Осаждение частиц пыли является вероятностным процессом, определяемым соотношением между силами адгезии к поверхности штока. В работе [30] показано, что адгезия частиц пыли к поверхности определяется: характером взаимодействия частиц с поверхностью, физическими свойствами частиц и поверхности (размером частиц, формой, шероховатостью поверхности штока), статическими зарядами, условиями окружающей среды (температура, давление, влажность воздуха).

Максимальный диаметр аэрозольных частиц, для определения скорости осаждения которых правомочно применить закон Стокса на основании баланса сил, если упрощенно допустить ламинарное обтекание, для частиц железорудной пыли составляет 50 мкм. Экспериментально установлено, что скорость оседания частиц железорудной пыли в воздухе находится в диапазоне от **0,00012 до 0,995 м/с**. [99].

Скорость витания частиц ЖРП с рудника Бухадра (Boukhadra) медианным диаметром 14 мкм определенная по формуле (67) и номограмме на рисунке 8 составляет 0,015 м/с. Для частиц, форма которых отличается от шарообразной (округлая с неровностями), скорость витания $v_{\text{вит}}$ находится как (2.1)

$$v_{\text{вит}} = kv_0, \quad (2.1)$$

где k – коэффициент, учитывающий форму частиц (0,64) [84].

С учетом коэффициента формы частиц скорость витания частиц ЖРП принимается 0,01 м/с.

2.3 Анализ осаждения железорудной пыли после разгрузки ковша в кузов самосвала

Погрузка железной руды в самосвалы приводит к выбросу пыли в рабочей зоне экскаватора, которая оседает на поверхности штоков силовых гидроцилиндров стрелы, рукояти и ковша.

Добыча железных руд открытым способом, в зависимости от принятой системы вскрытия и разработки месторождения, связана с: буровзрывными работами в горном массиве, погрузкой, перемещением и разгрузкой горной массы [146]. Для каждого из видов горных работ существуют свои коэффициенты выбросов твердых частиц, учитывающие различные способы добычи ресурсов.

Согласно методическому пособию по расчету выбросов от неорганизованных источников [53] при погрузке сухой руды экскаватором в воздух рабочей зоны обычно поступает до 0,5 г/с железорудной пыли.

Исследование на трех карьерах по добыче железной руды открытым способом в Индии показало, что при погрузке железной руды основным загрязнением воздушной среды являются пылевые выбросы с эмиссией 0,2439—0,3317 г/с и концентрацией в воздухе 1,221—1,458 мкг/м³ [110].

В оценку выбросов при разработке карьеров включены четыре вида деятельности: удаление вскрышных пород, бурение и взрывные работы, погрузка и разгрузка. Выбросы для каждого вида деятельности рассчитываются путем умножения коэффициентов выбросов на данные о деятельности. Коэффициенты выбросов рассчитываются исключительно для открытых работ [134].

По материалам нормативных документов США [150] коэффициент выбросов пыли PM₁₀/TSP для операции погрузки железной руды равен 0,18 lbs/ton (0,09 кг/т).

Погрузка железной руды в транспортные средства осуществляется экскаваторами Komatsu PC1250 с вместимостью ковша 6,5 м³. В качестве транспортных средств используются самосвалы Caterpillar 775G грузоподъемностью 70 т (42 м³).

При анализе выбросов пыли на местном уровне за источник выбросов принята отдельная единица оборудования – карьерный гидравлический экскаватор. Для забоя одного экскаватора принимается плоский источник с размерами, примерно равными площади горизонтальной проекции кузова карьерного самосвала. Цикличность пылеобразования определяется цикличностью работы карьерного экскаватора.

На интенсивность пылевыделения оказывают влияние объем одновременно разгружаемой из ковша руды.

Максимальный разовый выброс пыли (г) при разгрузке ковша экскаватора в кузов самосвала можно определить согласно ряду методических материалов расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (2.2) (на основе удельных показателей) [51; 69; 84; 53]

$$m_{\text{э}} = q_{\text{уд}} \rho E k_e k_1 k_2, \quad (2.2)$$

где $q_{\text{уд}}$ – 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), определяется по наиболее характерному для данной местности значению скорости ветра; k_2 – коэффициент, учитывающий влажность материала.

Удельное выделение пыли с 1 м³ отгружаемого материала согласно методике расчета вредных выбросов [51] из ковша экскаватора вместимостью 6,5 м³ и крепости горной массы по шкале М.М. Протодяконова $f=6$ составляет 5,3 г/м³. Насыпная плотность оседаемой из пылевого облака железорудной пыли составляет 991 кг/м³.

Значение коэффициента экскавации принимается по табл. 6,2 методики расчета вредных выбросов [51] для категории пород по трудности экскавации прямой лопатой 0,6. Коэффициент, учитывающий скорость ветра, (м/с), определяется по наиболее характерному для рудника Бухадра (Boukhadra) значению скорости ветра 3,0 м/с и составляет 1,2. Коэффициент, учитывающий влажность материала, при влажности руды 2,36% в условиях рудника Бухадра (Boukhadra) составляет 1,3.

С учетом значений приведенных выше параметров максимальный разовый выброс пыли при разгрузке ковша экскаватора в кузов самосвала 87,06 г.

В воздухе рабочей зоны при разгрузке ковша карьерного гидравлического экскаватора в кузов самосвала образуется облако пыли. Обработка фотографий рабочей зоны показала, что средний радиус пылевого облака составляет 3 м (рис. 2.10) [50].



Рисунок 2.10 – Облако пыли при разгрузке ковша в кузов самосвала

На рисунке 2.11 показана схема формирования облака пыли при разгрузке руды из ковша в кузов самосвала.

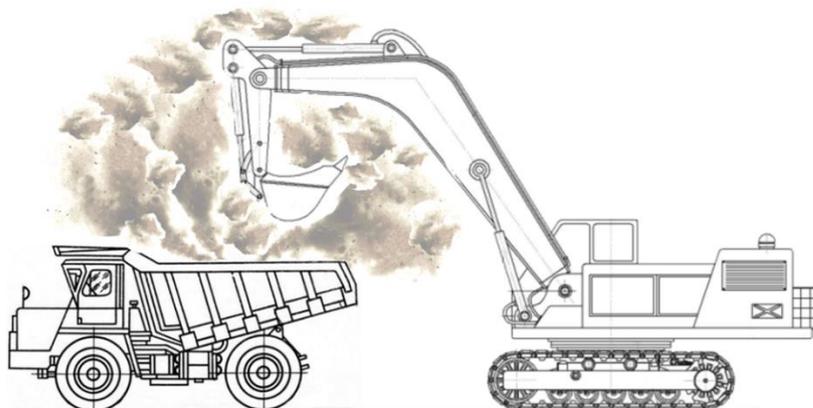


Рисунок 2.11 – Облако пыли при разгрузке ковша в кузов самосвала

Объем шарового сегмента радиусом 4,6 м на уровне ковша составляет 113,1 м³. Площадь горизонтальной проекции пылевого облака на уровне ковша равна 60,0 м². Отсюда, концентрация пыли в облаке рабочей зоны составляет 0,77 г/м³.

Для определения интенсивности осаждения пыли использовали результаты работ [46; 54], экспериментальные исследования которых

показали, что интенсивность осаждения пыли можно считать прямо пропорциональной массе пыли, взвешенной в воздухе $\lambda = FV_{pz}c$, (2.3)

$$\lambda = FV_{pz}c, \quad (2.3)$$

где λ – интенсивность осаждения пыли, г/с; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость осаждения; $V_{оп}$ – объем облака пыли, м³; c – концентрация пыли в рабочей зоне, г/м³.

Поле концентрации пыли в рабочей зоне при условии отсутствия ветровой нагрузки для небольших периодов времени описывается следующим уравнением баланса пыли в облаке (рис. 2.12) с условием отсутствия ветра в виде (2.4)

$$V_{оп} \frac{dc}{dt} = m_э - Fcv_B V_{оп} \quad (2.4)$$

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

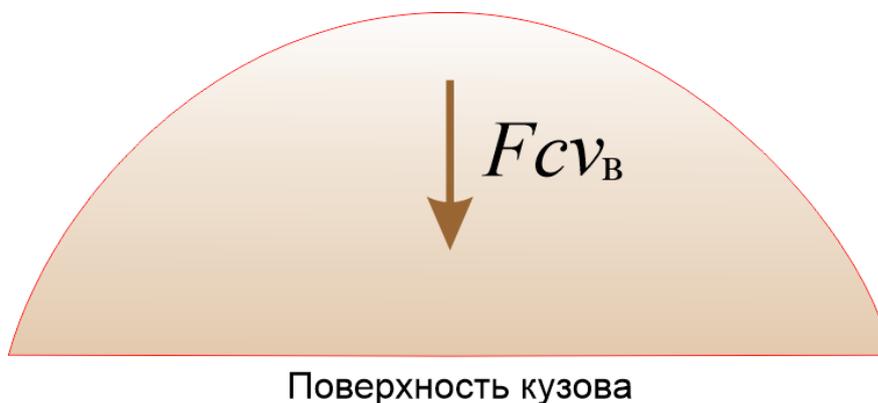


Рисунок 2.12 – Расчетная схема седиментации пыли в рабочей зоне при условии отсутствия ветровой нагрузки

Разделив обе части уравнения на $V_{оп}$, получим (2.5)

$$\frac{dc}{dt} = c_0 - Fcv_B, \quad (2.5)$$

где $c_0 = m_э / V_{оп}$ – начальная концентрация пыли в облаке, г/м³.

Введем следующие обозначения (2.6)

$$a=c_0; b=Fv_B. \quad (2.6)$$

Тогда уравнение (2.6) принимает вид (2.7):

$$\frac{dc}{dt} = a - bc. \quad (2.7)$$

Для решения уравнения (2.7) сначала нужно выполнить следующие шаги упрощения (2.8):

$$\frac{dc}{dt} - (a - bc) = 0. \quad (2.8)$$

сокращение экспоненты для основания d

получаем (2.9):

$$\begin{aligned} d \cdot d^{-1} &= d^{1-1} = d^0 = 1. \\ \Rightarrow \frac{c}{t} - (a - bc) &= 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

умножение на -1 распределяется следующим образом

$$-(a - bc) = -a + bc.$$

прямая реорганизация

$$\Rightarrow -\frac{at - (bt+1)c}{t} = 0.$$

условия группировки

$$\Rightarrow \left(b + \frac{1}{t}\right)c - a = 0.$$

Подставив члены в приведенное выше уравнение, решение данного уравнения для c приводит к выражению (2.10)

$$c = \frac{a}{bt+1}. \quad (2.10)$$

или в натуральном виде

$$c = \frac{c_0}{Fv_B t + 1}.$$

На рисунке 2.13 показан ход снижения концентрации пыли в облаке рабочей зоны экскаватора с изменением времени осаждения.

Ход снижения концентрации железорудной пыли в облаке рабочей зоны со временем может быть описан по экспоненциальному закону в формуле (2.11)

$$c_t = 0,62e^{-0,01t}. \quad R^2 = 0,931. \quad (2.11)$$

Разгрузка ковша экскаватора происходит с максимальным разовым выбросом пыли 87,06 г.

Алгоритм анализа снижения концентрации пыли:

1. Разгрузка ковша экскаватора при первом рабочем цикле происходит с максимальным разовым выбросом пыли 87,06 г. Концентрация пыли в воздухе составит $87,06 / 113,112 = 0,77 \text{ г/м}^3$. Загрузка поверхности после полного оседания пыли $87,06/59,45=1,46 \text{ г/м}^2$.

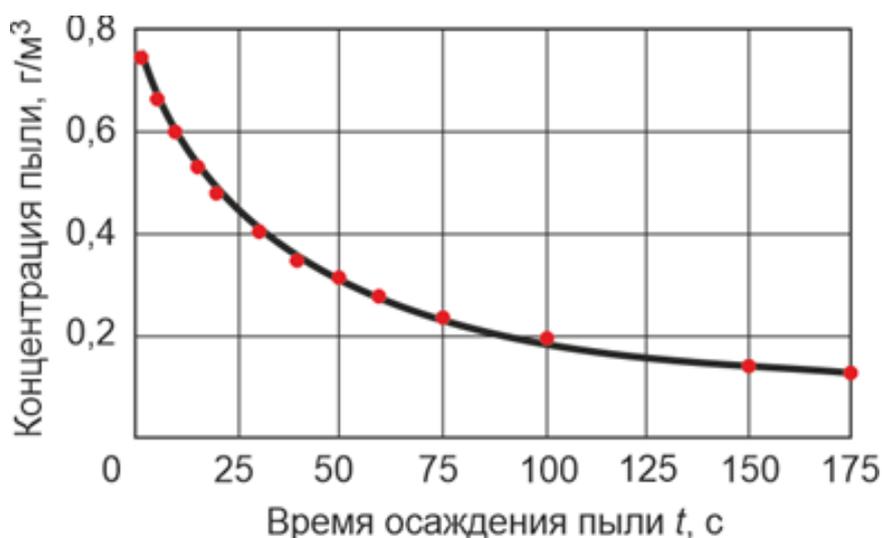


Рисунок 2.13 – Снижение концентрации пыли со временем после разгрузки ковша в кузов самосвала

2. За поворот ковша при втором рабочем цикле ковша в запыленную рабочую зону на момент времени 22,5 с после предыдущей разгрузки концентрация пыли в воздухе составит $0,460 \text{ г/м}^3$.

3. На момент времени 30 с концентрация пыли в воздухе составит $0,405 \text{ г/м}^3$. Снижение концентрации составит $- 0,055 \text{ г/м}^3$. К этому моменту осядет $6,22 \text{ г}$ с нагрузкой $6,22/59,45=0,1046 \text{ г/м}^2$.

4. На момент времени 37,5 с концентрация пыли в воздухе составит $0,362 \text{ г/м}^3$. Снижение концентрации составит $- 0,405-0,362=0,043 \text{ г/м}^3$. К этому моменту осядет $4,86 \text{ г}$ с нагрузкой $4,86/59,45=0,082 \text{ г/м}^2$.

5. При второй выгрузке ковша снижение концентрации за 7,5 с составит $0,77- 0,638=0,132 \text{ г/м}^3$. К этому моменту осядет $14,93 \text{ г}$ с нагрузкой $14,93 /59,45= 0,2511 \text{ г/м}^2$.

6. Итого за два рабочих цикла нагрузка пыли на поверхность штоков гидроцилиндров экскаватора составит $0,1046 + 0,082 + 0,2511 = 0,438$ г/м². При значении насыпной плотности железорудной пыли при медленном оседании на поверхности штока 991 кг/м³ толщина слоя пыли составит

$$0,438/991000 = 6,2533 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,44 \text{ мкм}.$$

При каждом рабочем ходе гидроцилиндра на поверхность штока оседает слой мелкодисперсной абразивной железорудной пыли.

2.4 Выводы по второй главе

1. В работе выполнен системный анализ запыленности воздушной среды в районе рудника Boukhadra, который рассматривается, как самый запыленный район мира из так называемого «пылевого пояса» Северной Африки. Внешняя среда представляет собой засушливую зону с высоким фоновым уровнем запыленности. Изменчивость прогноза количества оседающей пыли свидетельствует о высокой глобальной фоновой запыленности с нагрузкой $300\text{--}4000$ мкг/м².

2. В результате проведенных исследований показано, что средние выбросы пыли в масштабах рудника составляют $7,0\text{--}61,0$ г/т добываемой горной массы (общее количество вскрышных пород и добытой руды, т/год) при концентрации пыли до $7,5$ мг/м³. На участке добычи на высоте 1463 м над уровнем моря водоносный горизонт отсутствует

3. На основе выполненных экспериментальных исследований по оценке характеристик образцов железорудной пыли с рудника Boukhadra и Лебединского ГОКа определен средний 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.

ГЛАВА 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Разработка программы проведения экспериментальных исследований

В соответствии с поставленной целью и задачами диссертационной работы разработана программа экспериментальных исследований:

1. Заготовить образцы железорудной пыли для проведения экспериментов в лабораторных условиях.

2. Провести анализ размерно-массовых характеристик железорудной пыли, физико-механических характеристик и состава исследуемых образцов железорудной пыли.

3. Разработать лабораторный трибологический стенд для проведения ускоренных испытаний по изнашиванию пары трения шток-уплотнение

4. Провести анализ интенсивности изнашивания пары трения шток-уплотнение оптическим методом с определением текущих параметров шероховатости и фрактальной размерности поверхности штока гидроцилиндра.

5. Провести анализ проскока пыли через уплотнения после изнашивания

6. Обработать результаты экспериментальных исследований

На первом (подготовительном) этапе для проведения экспериментов была определена сырьевая база для отбора образцов железорудной пыли. Выполнены выезды на Лебединский ГОК и рудник Бухадра (Boukhadra), проведена заготовка образцов железорудной пыли в количестве достаточном для определения физико-химических характеристик:

- для определения химического и минералогического состава требуется 50 г пыли,
- для анализа дисперсного состава – 100 г,

- насыпной плотности и угла естественного откоса – 200–300 г,
- влажности – 15–20 г,
- абразивности – 300 г.

В целом для исследования заготовлено по 2 кг железорудной пыли с каждого рудника. Пробы осевшей пыли отбирали с поверхности металлоконструкций экскаватора в условиях рудника.

На втором этапе проводилось планирование и последующее проведение экспериментов в лабораторных условиях в порядке, определяемом наличием исходных данных для определения характеристик железорудной пыли [34].

На заключительном этапе были проведены эксперименты на лабораторном трибологическом стенде по ускоренным испытаниям процесса изнашивания пары трения шток-уплотнение оптическим методом с определением текущих параметров шероховатости и фрактальной размерности поверхности штока гидроцилиндра и анализа проскока пыли через уплотнения после абразивного изнашивания.

3.2 Методики проведения экспериментальных исследований

3.2.1 Методики анализа образцов железорудной пыли

3.2.1.1 Методика отбора и подготовки образцов железорудной пыли

Представительность пробы обеспечивается соответствующим отбором ее из массы материала и подготовкой к анализу. Для улучшения представительности в пробу входили порции пыли, взятые на различной высоте с поверхности металлоконструкций экскаватора и не менее чем в 3-5 местах. Порции пыли отбирались в течение ряда временных интервалов, соединялись и усреднялись. Пробы пыли, подлежащие анализу, представлены в лабораторию при натуральной влажности.

Перед проведением анализов гигроскопическое состояние ЖРП приводилось в равновесие с метеорологическими условиями воздуха в

лаборатории. Для этого ее в рассыпанном состоянии выдерживали в течение 24 ч при температуре и влажности воздуха, которые будут при проведении анализа. Часть пыли направлялась для определения натуральной влажности, насыпной плотности и угла естественного откоса. Сокращенные пробы помещают в полиэтиленовые пакеты с zipperом и этикеткой

3.2.1.2 Методика определения физико-механических свойств железорудной пыли

Порция пыли массой 500 г использовалась для определения размерно-массовых характеристик.

Необходимое оборудование:

- сушильный шкаф;
- лабораторные весы ВЛКТ-500;
- металлические бюксы по ГОСТ 25336;
- шпатель по ГОСТ 10778.

Определение насыпной плотности железорудной пыли проводилось путем ее осаждения из пылевоздушной смеси в мерную емкость как массу единицы объема осажденной пыли после ее заполнения. В ее объем входят имеющиеся в нем поры и межзерновые пустоты.

С помощью аналитических весов определяют массу мерной емкости (m_1) и замеряют ее внутренний объем $V_{\text{ме}}$.

Для лабораторных исследований насыпной плотности использован прибор упрощенной конструкции типа предусмотренного ГОСТ 11035-64 с объемом мерной емкости 3,5 см³. Над мерной емкостью вертикально устанавливалась акриловая прозрачная труба высотой 1000 мм и Ø50 мм. Сверху над трубой при помощи щетки распылялся пылевоздушный аэрозоль. По мере наполнения мерной емкости пылью труба снималась. Горку, образованную поверх кромки мерной емкости, сдвигали металлической линейкой, поставленной на ребро.

На весах ГОСМЕТР ВЛЭ-423С (Рис. 3.1) определяли массу мерной емкости с железорудной пылью (m_2). Насыпная плотность определялась по формуле (3.1)

$$\rho_{\text{жрп}} = \frac{m_2 - m_1}{V_{\text{ме}}} \quad (3.1)$$

Результат принимался как среднее арифметическое трех измерений, расхождение между которыми не превышает 10%.



Рисунок 3.1 – Весы лабораторные ГОСМЕТР ВЛЭ-423С, самокалибровка

Определение влажности железорудной пыли проводилось методом высушивания до постоянной массы в анализаторе влажности AND MF-50 (рисунок 3.2) [34].

Погрешность определения влажности 0,05%. Микропроцессором анализатора производился контроль температуры, времени и массы исследуемого образца железорудной пыли [34].

Определение угла естественного откоса железорудной пыли проводилось на приборе УВТ малый (из лаборатории Литвинова) (рис. 3.3). [74]. В прибор насыпается железорудная пыль естественной влажности (в малый отсек) до отметки 60 мм. Затем плавно поднимается вертикальная задвижка. Железорудная пыль частично пересыпается в большой отсек прибора до состояния равновесия.



Рисунок 3.2 – Анализатор влажности AND MF-50 [34]

Замеряется угол естественного откоса как угол между откосом и горизонтальной плоскостью. По делениям на днище и боковой стенке прибора отсчитывается высота и заложение откоса.



Рисунок 3.3 – Общий вид прибора для определения угла откоса сыпучих материалов

С точностью до 1 мм определяется тангенс угла естественного откоса как среднее арифметическое из результатов трех замеров. Расхождение между определениями не должно превышать 2° .

3.2.1.3 Методика определения размерно-массовых характеристик железорудной пыли

После перемешивания и квартования сокращенную до 1 кг среднюю пробу помещали в воздухонепроницаемую тару.

Целью экспериментальной части работы является анализ основных размерно-массовых и физико-химических свойств железорудной пыли. Ситовой

анализ отнесен к числу «классических» методов определения массовых функций распределения пыли [77].

Подготовка образцов осуществлялась методом ситового анализа [41] с использованием набора сит С-200 на цифровом встряхивателе для сит LMSM-300/450 (рис. 3.4) При анализе гранулометрического состава железорудной пыли подлежат решению две задачи: определение размеров частиц и их долей различных классов крупности.

Распределение размеров частиц железорудной пыли анализировалось в лаборатории Санкт-Петербургского горного университета в центре коллективного пользования на лазерном анализаторе LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer с помощью метода лазерной дифракции в Центре коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета.



Рисунок 3.4 – Цифровой встряхиватель для сит LMSM-300/450

Гравитационное осаждение (седиментация) – вертикальное оседание частиц под действием силы тяжести. К витающим относятся частицы, масса и сила тяжести которых полностью компенсируется силой сопротивления среды и силой давления турбулентных завихрений воздуха, при движении ковша экскаватора в течение рабочего цикла [78].

Под влиянием веса $G_{\text{ч}}$ частица пыли начинает двигаться в направлении действия веса со скоростью v . Для того чтобы можно было при этом изучать

весь процесс как одномерный, мы пренебрежем воздействиями, которые могли бы вызвать движение перпендикулярно направлению обтекания, т. е. подъемными силами [43].

К наиболее общему случаю для выражения силы сопротивления газообразной среды движению частиц относится формула Стокса, которая получена как частный случай из уравнения Навье-Стокса. Формула Стокса справедлива при размерах взвешенных частиц в диапазоне $1 < d_{\text{ч}} < 70$ мкм (3.2) [32].

$$v_{\text{вит}} = d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{п}} g / 18 \mu_{\text{в}}, \quad (3.2)$$

где $d_{\text{ч}}$ – эквивалентный диаметр частицы пыли, м; ρ – плотность частицы пыли, кг/м³; $\mu_{\text{в}}$ – динамическая вязкость воздуха, Па·с. (табл. 3.1)

Таблица 3.1 – Зависимость динамической вязкости воздуха от температуры при давлении 0,1 МПа [34]

Температура воздуха $t_{\text{в}}$, °С	0	10	20	30	40	50	60
Динамическая вязкость воздуха $\mu_{\text{в}} \cdot 10^6$, Па·с	16,8	17,3	17,75	18,2	18,7	19,2	19,6

Скорость свободного падения частиц пыли стоксовского диаметра в неподвижном воздухе (скорость витания), кроме расчета по формуле 67 и определялась по номограмме, приведенной на рис. 3.5 [63] температуре воздуха $t = 20$ °С.

Пересчёт значения скорости витания частицы пыли при других температурах воздуха проводился по формуле (3.3)

$$v_{\text{вит}}(t) = v_{\text{вит}}(20) k_t \cdot 10^{-2}, \quad (3.3)$$

где $v_{\text{вит}}(20)$ – скорость витания частиц пыли, определенная по номограмме при температуре воздуха рабочей зоны экскаватора 20 °С; k_t – поправочный коэффициент на температуру воздуха рабочей зоны экскаватора в виде (3.4)

$$k_t = \mu_{\text{в}}(20) / \mu_{\text{в}}(t). \quad (3.4)$$

Исследования методами растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа проводились с использованием двух микроскопов с различными источниками эмиссии электронов: вольфрамовым катодом (растровый электронный микроскоп JSM-6460LV фирмы JEOL) и катодом Шоттки (термо-полевой растровый электронный микроскоп JSM-7001F фирмы JEOL) в широком интервале ускоряющего напряжения и тока [18].

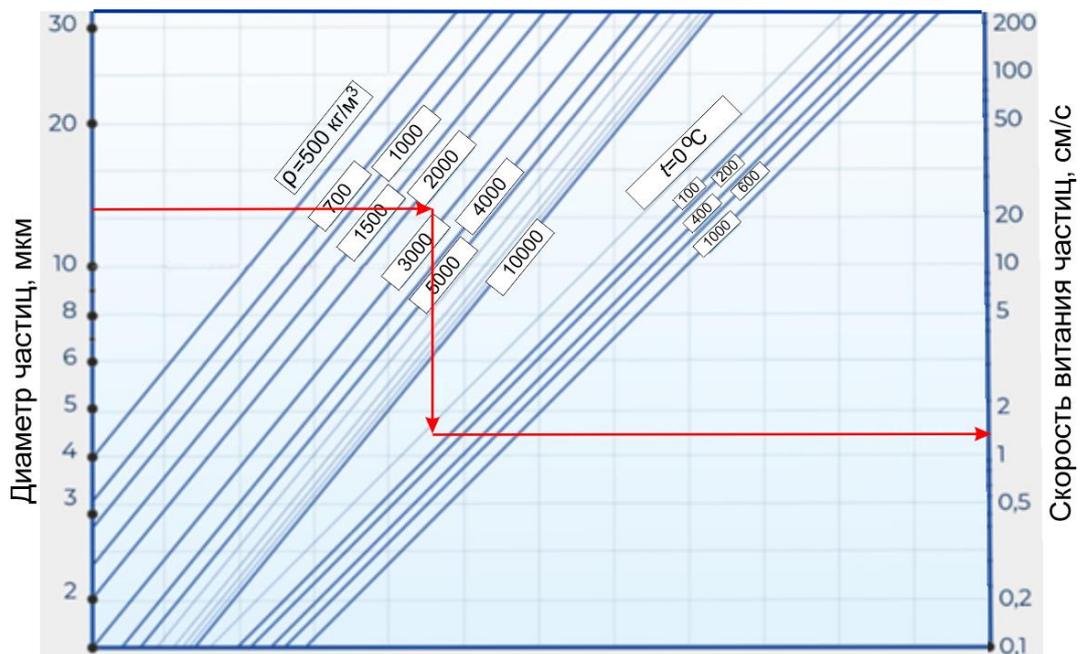


Рисунок 3.5 – Номограмма для определения скорости витания частиц железорудной пыли [63]

Определялся элементный состав исследуемых проб.

3.2.2 Методика абразивного изнашивания пары трения шток-уплотнения

Физическое моделирование абразивного изнашивания на натуральных образцах малых размеров позволяет резко сократить продолжительность эксперимента по сравнению с натурными испытаниями и при минимальных затратах времени спрогнозировать наработку деталей пары трения.

Программа экспериментальных исследований включила определение износостойкости пары трения «шток–уплотнение» в нормальных условиях

(без пыли) и условиях запыленности рабочей зоны штока. Ходовая гладкая пара –шток с блоком «грязесъемник–уплотнение» устанавливался на трибо-стенд. При лабораторных исследованиях, а также при статистической обработке результатов были использованы апробированные методики в соответствии с действующими стандартами.

Первый цикл экспериментов по изнашиванию пар трения «грязесъемник-уплотнение» проводился в нормальных условиях с распылением масляно-воздушной смеси (аэрозоль) вокруг рабочей зоны штока для имитации реальных условий функционирования гидроцилиндра.

Второй цикл проводился с дополнительным распылением пылевоздушной смеси (аэрозоль) вокруг штока для имитации реальных условий функционирования гидроцилиндра в условиях запыленности.

3.2.2.1 Разработка лабораторного трибологического стенда

На кафедре машиностроения Санкт-Петербургского горного университета разработан трибологический стенд на базе ручного электроинструмента с возвратно-поступательным движением штока. Инструмент состоит из корпуса с электродвигателем, под прямым углом к которому расположен шток с быстрозажимным креплением, опорная подошва позиционирует оснастку. оснащены системой регулировки оборотов регулятором числа двойных ходов. Стенд позволяет проводить испытания образцов штоков и уплотнений гидроцилиндров на трение и изнашивание.

Лабораторный трибологический стенд состоит из жесткой рамы, между вертикальными стойками которой горизонтально закреплен образец штока. На штоке расположен блок уплотнений (грязесъемник+уплотнение) в собственном корпусе. Корпус блока уплотнений соединен штангой с электрической машиной, которая осуществляет возвратно-поступательное движение штанги с блоком уплотнений (рис. 3.6). Уплотнительная система в гидроцилиндре обычно включает вторичное уплотнение штока, первичное уплотнение штока и грязесъемник. Рабочий ход блока уплотнений по штоку

составляет 17 мм при регулируемой частоте возвратно-поступательного движения блока уплотнений 1000 ходов/мин.

Для проведения экспериментов использовался образец штока $\varnothing 20$ мм, длиной 200 мм: марка стали 20MnV6; допуск на наружный диаметр f7; шероховатость $Ra < 0,20$ мкм; толщина хромового покрытия < 20 мкм; твердость хрома HRC 66-69 (HV 0,1/HV 850-1000), а также грязесъемник типа SA из полиуретана, уплотнение штока из полиуретана типа ТТІ и гидравлическое масло HITACHI Super EX46HN (Приложение Г).



Рисунок 3.6 – Внешний вид лабораторного трибо-стенда; установка грязесъемника и уплотнения на штоке

3.2.2.2 Методика проведения ускоренных испытаний при изнашивании пары трения шток-уплотнения

В работе принят метод ускоренных ресурсных испытаний согласно ГОСТ 23.205-79 Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима, предназначенные для ориентировочной оценки ресурса пары трения «шток–уплотнение» с имитацией эксплуатационных условий при форсированном режиме. Переход к условиям нормального режима основан на установлении зависимости скорости изнашивания в нормальном режиме от уровня изменения этого параметра (износа) при условии, что зависимость, полученная по результатам поэтапных испытаний, справедлива для процесса

изнашивания в нормальном режиме от окончания обкатки до накопления предельного износа. Для быстрого получения необходимого количества степеней накопленного износа испытания проводятся на этапах с форсированным режимом (форсированные этапы). За основу оценки долговечности пары трения принята 90%-ная наработка до отказа 480 тыс. циклов (двойных ходов) гидроцилиндра с поэтапной оценкой ($z = 80; 160; 240; 320; 400$ и 480 тыс. циклов) по ГОСТ 16514-96 Гидроприводы объемные. Гидроцилиндры. Общие технические требования.

Основным критерием, принятым при выборе режимов нагружения и расчете времени ускоренных испытаний, является достижение идентичности конечного технического состояния основных функциональных групп. Элементами, определяющими работоспособность ходовой гладкой пары, техническое состояние которой подвержено наибольшему изменению в процессе испытаний, являются подвижные элементы (по износу поверхностей). Режимы ускоренных испытаний должны быть эквивалентными режимам нормальных испытаний по своему воздействию на техническое состояние ходовой гладкой пары шток-уплотнение [67].

Каждый этап (80 тыс. циклов) разделен на 10 подэтапов, после каждого из которых на рабочей участок штока наносится масляно-воздушный и пылевоздушный аэрозоли (рис. 3.7).

По окончании этапа шток снимается со стенда, промывается под струей горячей воды и высушивается горячим воздухом.

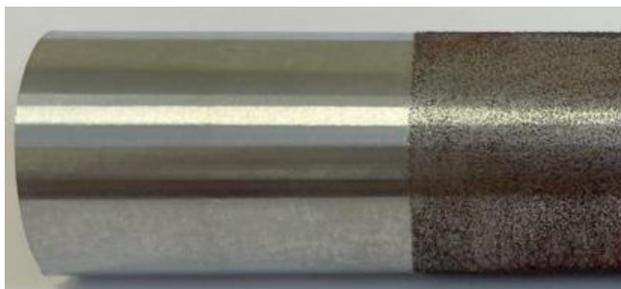


Рисунок 3.7 – Осаждение железорудной пыли на поверхности штока

Перед началом каждого этапа и после завершения измеряется наружный диаметр штока и внутренние диаметры уплотнений микрометром рычажным МР-25 0,002 (рис. 3.8).

Испытания на износостойкость проводятся с целью исследования закономерностей трения и изнашивания, к которым относится комплекс работ по определению влияния различных факторов на скорость изнашивания и абсолютную величину износа.



Рисунок 3.8 – Микрометр рычажный МР- 25 0,002

За этап испытаний в рациональном цикле приняты согласно ГОСТ 30480-97 лабораторные испытания малогабаритных натуральных образцов трибосопряжения (шток и уплотнения). Лабораторная оценка износостойкости материалов является достаточно точной для практических расчетов в том случае, если при испытаниях образцов материала протекал такой же процесс изнашивания, как и при работе реальной детали [82].

Условия внешнего воздействия моделируются для обеспечения воспроизведения заданного процесса изнашивания, как в натуральных трибосопряжениях. Полученные данные используются для определения фрикционно-износных характеристик пары трения при заданных условиях:

время, утечка через уплотнения. В качестве дополнительного физического процесса на контакте пары трения рассматривается шаржирование поверхностей трения мелкодисперсной пылью с увеличением интенсивности изнашивания в 1,5-2,0 раза [22].

3.2.2.3 Методика определения параметров шероховатости и фрактальной размерности поверхности штока гидроцилиндра

Оптико-микроскопические исследования рабочей поверхности штока до и после изнашивания, в трех разных сечениях (рис. 3.9). выполнялись на металлографическом инвертированном микроскопе Leica DM ILM HC оснащенный оптикой, способной получать и сохранять изображения высокого качества с кратностью увеличения 20х с помощью отраженного света в светлом поле (рис. 3.10).

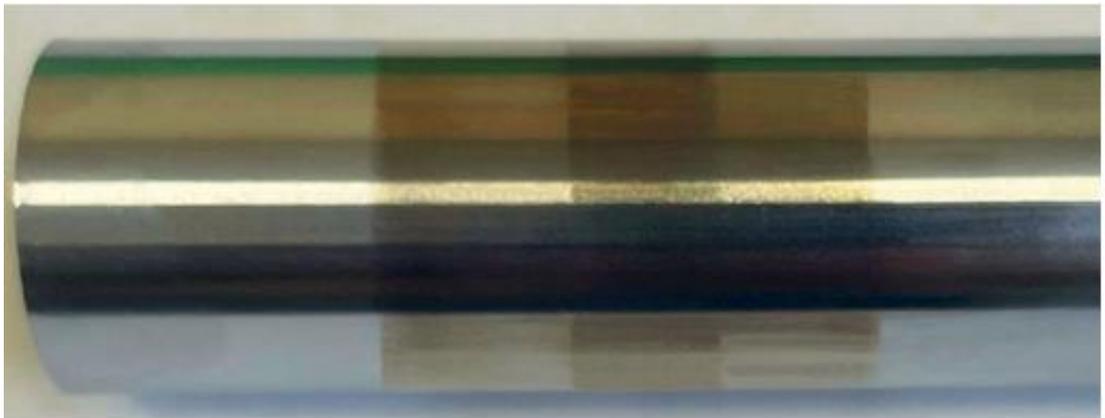


Рисунок 3.9 – Шток со следами изнашивания

Процесс анализа микрофотографий можно охарактеризовать 4 этапами: захват изображения, анализ изображения, получение результатов и определение действия системы [145].

Обработка микрофотографий проводилась при помощи программного обеспечения Corel PHOTO-PAINT версии 21, FastStone Image Viewer версии 7.7. Для проведения анализа выбиралась интересующая область с разрешением изображений 66×66 пикселей и глубиной 24 бита.

Обработанные изображения использовались для получения таких параметров, как шероховатость и фрактальная размерность в программной среде для анализа текстуры поверхностей Gwyddion версии 2.62. [135].

Гидроцилиндры (ГЦ) гидравлического карьерного экскаватора относятся к восстанавливаемым изделиям, которые после изнашивания могут быть возвращены в работоспособное состояние.



Рисунок 3.10 – Металлографический инвертированный микроскоп Leica DM ILM HS

К параметрам, характеризующим способность ГЦ выполнять требуемые функции, относят плотность сопряжения «шток–уплотнение». Изменение состояния сопряжения «шток–уплотнение» носит постепенный характер вследствие изнашивания пары трения при наличии в рабочей зоне мелкой абразивной пыли.

Интенсивность изнашивания функционально связана с интенсивностью физико-механических процессов, проходящих в паре трения. Надежность функционирования пары трения в целом определяется качеством поверхностного слоя штока ГЦ и шероховатостью. Уплотнение штока имеет небольшую твердость и может поглощать твердые абразивные частицы и способствовать изнашиванию поверхности штока.

Периодические геометрические компоненты поверхности могут быть описаны методом фрактального анализа [19]. Естественные поверхности можно моделировать с помощью фракталов, потому что фракталы должным образом учитывают масштабную инвариантность и самоподобие этих поверхностей. Фрактальная размерность (D), является свойством, используемым для описания шероховатости фрактальных поверхностей [7].

Изотропную поверхность штока, полученную механической обработкой (тонким шлифованием), можно охарактеризовать функцией

Мандельброта-Вейерштрасса с использованием фрактальных методов [153]. Согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 фрактальный размер – это показатель геометрической сложности фрактальной поверхности. Фрактальные размеры увеличиваются по мере увеличения сложности. Фрактальный размер больше или равен 2 и меньше 3 для исследуемой шероховатой поверхности. Из характеристик топографии поверхности можно получить информацию о формировании поверхности, износостойкость, уплотнение [139].

Трибологические испытания являются наиболее прямым и надежным методом. Контролируемой переменной является шероховатость поверхности штока гидроцилиндра, поскольку она считается важной переменной в процессах механической обработки и обработки поверхности, герметизации контактных соединений, где контроль шероховатости может занимать длительное время [106].

Чистота поверхности может быть измерена двумя способами: контактным и бесконтактным. К бесконтактным методам относятся, в частности, электронная микроскопия и фотограмметрия, и их можно считать неразрушающим методом оценки поверхностей с использованием цветных изображений [126]. Для бесконтактной фиксации шероховатости часто используют классические металлографические микроскопы [133]. В последние годы все большее распространение получают оптические измерительные системы. Они обеспечивают бесконтактные измерения с репрезентативным охватом площади и позволяют определять характеристики текстуры поверхности. При применении оптических методов для измерения топографии поверхности происходит сбор данных и их постобработка для оценки текстуры поверхности, в то время как общепринятый метод контактного щупа собирает только данные профиля линии [109].

Метод щупа по-прежнему наиболее часто применяется в промышленности и имеет преимущества простоты применения и полной стандартизации. Оптические измерения и постобработка данных еще не

стандартизированы. Тем не менее, ряд методов указан в ISO 25178-6 [121] как подходящие методы для оценки текстуры поверхности.

Оптический метод для измерения топографии поверхности имеет большой потенциал для измерения и автоматизации процессов благодаря простоте используемой оптической системы [123]. Методы, использующие фрактальную размерность как меру шероховатости [143] предполагают вычисление фрактальной размерности как меры текстуры и шероховатости изображения [138]. Актуальна задача разработки и применения новых подходов в оценке свойств поверхности путем использования теории фракталов и разработанного на ее основе фрактального анализа, а в качестве оценочного количественного параметра – фрактальной размерности D [7]. В результате проведенного анализа научных работ можно сделать вывод, что фрактальная размерность поверхности применима для определения эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей машин [73].

Для анализа текстуры поверхности штока применялся аппарат фрактальной геометрии, который используется для описания и сравнения объектов сложной формы.

В результате лабораторных исследований определялась фрактальная размерность текстуры шероховатой поверхности штока, полученной в ходе выполнения операции шлифования, при изготовлении штока.

3.3 Методика обработки результатов экспериментов

Предварительная обработка экспериментальных данных, вычисление эмпирических распределений и проверка гипотезы нормальности проводится методами математической статистики с использованием компьютерных программ. Полученные данные рассчитывались и обрабатывались на персональном компьютере с использованием программ Microsoft Excel, MathCad, графического редактора CorelDRAW и систем трехмерного проектирования КОМПАС-3D и AutoCAD [34].

3.4 Выводы по третьей главе

Программа и методика экспериментальных исследований определяется направлением теоретических исследований. В соответствии с поставленными задачами определены методики проведения экспериментальных исследований. Задачи экспериментальных исследований решаются на основе разработанных и стандартных методик, основывающихся на элементах действующих стандартов определению параметров железорудной пыли и метод ускоренных ресурсных испытаний согласно ГОСТ 23.205-79 Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима, предназначенные для ориентировочной оценки ресурса пары трения «шток–уплотнение» с имитацией эксплуатационных условий при форсированном режиме [34].

Разработана программа и методика экспериментальных исследований и создан трибологический стенд для ускоренных исследований процесса изнашивания пары трения шток-уплотнения при запыленности абразивной железорудной пылью.

В работе применен бесконтактный оптический метод измерения топографии поверхности штока при его изнашивании в абразивной мелкодисперсной пылевоздушной среде. Подобрана используемая при проведении эксперимента контрольно-измерительная аппаратура.

ГЛАВА 4 АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ПАРЫ ТРЕНИЯ ШТОК-УПЛОТНЕНИЕ ГИДРОЦИЛИНДРА

4.1 Анализ функционирования силовых гидроцилиндров экскаватора в условиях запыленности ЖРП

4.1.1 Анализ конструктивных особенностей силовых гидроцилиндров экскаватора

Мировая тенденция показывает, что на горнодобывающих предприятиях более активно развивается применение мощных гидравлических экскаваторов – прямых и обратных лопат [72]. Гидравлический экскаватор с оборудованием обеспечивает себе нужные углы наклона съезда для перехода на другие рабочие горизонты [47]. Гусеничный экскаватор Komatsu PC1250 относится к тяжелому классу специальной техники [26]. Он характеризуется высокой производительностью и эффективностью, используется для производства работ в горной, нефтегазовой, дорожно-строительной и других отраслях.

Силовые гидравлические цилиндры гидроманипулятора (Рис. 4.1), отличаются своим назначением:

- гидроцилиндр подъема стрелы экскаватора предназначен для грубых манипуляций с ковшом;
- гидроцилиндр рукояти экскаватора предназначен для управления манипуляциями рукояти относительно стрелы по высоте (выполнение действий с ковшом);
- гидроцилиндр ковша экскаватора предназначен для позиционирования положения ковша, шарнирно закрепленного на конце рукояти, при захвате грунта, удерживания его в ковше и разгрузки ковша.

По своим функциональным признакам гидравлический цилиндр является объемным гидравлическим двигателем с преобразованием энергии потока гидравлической жидкости в механическую энергию с возвратно-поступательным движением штока.

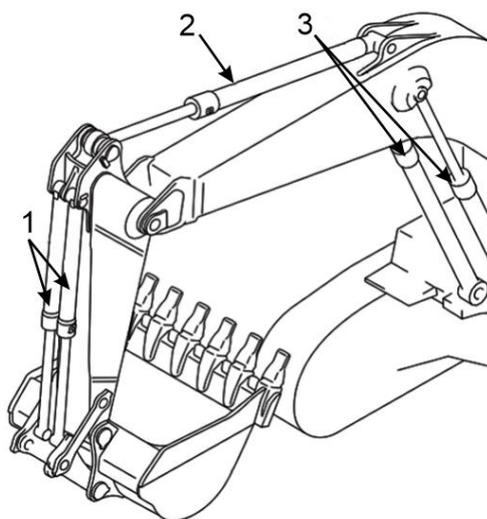


Рисунок 4.1 – Расположение силовых гидроцилиндров на гидроманипуляторе экскаватора KOMATSU PC1250-7: 1– гидроцилиндры ковша; 2 – гидроцилиндр рукояти; 3 – гидроцилиндры стрелы

Для унифицированной конструкции гидроцилиндров на $P_{ном} = 10, 16, 25$ и 32 МПа отраслевым стандартом ОСТ 22-1417–79 предусмотрен следующий ряд наружных диаметров штоков гидроцилиндров: [68] d (при $j = 1,6/2$) = 10, 13, 15, 18/25, 22/32, 28/40, 36/50, 45/63, 50/70, 56/80, 63/90, 70/100, 80/110, 90/125, 100/140, 110/160 мм.

Параметры гидроцилиндров экскаватора обратная лопата PC-1250-7 представлены в таблице 4.1 [29].

Таблица 4.1 – Параметры гидроцилиндров экскаватора обратная лопата PC-1250-7

Гидроцилиндр	Диаметр штока, мм	Средний рабочий ход, м	Площадь открытой поверхности штока, м ²
Стрела	160	2390	1,201
Рукоять	170	2435	1,300
Ковш	110	1825	0,631

На рисунке 4.2 показана схема гидроцилиндра двустороннего действия с односторонним штоком с установкой грязесъемника и уплотнения на штоке гидроцилиндра.

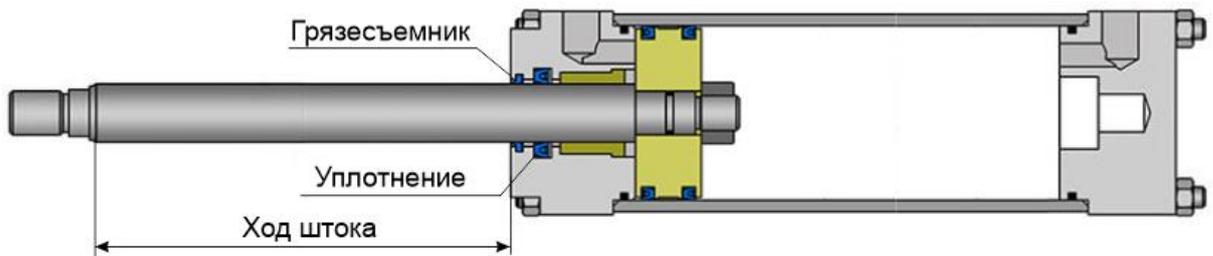


Рисунок 4.2 – Схема гидроцилиндра двустороннего действия с односторонним штоком

1. Анализ рабочего хода штоков гидроцилиндров экскаватора выполнен в результате обработки видеogramм при функционировании гидроманипулятора экскаватора [65]. На рисунке 4.3 показаны примеры минимального среднего вылета штока гидроцилиндров [104].



а) б) в)
Рисунок 4.3 – Минимальный средний вылет штока гидроцилиндров ковша (а), рукояти (б) и стрелы (в)

На рисунке 4.4 показаны примеры максимального среднего вылета штока гидроцилиндров экскаватора.



а) б) в)
Рисунок 4.4 – Максимальный средний вылет штока гидроцилиндров ковша (а), рукояти (б) и стрелы (в)

В таблице 4.2 приведены данные анализа фактического среднего рабочего хода штока и фактической средней площади открытой поверхности штока, на которую оседает мелкодисперсная железорудная пыль при каждом рабочем цикле.

Таблица 4.2 – Гидроцилиндры экскаватора обратная лопата РС-1250-7 [26]

Гидроцилиндры экскаватора	Ход поршня, мм	Фактический средний рабочий ход, м	Площадь открытой поверхности штока, м ²	Количество оседающей пыли за рабочий ход, г
Стрела	2390	1500	0,754	0,330
Рукоять	2435	1900	1,015	0,445
Ковш	1825	1450	0,501	0,219

Эксплуатация карьерных гидравлических экскаваторов в жестких климатических условиях отрицательно сказываются на эксплуатационной надежности, обусловленной выходом из строя быстроизнашивающихся компонентов гидропривода, среди которых одним из наиболее интенсивно изнашивающихся и дорогостоящих элементов являются штоки гидроцилиндров [8].

В процессе эксплуатации силовых гидроцилиндров в условиях жаркого сухого климата при высокой запыленности рабочей зоны карьерного экскаватора во время погрузки железной руды в самосвалы происходит интенсивное изнашивание уплотнений штока, нарушается герметичность гидроцилиндра.

Грязезащита узла трения важна в условиях повышенного загрязнения штоков гидроцилиндров.

Грязесъемные уплотнения штока (таблица 4.3):

- блокируют попадание внешних загрязнений в цилиндр и соответственно в гидравлическую систему;
- собирают смазочную пленку на штоке и пыль, когда шток втягивается в цилиндр.

Штоковые уплотнения: (таблица 4.3):

- являются барьером для внутреннего давления и удерживают гидравлическую жидкость внутри цилиндра;
- регулируют пленку гидравлической жидкости, которая образуется на поверхности штока (для предотвращения коррозии штока, смазывания грязесъемника и смазывания самого уплотнения)
- собирают смазочную пленку и пыль в ходе втягивания штока внутрь гидроцилиндра.

Таблица 4.3 – Наиболее часто применяемые грязесъемники и уплотнения штоков гидроцилиндров [88]

Тип	Описание	Допускаемые условия функционирования			Материал
		Давление [МПа]	Скорость [м/с]	Температура [°C]	
SA 	Грязесъемник с внешней кромкой	-	0.8	-45...+100	TPU
SAF 	Грязесъемник	-	0.8	-45...+100	TPU
SD 	Полукомпактное уплотнение штока с дополнительной уплотнительной кромкой	40	0.5	-45...+100	TPU
A 	Уплотнение штока с асимметричным профилем	40	0.5	-45...+100	TPU

Параметры уплотнений штока приведены в Приложении В.

Уплотнительные узлы штоков гидроцилиндров активно затягивают внутрь гидроцилиндра частицы мелкодисперсной железорудной пыли, оседающей на поверхности штока при каждом цикле (двойном ходе), что не только ускоряет изнашивание уплотнений, но и ведет к загрязнению гидравлической жидкости, засоряются клапаны и гидрораспределители гидросистемы (рис. 4.5) [20].

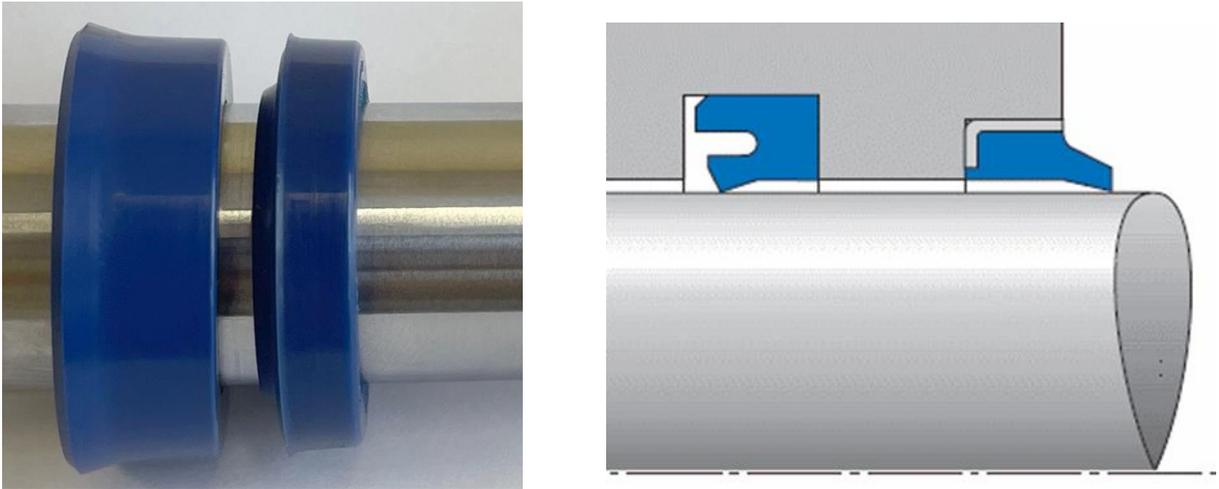


Рисунок 4.5 – Установка грязесъемника и уплотнения на штоке

Заштыбовывание зазора пылевыми частицами приводит к опоре штока на пылевые частицы, вдавливанию их в поверхность уплотнения и царапанию рабочей поверхности штока. При недостаточном усилии масляная пленка между уплотняющей кромкой и поверхностью штока увеличивается, что приводит к утечкам рабочей жидкости. Чрезмерное прижимное усилие, возникающее при высоком давлении и загрязнением мелкодисперсной пылью, становится причиной разрыва масляной пленки между уплотняющей кромкой и поверхностью штока. Недостаток смазки приводит к граничному трению в ходовой паре, что ведет к нагреву контакта и сокращению срока службы уплотнения [93].

Техническое обслуживание силовых гидроцилиндров заключается в своевременной замене уплотнений при появлении утечек рабочей жидкости по штоку. В рамках регулярного диагностирования состояния ходовой пары необходимо найти и устранить причины ускоренного изнашивания уплотнений: загрязнение поверхности штока; загрязнение гидравлической жидкости; появление следов коррозии, наличие царапин, зазубрин и задиров на поверхности штока.

Функциональность эластичных уплотнений определяется герметизирующей способностью при конкретных условиях эксплуатации, которая зависит от радиального усилия прижатия уплотнения к штоку.

Усилие определяется фрикционными и прочностными свойствами эластомера, его конструктивными особенностями, температурным режимом и условиями процесса трения. Интенсивное изнашивание материала уплотнения приводит к уменьшению радиального усилия и разгерметизации контакта (4.1)

$$p_0 = \Delta p_{\text{и}} + \Delta p_{\text{ст}}, \quad (4.1)$$

где p_0 – первоначальное контактное давление; $\Delta p_{\text{и}}$ и $\Delta p_{\text{ст}}$ – уменьшение давления вследствие изнашивания и старения уплотнений [41].

В условиях солнечной радиации и повышенной температуры воздуха уплотнения штока начинают терять свою эластичность и форму. Широко распространенные полиуретановые уплотнения теряют свою функциональность при температуре выше 50 °С.

4.1.2 Анализ процесса изнашивания ходовой пары шток-уплотнение в абразивной прослойке

Анализ показателей надежности, статистики и характера отказов силовых гидроцилиндров одноковшовых экскаваторов показал, что в более чем 70% случаев гидроцилиндры выходят из строя по причине изнашивания уплотнений. Существенное влияние на интенсивность изнашивания уплотнителей оказывает температурный режим уплотнительного узла и запыленность рабочей зоны [27-28].

В условиях рудника Бухадра (Boukhadra) при повышенной запыленности рабочей зоны и жестких температурных режимах железорудная пыль оседает на замасленной поверхности штока гидроцилиндра. При движении штока, покрытого слоем пыли, происходит нарушение герметичности уплотнений. Абразивные частицы пыли на поверхности штока приводят к задирам, рискам и нарушению герметичности [64].

Исследования [82] показали, что абразивные частицы, контактируя с поверхностным слоем, создают в нем широкий спектр контактных

напряжений, характер распределения которых и верхний предел численных значений зависят от свойств изнашивающегося материала, а также от твердости, формы, размера частиц и условий их воздействия на поверхность штока. Абразивные частицы, подобно неровностям шероховатых поверхностей, участвуют в трении и передаче на грузки от уплотнения к штоку, создавая нестационарную систему единичных фрикционных контактов.

Тененбаум М. М. [82] отмечает высокую степень концентрации контактных напряжений, вызываемых абразивными частицами в поверхностном слое, сильно выраженную дискретность и взаимную независимость фрикционных контактов в паре трения.

При многоцикловом деформировании поверхностного слоя абразивными частицами происходит полидеформационное и усталостное разрушения в пластической и упругой областях, что соответствует количественной теории изнашивания твердых тел с учетом усталостной природы поверхностного разрушения по Крагельскому И.В. или фрикционной усталости [42].

Изнашивание материала в результате трения об абразивную прослойку происходит в результате:

- царапания поверхности штока абразивными частицами, шаржированными в эластичную поверхность уплотнений;
- обкатывания абразивных частиц (вызывающих пластические деформации в виде выдавленных борозд) между поверхностями.

При взаимодействии абразивных частиц с твердой хромированной поверхностью штока изнашивание происходит в результате разрушения химических пленок поверхностного слоя [61].

Способность абразивных частиц железорудной пыли внедряться в поверхностный слой движущегося штока и разрушать его может быть оценена соотношением значений микротвердости поверхностного слоя штока H и абразивных частиц H_a (4.2)

$$k_T = H/H_a. \quad (4.2)$$

Опытным путем установлено критическое значение коэффициента $k_T = 0,5-0,7$ [81]. При $k_T < 0,5$ возможно прямое разрушение материала (при соответствующей форме частиц и достаточной нормальной нагрузке); при $k_T > 0,7$ прямое разрушение поверхности маловероятно, и процесс изнашивания переходит в многоцикловой с резко снижающейся интенсивностью по мере увеличения коэффициента k_T [82].

Из абразивных частиц железорудной пыли наибольшее изнашивающее действие оказывают частицы кварца, имеющие высокую твердость HRC 60. При значении твердости хромового покрытия поверхности штока HRC 66-69 значение коэффициента $k_T > 0,7$ и прямое разрушение поверхностного слоя штока становится менее вероятным. Одновременно возрастает доля многоциклового процесса при возвратно-поступательном движении штока, который при больших значениях k_T становится ведущим процессом [82].

При рабочем ходе штока уплотнения из эластичного материала скользят по поверхности штока. Шероховатая поверхность штока после операции шлифования ($Ra < 0,20$ мкм), а также наличие слоя абразивной железорудной пыли приводит к увеличению силы трения в ходовой паре шток-уплотнение.

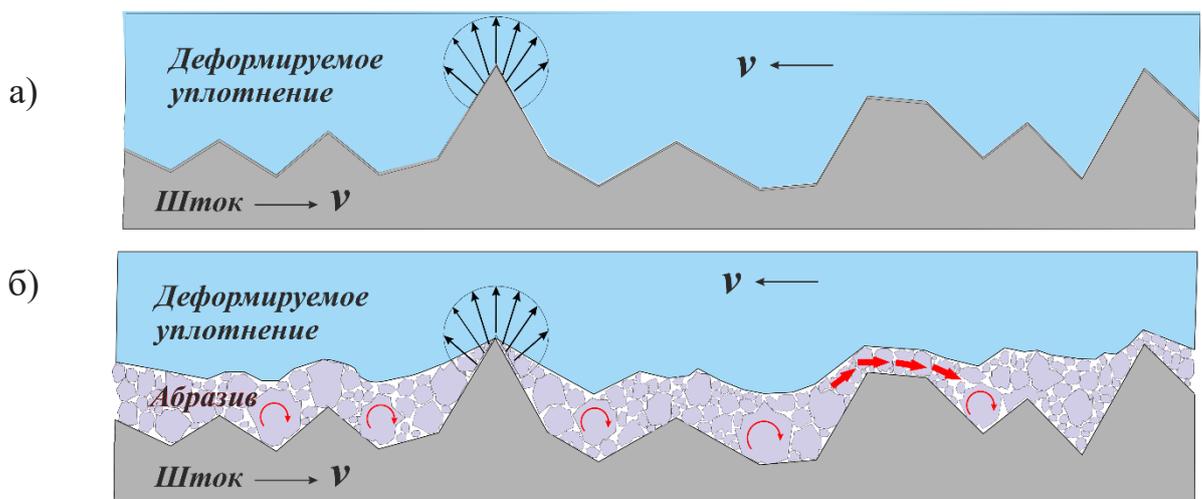


Рисунок 4.6. – Схема изнашивания штока и уплотнений без абразива (а) и с абразивной пылью в зазоре (б)

На рис. 4.6, *a* показана схема контакта эластичного деформируемого уплотнения с шероховатой поверхностью штока между которыми находятся твердые абразивные частицы железорудной пыли.

Изнашивание незакрепленными абразивными частицами наступает при динамическом контактировании эластичного уплотнения и поверхности штока при наличии их в зазоре (рис. 4.6, *б*). В создаваемой абразивной прослойке твердые частицы железорудной пыли могут также скользить, перекачиваться и ударяться своими гранями о металлическую поверхность штока и поверхность уплотнения, производя на них углубления и царапины.

Свободные абразивные частицы имеют произвольную ориентацию и могут изменять ее под действием сил трения в зоне контакта шток-уплотнение. Полузакрепленные абразивные частицы производят микрорезание как на поверхности уплотнения, так и штока гидроцилиндра.

При попадании в зазор между штоком и уплотнением твердые абразивные частицы внедряются в эластичную поверхность уплотнения. При возвратно-поступательном движении штока относительно уплотнения частицы пыли удерживаются за счет упругого внедрения в поверхность, и движутся вместе с уплотнением, производя абразивное изнашивание поверхности штока. При шаржировании поверхностного слоя одной детали больше изнашивается, как известно, материал с более высокой твердостью [82].

Преобладание того или иного механизма изнашивания материала при прочих равных условиях зависит от степени фиксации абразивных частиц в эластомере. Абразивные частицы могут находиться в трех состояниях: неподвижном, свободном и полунеподвижном [48].

При такой схеме частицы ЖРП присутствуют в виде абразивной прослойки, препятствующей полному сближению контактирующих поверхностей и коэффициент соотношения твердости материала и абразива k_T , в условиях контактно-абразивного, изнашивания становится менее определенным. Абразивные частицы при контактно-абразивного

изнашивании могут оказаться в состоянии всестороннего сжатия (после достаточно большой упругой деформации уплотнения), и в этих, условиях твердые абразивные частицы способны вызвать пластическую деформацию сталей высокой твердости [82].

Анализ поверхностей изношенных уплотнений позволяет предположить, что преобладающим типом износа на кромке и прилегающей зоне является микрорезание - наиболее опасный вид абразивного изнашивания рыхлыми частицами, сопровождающийся образованием на поверхности трения канавок, ориентированных по скорости скольжения. вектор. Зависимость скорости линейного изнашивания полиуретана от исходного размера абразивных частиц связана с глубиной проникновения частиц в эластомер и проникновением их в зазор между уплотнением и штоком гидроцилиндра [10].

В результате анализа процесса изнашивания можно выделить ряд факторов, влияющих на изнашивающую способность железорудной пыли в зазоре между штоком и уплотнением:

- размеры и форма абразивных частиц ЖРП;
- твердость частиц и плотность пылевого слоя;
- степень закрепления абразивных частиц пыли в поверхности эластомера;
- соотношение поверхностной твердости материала штока и абразива k_T ;
- скорость движения абразивных частиц в зазоре между штоком и уплотнением (перекатывание);
- давление со стороны уплотнения на абразивный слой в зазоре между штоком и уплотнением.

Попавшие в зазоры пар трения абразивные частицы участвуют в восприятии приложенной нагрузки и могут впрессовываться в поверхность трения, раздавливаясь на более мелкие фракции, скользить или

перекатываться вдоль поверхности изнашивания, упруго и пластически деформируя её.

Таким образом, в зоне контакта деталей с абразивными частицами происходят смешанные процессы разрушения поверхности трения, поскольку способность материалов сопротивляться износу зависит от многих факторов, основными из которых являются: физико-механические свойства материала (твёрдость, пластичность, прочность на разрыв и др.) свойства абразивных частиц (гранулометрический состав, геометрическая форма и размеры, угол заточки кромок, ориентация частиц); состояние абразивных частиц, определяемое степенью их фиксации; повышенная температура в зоне контакта.

4.2 Результаты лабораторных исследований процесса изнашивания в ходовой паре шток-уплотнение

Текстуру поверхности штока можно определить как повторяющиеся или случайные отклонения от номинальной поверхности, которые в действительности формируют трехмерную (3D) топографию. В работе путем сравнения и анализа экспериментально измеренных параметров трехмерной текстуры поверхности штока и высотных параметров шероховатости поверхности устанавливается практическая корреляция между микрогеометрическими характеристиками поверхности и параметрами с функциональными характеристиками поверхности штока [141].

Самоподобие основано на равномасштабном преобразовании во всех направлениях, т.е. полномасштабной инвариантности, однако для многих объектов для получения сходства необходимо применять неодинаковое масштабное увеличение в разных направлениях. Такие объекты называются самоаффинными. Примером самоаффинного фрактального объекта является, среди прочего, профиль шероховатости поверхности, обработанной шлифованием [97].

При эксплуатации гидроцилиндра в нормальных условиях происходит постепенное изнашивание уплотнений и поверхности штока с ростом числа циклов (двойных ходов). Изменение шероховатости поверхности штока при изнашивании в нормальных условиях в диапазоне $Ra = 0,139-0,128$ мкм показано на рис. 4.7, (кривая 1), в диапазоне $Ra = 0,139-0,102$ мкм при изнашивании с пылью — на рис. 4.7 (кривая 2).

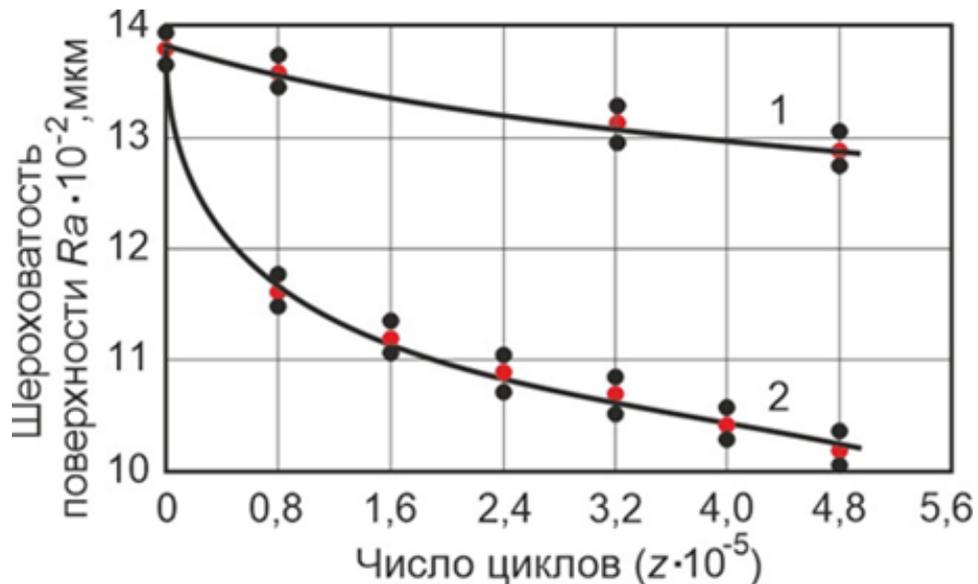


Рисунок 4.7 – Изменение шероховатости поверхности штока (а) в зависимости от числа циклов z в нормальных условиях (1) и в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью (2)

В ходе процесса изнашивания поверхности штока происходит изменение фрактальной размерности поверхности.

На рис. 4.8. (кривая 1) показано изменение значения фрактальной размерности поверхности штока в диапазоне $D = 2,708-2,637$ с ростом числа циклов при функционировании гидроцилиндра в нормальных условиях.

При функционировании в условиях запыленности на начальной стадии изнашивания штока значение фрактальной размерности увеличивается до $D=2,747$ при $z=80$ тыс. циклов, затем уменьшается до минимального значения $D=2,666$ при $z=320$ тыс. циклов и снова возрастает до значения $D=2,679$ при $z=480$ тыс. циклов (рисунок 4.8 кривая 2).

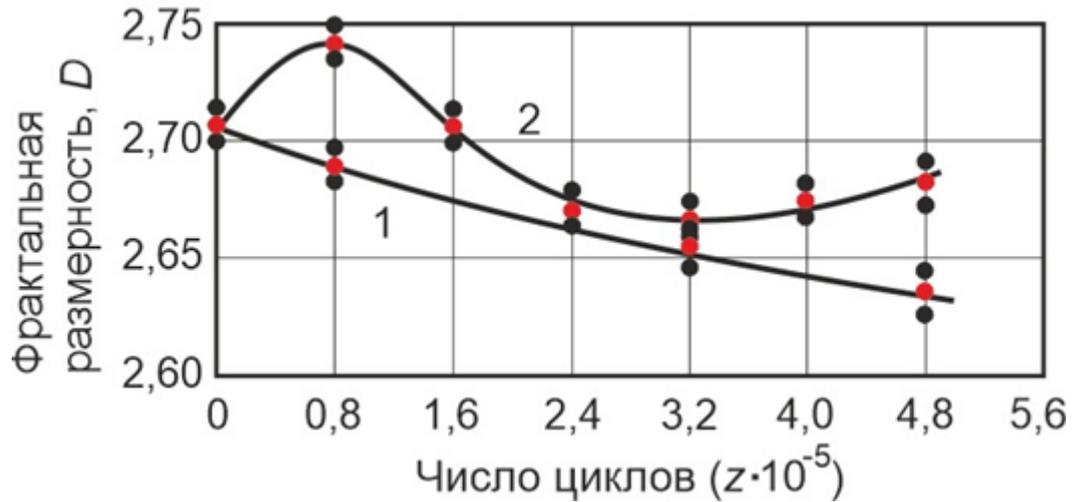


Рисунок 4.8 – Значения фрактальной размерности (б) в зависимости от числа циклов z в нормальных условиях (1) и в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью (2)

Это приводит к возникновению критической точки, что связано с критическими характеристиками рельефа поверхности. Минимум фрактальной размерности поверхности штока отмечен при значении числа циклов гидроцилиндра $z = 240-320$ тыс. При функционировании гидроцилиндра в нормальных условиях можно отметить корреляцию изменения шероховатость поверхности штока и значения фрактальной размерности с ростом числа циклов. При функционировании гидроцилиндра в условиях запыленности рабочей зоны абразивной железорудной пылью отсутствует корреляция между шероховатость поверхности штока R_a и значением фрактальной размерности D с ростом числа циклов.

При функционировании гидроцилиндра в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью можно отметить корреляцию изменения среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q и значения фрактальной размерности D с ростом числа циклов (рис. 4.9).

Минимум среднеквадратичного значения высоты выступов поверхности штока S_q отмечен при значении числа циклов $z = 320$ тыс.

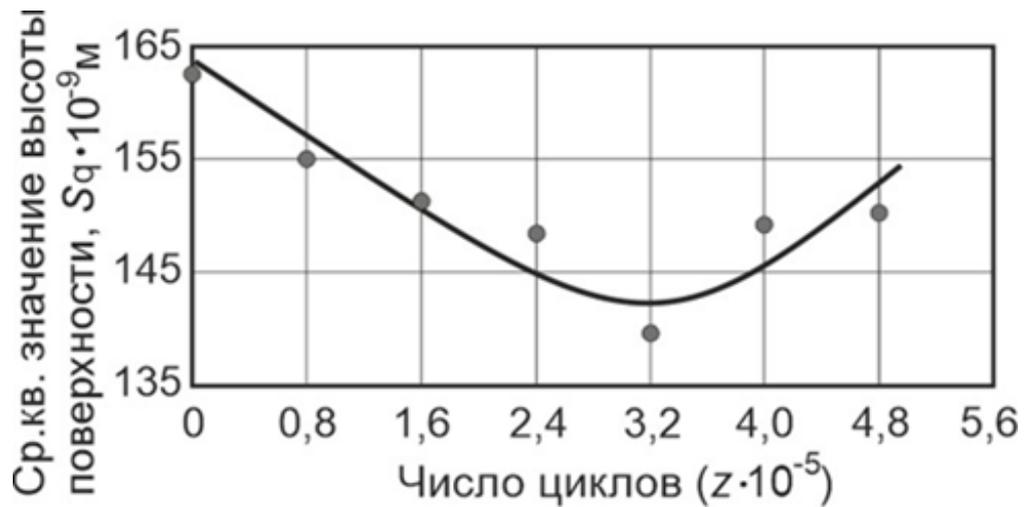


Рисунок 4.9 – Изменение среднеквадратичного значения высоты поверхности штока S_q (а) от числа циклов z

На рисунке 4.10 приведены схемы расположения интервалов допусков штока $\varnothing 20$ мм. В таблице 4.4 приведены размеры штока и уплотнений до и после изнашивания. В процессе изнашивания происходит уменьшение величины натяга между штоком и элементами уплотнений. Натяг между штоком и грязесъемником переходит в зазор 0,011 мм, способствующий прониканию пылевых частиц.

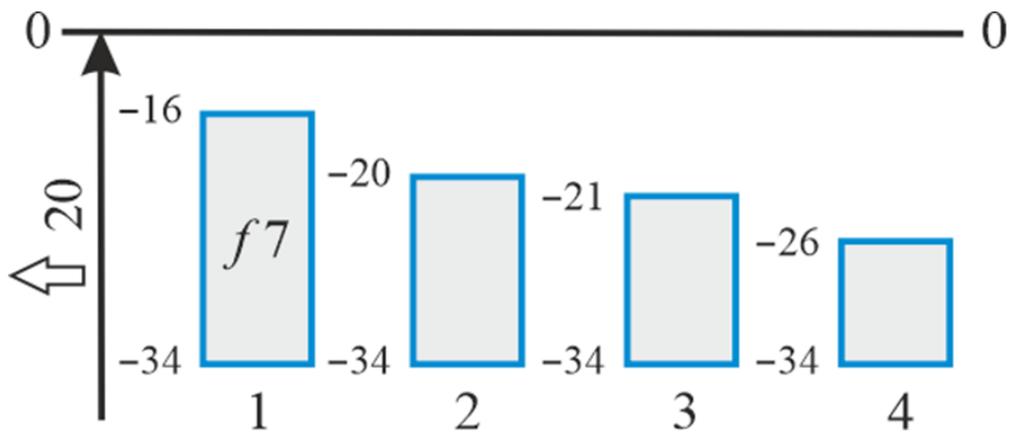


Рисунок 4.10 – Схемы расположения интервалов допусков штока $\varnothing 20$ мм с основным отклонением $f7$ и уменьшение основного отклонения штока в результате изнашивания: 1 – основное отклонение $f7$; 2 – отклонение нового штока; 3 – отклонение штока после изнашивания (без пыли); 4 – отклонение штока после изнашивания (с пылью)

Таблица 4.4 – Изменение размеров штока и элементов уплотнений в процессе изнашивания

Элемент	Исходный размер (натяг), мм	Размер после изнашивания, мм	
		без пыли	с пылью
Шток (диаметр)	19,980	19,979	19,974
Грязесъемник (внутренний диаметр)	19,780/0,20	19,865/0,114	19,985/-0,011
Уплотнение (внутренний диаметр)	19,360/0,62	19,441/0,538	19,785/0,189

На внешней поверхности штока гидроцилиндра можно увидеть утечку гидравлической жидкости вдоль штока, загрязненной железорудной пылью. На рисунке 4.11, а показана величина пропуска железорудной пыли через уплотнения штока с ростом количества циклов.



Рисунок 4.11 – Пропуск гидравлической жидкости вдоль штока, загрязненной железорудной пылью после изнашивания грязесъемника и уплотнения

По результатам инструментальных замеров величины пропуска железорудной пыли через уплотнения штока от числа циклов Z построен график (рисунок 4.12).

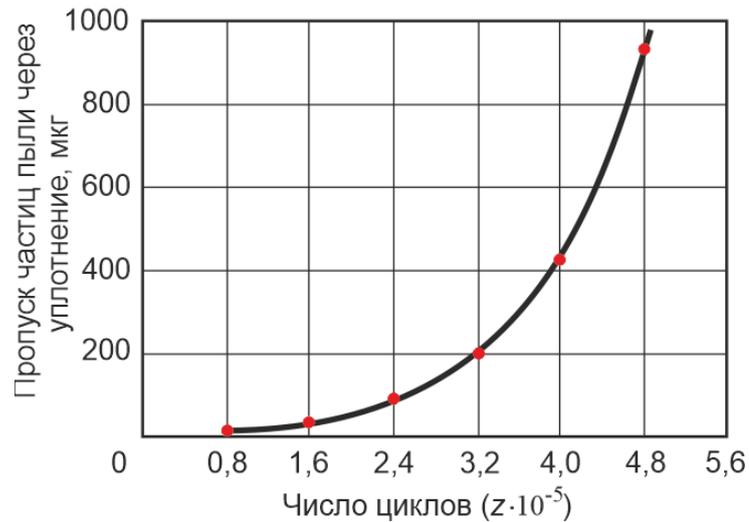


Рисунок 4.12 – Пропуск железорудной пыли через уплотнения штока от числа циклов Z

В результате изнашивания рабочих кромок уплотнения натяг постепенно уменьшается, пропуск частиц возрастает по экспоненциальному закону (4.3)

$$m_{\text{п}} = 4,73e^{0,91z} \quad R^2=0,989. \quad (4.3)$$

По результатам анализа взаимосвязи формы микронеровностей поверхностей и вида относительной опорной кривой поверхности можно сделать заключение об эксплуатационных характеристиках поверхности штока по виду опорной кривой профиля. Это позволяет использовать опорную кривую при исследовании и сравнении поверхностей штока на разных стадиях изнашивания.

В результате проведения лабораторных испытаний получены профили шероховатости поверхности штока, опорные кривые профилей (кривые Эббота-Файрстоуна) и 3D изображения шероховатости поверхности при изнашивании в нормальных условиях функционирования (без пыли) (рис. 4.13), и в условиях запыленности рабочей зоны (рис. 4.14).

Как видно на приведённых кривых Эббота-Файрстоуна, значения высоты поверхности R_a пересекаются глубиной S , что соответствует значению коэффициента шероховатости поверхности штока $R_{\text{мг}}$.

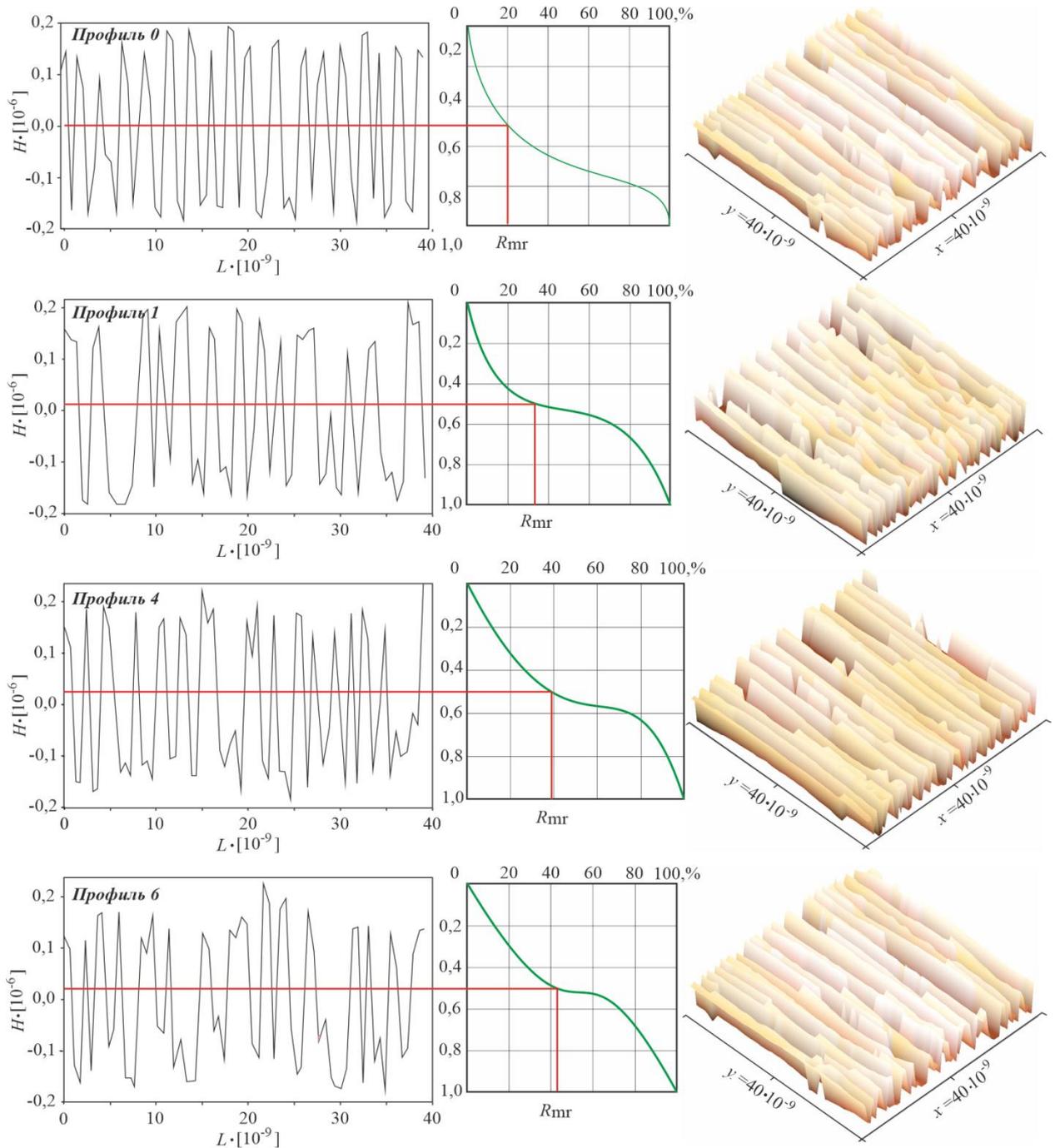


Рисунок 4.13 – Профили шероховатости поверхности штока, опорные кривые профилей и 3D изображения шероховатости при изнашивании в нормальных условиях функционирования (без пыли)

Рост величины коэффициента шероховатости поверхности штока R_{mr} от 20 до 55% свидетельствует об интенсивном абразивном изнашивании поверхности штока, а уплотнительные элементы штока при этом повреждаются за более короткий промежуток времени.

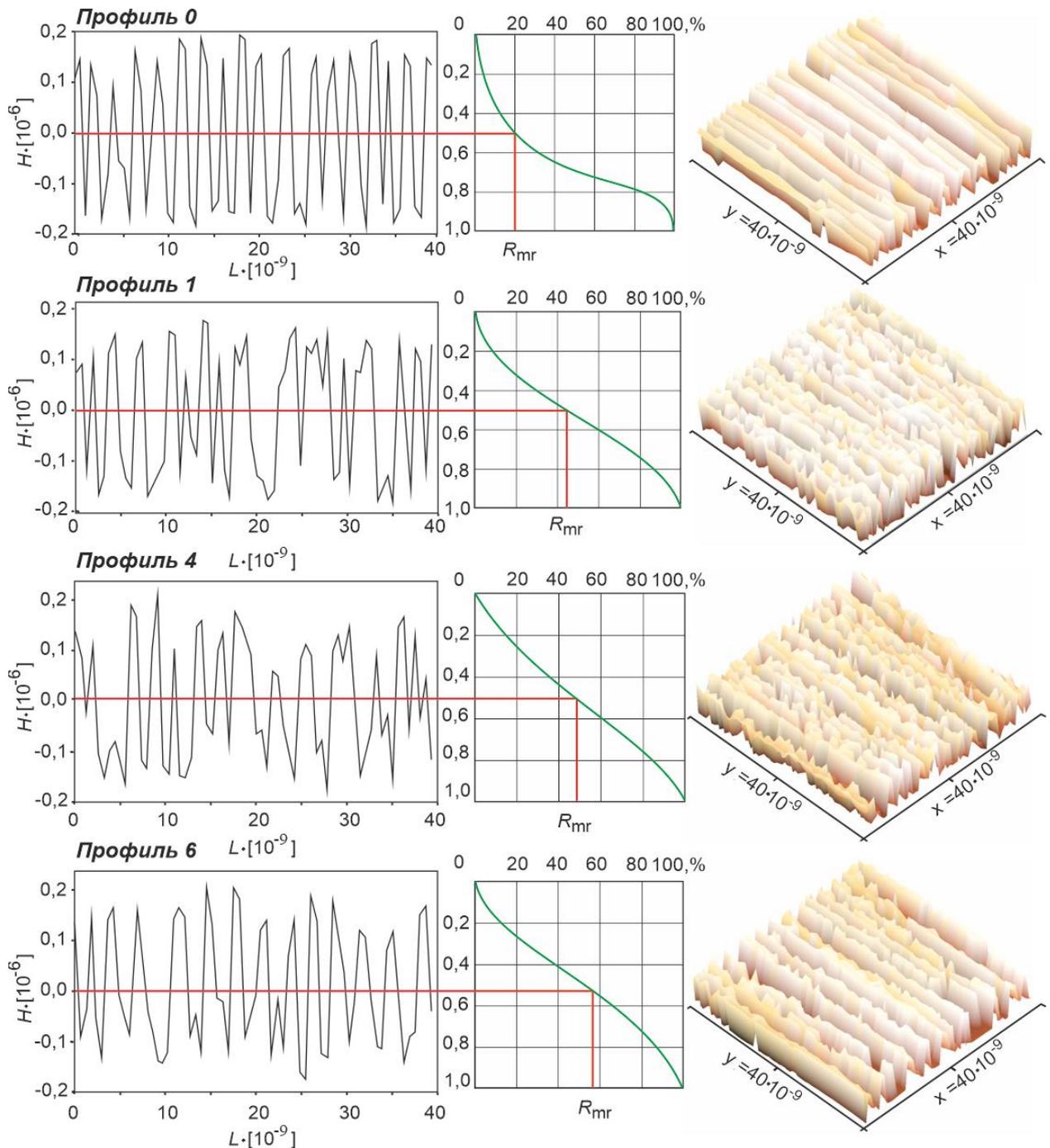


Рисунок 4.14 – Профили шероховатости поверхности штока, опорные кривые профилей и 3D изображения шероховатости при изнашивании в условиях запыленности рабочей зоны

Параметры шероховатости штока рассчитываются по результатам областей пиков, соответственно, сегментированных от поверхности с ограниченным масштабом:

- объем материала пиков поверхности V_{mp} ;

- объем материала ядра (основного материала) поверхности V_{mc} ;
- объем пустот впадин поверхности V_{vv} ;
- объем пустот ядра поверхности V_{vc} .

Кривая Эббота-Файрстоуна [128, 7] дает возможность более тонко описывать морфологию поверхности, в частности позволяет определять максимальную высоту и глубину исследуемого профиля; иллюстрирует область с уменьшенной высотой пиков. Данная зависимость отображает соотношение исследуемого материала в зависимости от высоты, т.е. соотношение материала – это процент поверхности над заданной высотой. Наклон в начале кривой представляет пики профиля, которые вызывают первоначальный износ уплотнения. Наклон в конце кривой представляет собой впадины на профиле, которые служат резервуарами для смазки.

Кривая соотношения материалов (кривая Эббота-Файрстоуна) предоставляет больше информации о характеристиках профиля поверхности. Она описывает отношение заполненной материалом длины к расчетной длине при заданной глубине шероховатости, выраженное в процентах (рис. 4.15). Наклон в начале кривой представляет пики профиля, которые вызывают первоначальное изнашивание уплотнений [130].

На рисунке 4.15 приведены профили шероховатости поверхности штока с параметрами объема пиков, пустот, материала ядра (основного материала) поверхности и пустот ядра поверхности материала при изнашивании в условиях запыленности рабочей зоны экскаватора абразивной железорудной пылью при погрузке железной руды.

При шлифовании поверхности штока абразивным кругом на ней остаются следы. Неровности поверхности имитируют эти следы. Вид опорной кривой поверхности после шлифования говорит о том, что неровности подвергнутся существенным деформациям при контакте с поверхностью уплотнений. Следует отметить наличие острых пиков на профилях шероховатости поверхности штока.

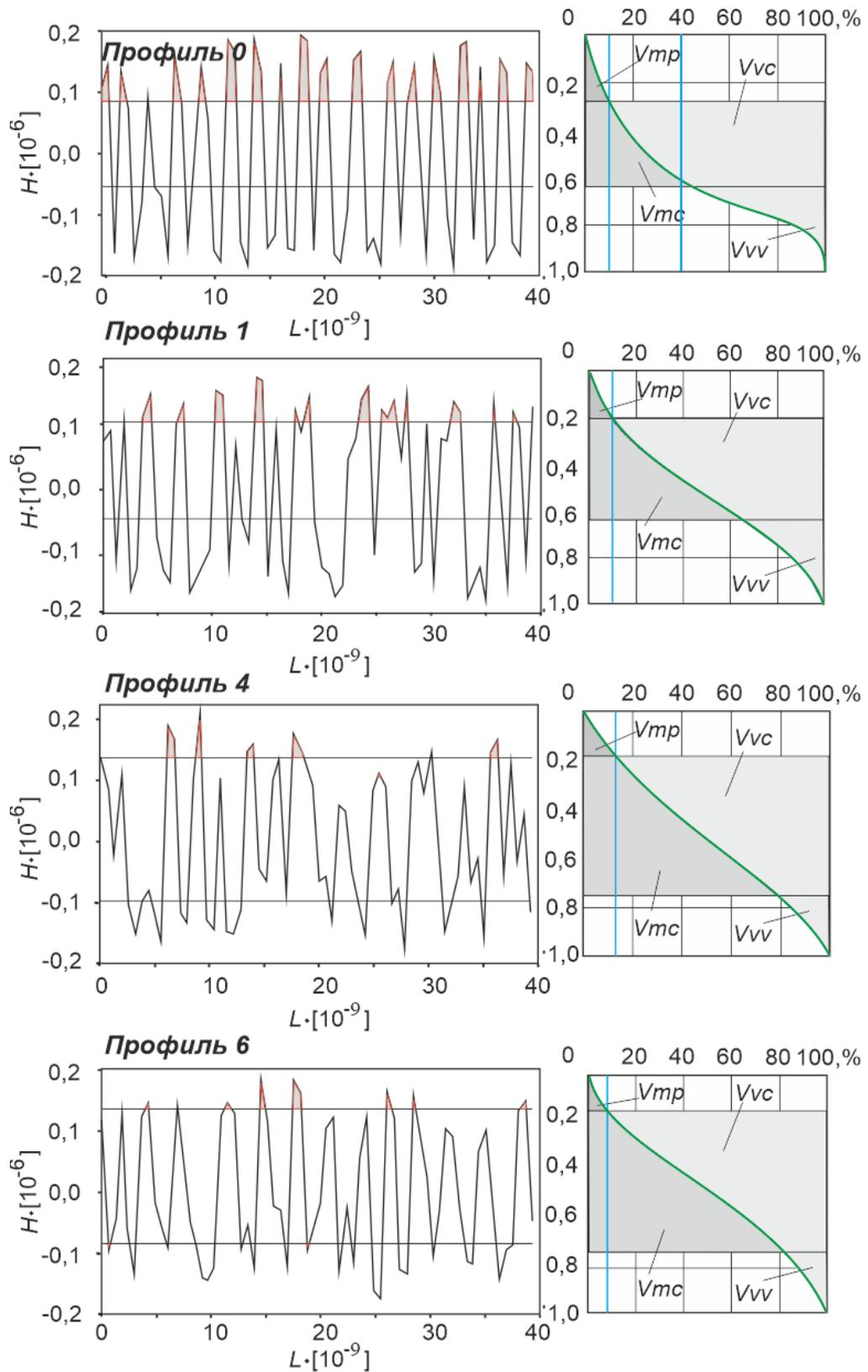


Рисунок 4.15 – Профили шероховатости поверхности штока с параметрами объема пиков, пустот, материала и пустот ядра (основного материала) при изнашивании с пылью (b)

На рисунке 4.16, а приведено сравнение опорных кривых профилей шероховатости поверхности штока при изнашивании штока в условиях запыленности рабочей зоны. Значение коэффициента шероховатости поверхности R_{mr} нового штока составляет 20%; в диапазоне 80-480 тыс. циклов колеблется в интервале между 43-55%. Рост коэффициента шероховатости как отношение площадей контактных поверхностей к площадям неконтактируемых на изнашиваемой длине штока свидетельствует о снижении шероховатости.

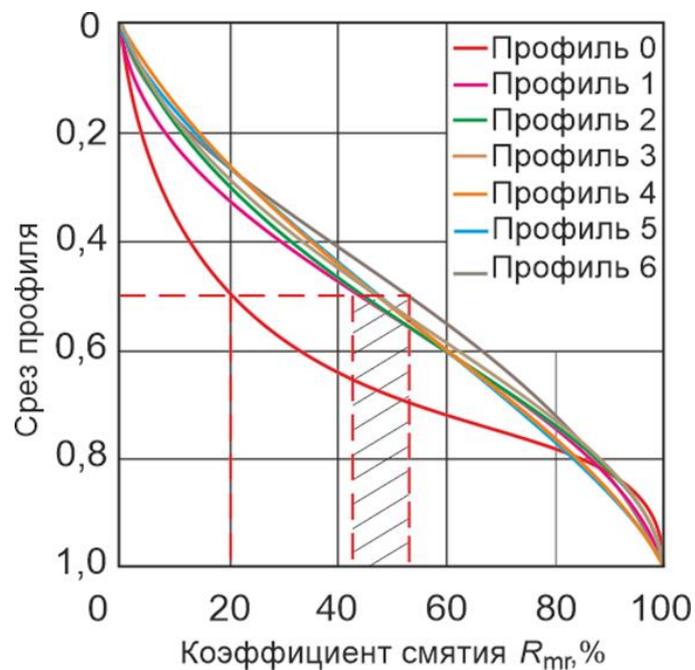


Рисунок 4.15 – Сравнение опорных кривых профилей шероховатости поверхности штока

Коэффициент смятия профиля (КСП) R_{mr} (материальный коэффициент профиля $R_{mr(c)}$) представляет собой отношение опорной длины элементов профиля на заданном уровне сечения с выше средней линии в микрометрах к базовой длине оценки профиля [80].

На рисунке 4.16 показано сравнительное изменение объема пиков материала V_{mp} (%) при изнашивании штока гидроцилиндра: 1 – без пыли; 2 – с пылью.

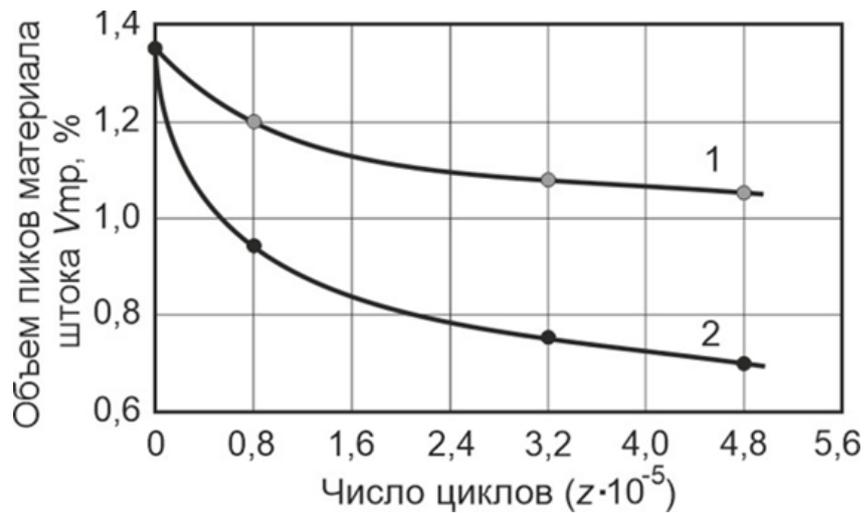


Рисунок 4.16 – Изменение объема пиков материала V_{mp} (b) при изнашивании штока: 1 – без пыли; 2 – с пылью

Как следует из графика на рисунке 4.16 пики шероховатости поверхности штока изнашиваются более интенсивно с присутствием абразивной железорудной пыли, что подтверждается инструментальными замерами изменения диаметра штока (таблица 2).

4.3 Рекомендации по корректировке регламента технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора

Увеличение объемов открытой добычи железной руды во многом зависит от эффективности функционирования одноковшовых карьерных гидравлических экскаваторов, на производительность которых негативно влияет ряд внешних факторов: жесткость климата и особенность горно-геологических условий, несовершенство системы технического обслуживания, принятой в компании [13].

Условия функционирования карьерного гидравлического экскаватора на погрузке железной руды в самосвалы с повышенным пылеобразованием отмечается интенсивным изнашиванием пары трения шток-уплотнение силовых гидроцилиндров, что приводит к значительным простоям, нарушающим непрерывный процесс добычи руды [103].

Своевременное проведение комплекса технических операций, направленных на поддержание работоспособности (исправности) объекта и

снижение вероятности его отказов является определяющим фактором поддержания эксплуатационной надежности горной машины.

Несистематизированные процедуры обслуживания приводят к сокращению эффективного жизненного цикла машин. Техническое обслуживание по состоянию, также называемое предиктивным техническим обслуживанием, – это стратегия, при которой работы по техническому обслуживанию выполняются, когда этого требует состояние оборудования. [105].

На рисунке 4.17 показано состояние гидроцилиндров экскаваторов при эксплуатации на руднике Бухадра (Boukhadra). Следует отметить утечки рабочей жидкости по штоку и налипание пыли на потеки рабочей жидкости.



Рисунок 4.17 – Состояние гидроцилиндров экскаваторов Komatsu PC1250-7 и Liebherr R9100 G6 на руднике Бухадра

Следует отметить недостаточный уровень технического обслуживания горного оборудования по причине низкой квалификации обслуживающего персонала, а также в связи с недостаточным техническим оснащением измерительными приборами [8].

К наиболее распространенным причинам появления неисправностей в гидроцилиндрах можно отнести:

- нарушение периодичности технического обслуживания элементов гидросистем;
- использование низкосортных гидравлических жидкостей в гидросистемах;
- наличие механических примесей в гидравлической жидкости, вследствие нарушения целостности уплотнительных элементов (грязесъемников, уплотнений) штока гидроцилиндра.

В ходе лабораторных исследований показано, что с ростом числа циклов (двойных ходов штока гидроцилиндра) в условиях воздействия мелкодисперсной абразивной пыли отмечается повышенное изнашивание в паре трения шток-уплотнение с утечкой рабочей жидкости. В диапазоне числа циклов 240–320 тыс. наблюдается увеличение пропуска частиц железорудной пыли через уплотнения штока и происходит загрязнение рабочей жидкости.

В работе [64] показано, что наиболее частой причиной выхода из строя уплотнительных элементов является воздействие механических включений. Масляная пленка на поверхности штока, предназначенная для смазывания уплотнений, накапливает в себе пылевые загрязнения. По мере втягивания штока в корпус гидроцилиндра, частицы мелкодисперсной пыли проникают в зазор между штоком и уплотнением. При возвратно-поступательном движении штока уплотнения постепенно изнашиваются, что приводит к протечкам гидравлической жидкости через зазор. Мелкодисперсные частицы пыли при попадании внутрь гидроцилиндра перемещаются с гидравлической жидкостью по всей гидравлической системе экскаватора. Это неизбежно влечет за собой: изнашивание золотников, клапанов, рабочей группы насосов и прочих элементов, засорение фильтров. Мелкодисперсные частицы пыли (средний размер 14 мкм) практически не задерживаются фильтрующими элементами гидросистемы экскаватора.

В работе [92] отмечается, что вероятность безотказной работы горных машин зависит от параметров жесткости климата и характера рельефа

местности. Учитывая жесткость климата и гористый рельеф рудника Бухадра, а также негативное воздействие абразивной мелкодисперсной железорудной пыли техническое обслуживание силовых гидроцилиндров карьерных экскаваторов должно выполняться с учетом этих негативных факторов.

Так, например, в Руководстве по эксплуатации карьерного гидравлического экскаватора Komatsu PC1250-7 предусмотрена периодичность технического обслуживания элементов гидросистемы.

Кроме этого, по наработке гидроцилиндром 240-320 тыс. циклов (двойных ходов) рекомендуется проведение предиктивного технического обслуживания с демонтажом гидроцилиндра и заменой его на резервный (трудоемкость 8 ч). Контроль технического состояния и замена уплотнений штока на снятом гидроцилиндре производится в стационарных условиях. Таким образом простой экскаватора будет минимальным так, как техническое обслуживание гидроцилиндра производится вне времени рабочего цикла экскаватора.

В целом работоспособность гидроцилиндра реализуется герметизирующей способностью его уплотнительных узлов [37], а надёжность, в части долговечности гидроцилиндра, определяется интенсивностью изнашивания его подвижных уплотнительных узлов и зависит от его ресурса по наружным утечкам гидравлической жидкости. Основной причиной возникновения наружных утечек гидравлической жидкости является изнашивание ходовой пары в силу малости их контактной поверхности при значительном пути трения по штоку.

Тяжелые условия эксплуатации карьерных экскаваторов, удаленность от ремонтных баз и режимы циклически изменяющейся нагрузки отрицательно сказываются на функциональности по причине снижения долговечности силовых элементов гидропривода. Диаметральный износ штоков по рабочей длине на 0,4 мм, т.е. износ гидроцилиндра гидропривода, имеющего наработку до первого капитального ремонта, вызывает падение давления в системе на 7,2% [64].

Производственный опыт эксплуатации горных машин, а также анализ статистических данных показали, что отказы гидроцилиндров составляют 40...50% отказов всей машины [80], что приводит к необходимости приобретения и иметь на складе значительное количество запасных частей для предотвращения простоев горнодобывающей техники.

Ускоренный износ элементов гидроцилиндров определяется, прежде всего: отсутствием надежной системы изоляции направляющих поверхностей от загрязнений; частые остановки и движения задним ходом; переменный характер трения на разных участках стержня по его длине [80].

Прогнозирование необходимой поддержки/запасных частей на основе технических характеристик и эксплуатационных условий экскаватора является способом предотвращения возникновения отказов и незапланированных остановок машины. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые элементы гидравлической системы, играют ключевую роль при эксплуатации экскаватора [116].

Выделение эшелонов технического обслуживания элементов гидросистемы карьерного гидравлического экскаватора по фактическому состоянию с учётом специфики введения открытых горных работ на руднике Boukhadra (Алжир) показано на рисунке 4.18.

В случае обнаружения предотказного состояния какого-либо элемента он заменяется из числа запасных. Считается, что нехватка запасных деталей хотя бы одного типа приводит к простоям машины, а также, что запасными деталями машина обеспечивается с момента начала ее эксплуатации.

Жесткие климатические условия влияют на вязкость гидравлической жидкости и эластичность уплотнений гидроцилиндров. На эти условия накладывается повышенная запыленность рабочей зоны экскаватора, является фактором абразивного внешнего воздействия [58].



Рисунок 4.18 – Схема разукрупнения элементов гидросистемы

Система ЗИП элементов гидравлической системы экскаватора включает в себя групповой комплект ЗИП-Г в рамках одноуровневой структуры использования для обеспечения эксплуатации согласно ГОСТ 27.507-2015 (технического обслуживания) показано на рисунке 4.19.

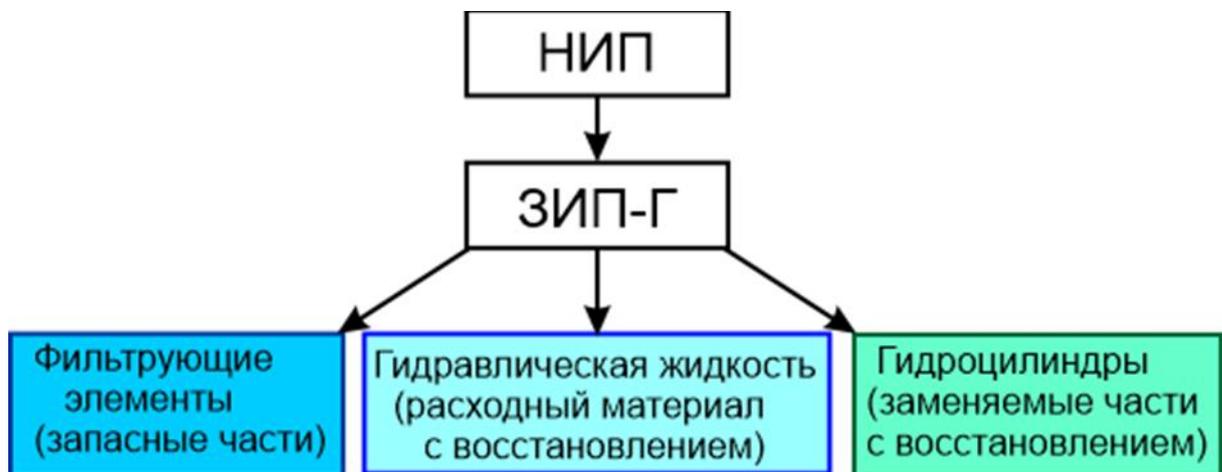


Рисунок 4.19 – Одноуровневая структура использования ЗИП-Г

К невосстанавливаемым элементам гидравлической системы, на функциональность которых оказывает влияние повышенная запыленность рабочей зоны экскаватора следует отнести:

- фильтрующий элемент линейного фильтра всасывания;
- фильтрующий элемент фильтра управляющего контура;

- фильтрующий элемент сливного фильтра;
- фильтрующий элемент фильтра возвратного контура;
- сетчатый фильтр гидравлического бака.

Через 500 мото·ч наработки они подлежат очистке, а в последующем замене на запасные.

К восстанавливаемым элементам гидравлической системы, на функциональность которых оказывает влияние повышенная запыленность рабочей зоны экскаватора следует отнести:

- гидравлическую жидкость;
- силовые гидроцилиндры манипулятора.

Через 2000 мото·ч наработки восстанавливаемые элементы гидравлической системы подлежат замене на запасные с восстановлением в стационарных условиях.

Гидравлическая жидкость сливается из гидросистемы в заранее подготовленные герметичные емкости; проводится промывка гидравлического бака экскаватора и бак заполняется гидравлической жидкостью из запаса.

Гидравлическая жидкость характеризуется определенной степенью вязкости, способностью поддерживать необходимый уровень давления, тепла, а также стойкостью к влиянию эрозии. Помимо этого, рабочая жидкость смазывает ключевые составляющие системы. Через 2000 мото·ч наработки гидравлическая жидкость в целом сохраняет свои эксплуатационные параметры (вязкость не снижена и присадки еще не выработаны). В стационарных условиях проводится механическая очистка гидравлической жидкости от взвешенных микрочастиц, и она поступает в запас для следующей очередной замены [5].

Через 2000 мото·ч наработки гидравлической системы силовые гидроцилиндры подлежат замене на запасные с восстановлением в стационарных условиях.

Анализируя стратегии эксплуатационного резервирования, в качестве основного рассмотрен гидроцилиндр рабочего органа экскаватора. Резервный (запасной) гидроцилиндр, являясь ненагруженным резервом в системе эксплуатационного резервирования, должен быть готовым к замене такого же гидроцилиндра на экскаваторе.

Стратегия замен гидроцилиндров экскаватора с быстрым возвратом экскаватора в работоспособное состояние объясняется наличием повышенной запыленности рабочей зоны экскаватора на глобальном и локальном фонах. В этих условиях разборка гидроцилиндров для контроля состояния, промывки и замены уплотнений не обеспечивает требуемой чистоты.

Реализация эффективной программы адаптивной стратегии профилактического обслуживания предполагает системный подход к ряду ключевых моментов:

- регулярные проверки на наличие утечек гидравлической жидкости, анализ жидкости и фильтров на наличие загрязнения;
- замена элементов гидравлической системы для предотвращения дальнейшего повреждения;
- обоснование соответствующего интервала профилактического обслуживания системы для поддержания надежного функционирования машины.

Большинство производителей оборудования рекомендуют интервалы технического обслуживания в период эксплуатации машин 250 ч, 500 ч, 1000 ч, 2000 ч, 4000 ч и 5000 ч соответственно. Существуют также рекомендованные производителем интервалы замены элементов гидросистемы экскаватора.

Полученное в экспериментах значение наработки в 240-300 тыс. циклов, что составляет около 2000 мото·ч, может определяться как критическая наработка для гидроцилиндров в условиях жесткого климата, гористой местности и повышенной запыленности, и может быть положено в

основу корректировки стратегии технического обслуживания элементов гидросистемы. Большинство мероприятий по техническому обслуживанию гидравлической системы требуют остановки машины, при этом затраты на техническое обслуживание элементов гидравлической системы могут быть минимизированы за счет замены критических элементов с определенным интервалом времени для каждого элемента [140].

Проведенные исследования выявили необходимость корректировки действующего регламента технического обслуживания в направлении изменения периодичности мероприятий ТО, спланированных для средних условий эксплуатации в соответствии с инструкцией по технической эксплуатации экскаватора.

Элементы гидросистемы экскаватора оказывается постоянно под высокой нагрузкой пыли. Существующие правила технического обслуживания, не в полной мере учитывают особенности природно-климатических факторов рудника Boukhadra.

В районах с жарким климатом и повышенной солнечной радиацией происходит снижение эксплуатационных свойств гидравлических жидкостей; повышаются интенсивность изнашивания в парах трения; увеличивается интенсивность постепенных отказов, повышается расход запасных частей и материалов. Происходит ускоренное старение уплотнений гидроцилиндров и создаются условия для появления утечек рабочей жидкости по штоку [91].

При возникновении циклических применений в условиях граничной смазки, характерной для соединений гидроцилиндра, и повышенной запыленности масляная пленка на поверхности штока быстро разрушается, что приводит к непосредственному контакту поверхностей деталей соединений. До 55% случаев выброс из строя гидроцилиндров происходит из-за изнашивания штоковых уплотнений [80].

На рисунках 4.20 и 4.21 приведены примеры несоблюдения периодичности технического обслуживания силовых гидроцилиндров, что приводит к негативным последствиям. Предельное изнашивание уплотнений

штоков силовых гидроцилиндров экскаватора приводит к изнашиванию штока при трении о крышку гидроцилиндра и как следствие к необходимости проведения ремонта штока.



Рисунок 4.20 – Предельное изнашивание уплотнений штоков силовых гидроцилиндров экскаватора приводит к изнашиванию штока при трении о крышку гидроцилиндра

Предельное изнашивание уплотнений штоков силовых гидроцилиндров экскаватора приводит не просто к утечкам, а к выбросам гидравлической жидкости на металлоконструкции стрелы, рукояти и ковша, которые покрываются железорудной пылью.

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.

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.

С аэрацией и вентиляцией гидробака связаны: увеличение притока и диффузия воздуха в рабочую жидкость. Это усиливает его растворимость в

гидравлической жидкости и, следовательно, ускоряет окисление жидкости, и засорение ее частицами железорудной пыли, находящимися в воздухе.

Наличие механических примесей в гидравлической жидкости приводит к абразивному изнашиванию, металлических и полимерных деталей гидрооборудования.



Рисунок 4.21 – Пример предельного изнашивания уплотнений штоков силовых гидроцилиндров экскаватора. Выбросы гидравлической жидкости на стреле, рукояти и ковше, покрытые железорудной пылью

Исследованиями установлено, что увеличение загрязненности гидравлической жидкости в четыре раза снижает долговечность гидрооборудования в два раза. Снижение эффективности фильтров очистки сокращает срок службы насосов в 10...12 раз [15].

Мероприятия по техническому обслуживанию должны разрабатываться и осуществляться с учетом эксплуатационной документации завода-изготовителя. Но нормативные документы, предусматривающие типовые правила технического обслуживания, не в полной мере учитывают особенности природно-климатических условий Алжира [91].

Периодичность корректировки проведения технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора по фактическому состоянию, можно оценить как (4.4) [75-76]

$$T_{\text{корр}} = T_{\text{н}} k_{\text{н}} k_{\text{п}}, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{н}}$ – нормативная периодичность технического обслуживания гидроцилиндров, ч; $k_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент снижения периодичности технического обслуживания; $k_{\text{п}}$ – коэффициент снижения периодичности технического обслуживания, учитывающий фактор запыленности рабочей зоны экскаватора.

Чем эффективнее используется оборудование, тем выше будет коэффициент технического использования. Важно правильно настроить функционирование элементов гидросистемы, следить за их техническим состоянием и проводить регулярное обслуживание, чтобы избежать простоев на ремонте.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания 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 (4.5) [21].

$$k_{\text{ти}} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_{\text{обс}} + t_{\text{рем}}}, \quad (4.5)$$

где $t_{\text{р}}$ – общее время работы экскаватора, ч; $t_{\text{обс}}$ – суммарное время на техническое обслуживание элементов гидросистемы за тот же период, ч; $t_{\text{рем}}$ –

суммарное время простоев из-за ремонта элементов гидросистемы за тот же период, ч.

Как следует из выражения (4.5), коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения экскаватора в работоспособном состоянии относительно общей продолжительности эксплуатации. Коэффициент технического использования отличается от коэффициента готовности (k_T) тем, что при его определении учитывается время на техническое обслуживание и простоев на ремонте, тогда как при определении k_T время, связанное с проведением технического обслуживания, не учитывается.

Правильный выбор стратегии ТО элементов гидросистемы гидравлических экскаваторов влияет на эффективность технического обслуживания в зависимости от условий эксплуатации.

Существуют следующие стратегии проведения мероприятий технического обслуживания гидравлических экскаваторов: [23]

- нулевая или базовая;
- групповая;
- индивидуальная.

Проведение ТО элементов гидросистемы гидравлических экскаваторов в условиях рудника Бухадра эффективнее оценивается по индивидуальной стратегии (по принципу соотношения экономических затрат и уровня технического использования).

Индивидуальная стратегия подразумевает замену конкретных деталей по их наработке и используется при наличии статистической базы элементов гидросистемы. Техническая готовность при индивидуальной стратегии имеет наибольшие значения за счет своевременной (превентивной) замены элемента гидросистемы, находящегося в предотказном состоянии, что снижает время на техническое обслуживание элементов гидросистемы и увеличивает значение коэффициента технического использования [23].

В таблице 4.5 показан сводный перечень предложений по корректировке регламента технического обслуживания элементов гидросистемы КГЭ при эксплуатации в условиях рудника Boukhadra с сокращением периодичности с коэффициентом 0,5 от норматива.

Существующие правила технического обслуживания, не в полной мере учитывают особенности природно-климатических факторов рудника Бухадра, в связи с чем использование машин производится недостаточно эффективно.

При проведении технического обслуживания силовых гидроцилиндров в условиях жаркого сухого климата и запыленности рабочей зоны карьерного экскаватора согласно нормам по эксплуатации и обслуживанию цилиндров рекомендуется:

- регулярный визуальный контроль цилиндров на утечки рабочей жидкости по штоку;
- регулярный визуальный (инструментальный) контроль целостность хромированной поверхности штока;
- ежесменная очистка поверхности штока от загрязнений (пыли) для исключения ее аккумуляции слоем более 5 мм.

Таблица 4.5 – Сокращение периодичности технического обслуживания элементов гидросистемы экскаватора с коэффициентом 0,5 [29]

- контроль движения штока гидроцилиндра (рывки при движении указывает на нарушение состояния трущихся поверхностей штока).

Среди основных факторов, характерными для эксплуатации карьерных гидравлических экскаваторов, следует отметить удаленность от внешних инфраструктур по ремонту гидравлических компонентов [81].

С учетом коэффициентов жесткости климата и рельефа местности в условиях рудника Бухадра, а также уровня технического обслуживания рекомендуемая корректировка регламента технического обслуживания гидроцилиндров экскаватора заключается в том, что:

- ТО-1 и ТО-2 проводится с уменьшенной периодичностью по сравнению с обычным регламентом;

- проводится замена гидроцилиндров экскаватора через 240-320 тыс. циклов на запасные.

Придерживаясь регламента комплексного превентивного технического обслуживания, включающего осмотры, замену жидкости, очистку и замену ряда элементов, можно выявить и устранить потенциальные проблемы на ранней стадии, и обеспечить эффективное функционирование гидросистемы экскаватора в условиях повышенной запыленности рабочей зоны на протяжении срока службы.

Таблица 4.5 – Сокращение периодичности технического обслуживания элементов гидросистемы КГЭ

Элемент 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

Защита трущихся деталей от абразивных частиц является наилучшим способом борьбы с контактно-абразивным изнашиванием, так как при этом исключается прямое воздействие на пару трения. Для защиты штока гидравлического цилиндра от воздействия абразивных частиц предложено провести его экранирование специальным чехлом из плотной ткани (4.22) [70].

Устройство устанавливается посредством магнитных свойств кольцевыми магнитами 4 между корпусом гидроцилиндра 1 и ухом штока

гидроцилиндра 5 с обеих сторон находящихся внутри упорных выступов 6 для центровки магнитных колец. Шток гидроцилиндра 2 во время работы двигается возвратно поступательно, а гофрированная труба 3 растягивается и возвращается в исходное положение, в зависимости от направления движения штока гидроцилиндра 2.

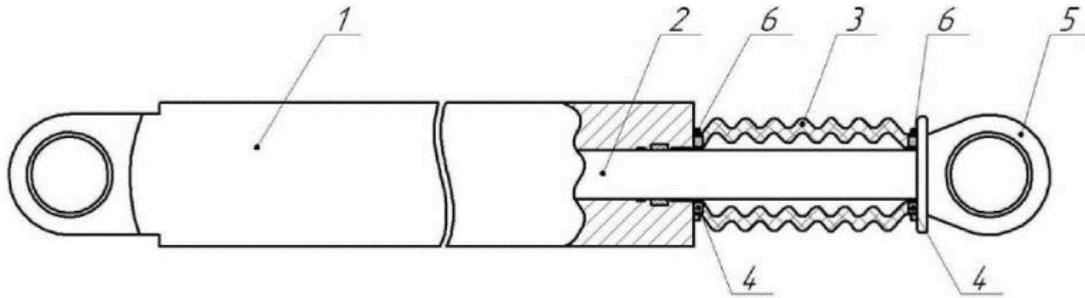


Рисунок 4.22 – Схема устройства: 1 - корпус гидроцилиндра; 2 - шток гидроцилиндра; 3 - гофрированная труба; 4 - кольцевые магниты; 5 - ухо штока гидроцилиндра; 6 - упорный выступ.

Устройство защиты штока гидроцилиндра экскаватора от запыленности за счет установки кольцевых магнитов и упорных выступов позволяет повысить сопротивление негативного воздействия запыленности воздушной среды на работоспособность гидроцилиндров экскаватора и снизить появление статического слоя пыли на поверхности штоков гидроцилиндров экскаваторов, который снижает изнашивание штоков гидроцилиндров и их уплотнения.

4.4 Выводы по четвертой главе

В результате проведенных исследований показан негативный характер влияния абразивной мелкодисперсной железорудной пыли с высокой концентрацией частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ на интенсивность изнашивания штока и уплотнений гидроцилиндра.

Экспериментально подтверждена возможность применения бесконтактного оптического метода измерения топографии поверхности штока при его изнашивании в абразивной мелкодисперсной пылевоздушной среде. Возможность программного построения опорной кривой и вычисления

на ее основе количественных параметров шероховатости делает данный метод диагностирования перспективным и подходящим для текущего обслуживания штоков гидроцилиндров.

По результатам исследования отмечено, что при значении числа циклов (двойных ходов) 240-320 тыс. наблюдается минимальное значения фрактальной размерности текстуры поверхности штока $D=2,66$ и минимум среднеквадратичного значения высоты поверхности штока Sq при постепенном снижении шероховатости поверхности штока Ra . Это значение числа циклов ($z=240-320$ тыс.) может использоваться при корректировке регламента технического обслуживания и ремонта гидроцилиндров экскаватора в качестве 90%-ного ресурса наработки на отказ.

Износ уплотнений способствует прониканию пылевых частиц внутрь гидроцилиндра и загрязнению рабочей жидкости. Рост массы пропуска железорудной пыли через уплотнения штока в зависимости от числа циклов z описывается экспоненциальной функцией. В период 240-320 тыс. циклов в гидросистему экскаватора попадает 100-200 мкг пыли.

Существующие правила технического обслуживания на объекте не в полной мере учитывают особенности природно-климатических факторов рудника Бухадра, в связи с чем использование машин производится недостаточно эффективно.

Обоснован временной предел адаптивной стратегии резервирования для обеспечения работоспособности гидравлической системы экскаватора с применением метода эксплуатационного резервирования основанного на использовании резервных гидроцилиндров, прошедших техническое обслуживание в цеховых условиях.

С учетом коэффициентов жесткости климата и рельефа местности при повышенной запыленности рабочей зоны абразивной мелкодисперсной пылью следует скорректировать регламент технического обслуживания гидроцилиндров с периодичностью их замены на резервные через 240–320

тыс. циклов (двойных ходов) по причине ускоренного изнашивания в паре трения шток-уплотнения.

Рекомендуется сокращение периодичности проведения технического обслуживания элементов гидросистемы с коэффициентом 0,5 от норматива замена рабочей жидкости; замена фильтра; очистка сапуна гидробака с заменой сетки.

Система ЗИП включает групповой комплект ЗИП-Г для обеспечения ТО элементов гидросистемы экскаватора: фильтрующие элементы (запасные части), гидравлическая жидкость (расходный материал восстанавливаемый), гидроцилиндры (заменяемые с восстановлением).

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 $Ra = 0,139-0,102$ 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдельвахаб Агагена, Михайлов А. В.** Влияние железорудной пыли на изнашивание поверхности штоков гидроцилиндров карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 5-23. DOI: 10.25018/02 36_1493_2023_111_0_5.
2. **Агагена, А. Михайлов А.В.** Особенности применения гидравлических экскаваторов в условиях рудника Boukhadra (Алжир). Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й междунар. научно-техн. Конфер / А. Агагена, А.В. Михайлов – Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. университет им. Г.И. Носова, 2020. Т.1. – С. 46.
3. **Агагена, А.** Запыленность рабочей зоны карьерного гидравлического экскаватора и изменение состояния сопряжения шток-уплотнение. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XXI междунар. научно-техн. конфер. «Чтения памяти В. Р. Кубачека», 06-07 апреля 2023 г. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 18–22.
4. **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.
5. **Агагена, А.** Особенности технического обслуживания карьерного гидравлического экскаватора в условиях рудника Бухадра / А. Агагена, К.С. Репкина // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XXII междунар. научно-технической конфер. «Чтения памяти В. Р. Кубачека» – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2024. – С. 381-384.
6. **Акулович, Л. М.** Особенности магнитно-абразивной обработки штоков гидроцилиндров / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, Е.В. Сенчуров //

Вести Национальной Академии Наук Беларуси. Серия физико-технических наук, 2017, №. 2. – С. 73–77.

7. Бавыкин, О.Б. Взаимосвязь свойств поверхности и ее фрактальной размерности / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова // Известия МГТУ «МАМИ», № 1(15), 2013, т. 2. – С. 14-18.

8. Белоцерковский, М.А., Дудан А.В., Ялович А.П. Восстановление и испытания штоков силовых гидроцилиндров // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки, № 3. 2021. – С. 42-48.

9. Бересневич, П. В. Аэрология карьеров: Справочник / П.В. Бересневич, В.А. Михайлов, С.С. Филатов – М.: Недра, 1990. – 280 с.

10. Богданович, П. Н. Изнашивание полиуретана незакрепленными абразивными частицами / П. Н. Богданович, В. М. Станкевич, М. Ю. Коднянко // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 98-103.

11. Буланов, В. Я. Диагностика металлических порошков / В.Я. Буланов, Л.И. Кватер – М.: Наука, 1983.– 279 с.

12. Булес, П. К вопросу о надежности мощных гидравлических экскаваторов Komatsu Mining Germany в экстремальных условиях эксплуатации // Маркшейдерский вестник. – 2013. № 6. – С. 20-23.

13. Булес, П. Обеспечение надежности работы карьерных гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на открытых разработках России: дис. канд. техн. наук. – М.: НИТУ «МИСиС», 2016. – 20 с.

14. Вайскранц, В. М. Повышение эффективности использования машин для земляных работ в условиях жаркого климата. – М.: Стройиздат, 1983. – 84 с.

15. Власов, П.А. Терморегулирование топливно-смазочных материалов в системах мобильных машин [Текст] / П.А. Власов, А.П. Уханов, И.А. Спицын – Пенза: РИО ПГСХА, 2001. – 140 с.

16. Волкодаева, М.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха / М.В. Волкодаева, А.В. Киселев

// Записки Горного института. 2017. Т. 227. – С. 589-596. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.589.

17. Гапоненко, И. А. Современная технология взрывной отбойки железных руд, снижающая технологическое загрязнение окружающей среды / И. А. Гапоненко, В. И. Комащенко // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах : Материалы VI Международной научной конференции, Белгород, 12–16 октября 2015 года / Ответственный за выпуск Голусов П.В.. – Белгород: Политерра, 2015. – С. 407-412. – EDN XTUMEV.

18. Гембицкая, И.М. Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков / И.М. Гембицкая, М.В. Гвоздецкая // Записки Горного института. 2021. Т. 249. – С. 401-407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.

19. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности: ГОСТ Р ИСО 4287-2014; введ. 01.01.2016. – М.: Стандартиформ, 2014. – 20 с.

20. Гидравлические компоненты. Технические основы. [Электронный доступ]: <http://симрит.рф/ai-71.html> (дата доступа 23.02.2023).

21. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

22. ГОСТ 30480-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 12 с.

23. Грабский, А.А., Сергеев, В.Ю., Грабская, Е.П. Обоснование выбора стратегии технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов // Уголь. 2021. № 2. – С. 14-17. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-2-14-17.

24. Гранкина, Е. В. Обеспечение работоспособности штоковых уплотнительных узлов при ремонте гидроцилиндров путем применения рационального способа восстановления штока: дис. канд. ... техн. наук: 05.20.03. – Л.: 1989. – 158 с.

25. Григорьев, М.А. Очистка топлива в двигателях внутреннего сгорания / М.А. Григорьев, Г.В. Борисова – М.: Машиностроение. 1991. – 208 с.

26. Гусеничный экскаватор Komatsu PC1250-7 (с обратной лопатой). Брошюра PC-1250-7. [Электронный доступ]: <https://www.komek.ru/catalog/ekskavatory/gusenichnyy-ekskavator-komatsu-pc1250-7-s-obratnoy-lopatoj/> (дата доступа 23.02.2023).

27. Ереско, С.П. Закономерность трения эластичных материалов по шероховатым поверхностям при наличии смазки // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2002. №6. – С. 58 - 61.

28. Ереско, С.П. Математическое моделирование, автоматизация проектирования и конструирование уплотнений подвижных соединений механических систем: Монография / С.П. Ереско. – М.: Издательство ИАП РАН. 2003. – 156 с.

29. Заводская брошюра PC-1250-7. URL: <http://PC1250-7.qxd> (komimport.ru) (дата доступа: 09.03.2024 г.)

30. Зимон, А.Д. Адгезия пыли и порошков. – М.: Химия, 1976. – 432 с.

31. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС НДТ 25-2021 Добыча и обогащение железных руд М.: Росстандарт, 2021. – 287 с.

32. Исянов, Л.М. Теоретические основы очистки и обезвреживания промышленных выбросов и сбросов: учебное пособие / Л.М. Исянов, Е.А. Васильева – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. Часть 3. – 82 с.

33. Каверзин, С. В. Методы повышения работоспособности и эффективности гидропривода самоходных машин // Вестник КГТУ. 1996, Вып. 1. – С. 16-19.

34. Казаков, Ю. А. Обоснование и выбор параметров полуприцепа в составе горнотранспортного агрегата многократной проходимости по слабым грунтам : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Казаков Юрий Алексеевич, 2022. – 166 с. – EDN IQPPZJ.

35. Картушинский, А.В. Моделирование влияния совместных эффектов ветрового перемешивания и вертикальных движений на суточную изменчивость распределения клеток фитопланктона (На примере оз. Байкал)// Математические проблемы экологии.– Новосибирск, 1994. – С. 42-52. - (Сб. статей/ РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т математики)

36. Кобзов, Д.Ю. Анализ конструкции и перспективы развития гидропривода возвратно-поступательного действия / Д.Ю. Кобзов, С.В. Плешивцева, В.В. Жмуров //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007, №16. – С. 39-44.

37. Кобзов, Д.Ю. О надёжности и работоспособности гидроцилиндров повышенного типоразмера // Вестник Таджикского технического университета, 2012, №4 (20). – С. 30-39.

38. Кобзов, Д.Ю. Влияние состояния поверхности контртела на герметизирующую способность уплотнительных узлов гидроцилиндра / Д.Ю. Кобзов, В.В. Жмуров, И.О. Кобзова // Системы. Методы. Технологии. Научный журнал БрГУ, Братск, 2010. №3 (7). – С. 54-57.

39. Кобзов, Д.Ю. О критериях работоспособности и надёжности гидроцилиндров / Кобзов Д.Ю., Ереско С.П. // Системы. Методы. Технологии. Научный журнал БрГУ, Братск, 2012. №1 (13). – С. 38-45.

40. Кобзов, Д.Ю. Диагностирование гидроцилиндра по параметрам герметизирующей способности его уплотнительных узлов / Д.Ю. Кобзов, И.О. Кобзова, А.Ю. Кулаков, В.И. Липецкий, А.А. Трофимов // Системы.

Методы. Технологии. Научный журнал БрГУ, Братск, 2013. №1 (17). – С. 27-33.

41. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1987. – 265 с.

42. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

43. Краткий обзор пневматических устройств для транспортирования сыпучих смесей и процессов внутри них / А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, П. А. Костюк, В. А. Макаров // Известия Уральского государственного горного университета. – 2015. – № 3(39). – С. 28-38. – EDN UKPJOV.

44. Кузнецов, В. С. Определение параметров аэротехногенного влияния площадных источников на рабочее пространство карьеров при применении различных способов пылеподавления / В. С. Кузнецов, С. В. Ковшов // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2012. – № 3. – С. 132-139. – EDN PUXDRV.

45. Ламамра, А. Характеристика горных пород рудного месторождения Бухадры в Алжире / А. Ламамра, Е. М. Котельникова, А. О. Сергеев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 493-502. – DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-4-493-502. – EDN YXILSX.

46. Лазаренков, А. М. Методика оценки запыленности воздушной среды рабочих зон литейных цехов /А. М. Лазаренков, М. А. Садоха, Т. П. Кот, А. А. Новик // Литье и металлургия. 2022. № 4. С. 132–136. doi:10.21122/1683-6065-2022-4-132-136.

47. Логинов, Е. В. Особенности применения гидравлических экскаваторов типа обратная лопата // Научный журнал. 2016. №6 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-primeneniya-gidravlicheskih-ekskavatorov-tipa-obratnaya-lopata> (дата обращения: 13.01.2022).

48. Марьясов, А. Н. Моделирование изнашивания сталей в абразивной среде // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Технические науки – 2014, №10, Том 1. – С.16-16.

49. Масляков, Н. С. Обоснование и разработка метода повышения технической готовности при эксплуатации погрузочно-доставочных машин: Дис. кан. тех. наук. — М.: НИТУ «МИСиС», 2016. — 169 с.

50. Мартьянов, В. Л. Аэрология горных предприятий [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиля «Безопасность технологических процессов и производств» / В. Л. Мартьянов; КузГТУ. – Кемерово, 2016.

51. Методика расчетов вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). – Люберцы: ИГД им. А.А. Скочинского, 1999. – 58 с.

52. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух – СПб/: НИИ Атмосфера, 2012. – 223 с.

53. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. – Новороссийск: НИПИОТСТРОМ, 2000. – 28 с.

54. Минко, В.А. Определение интенсивности выделения пыли и кратности воздухообмена в цехах силикатного кирпича / В.А. Минко, В.Г. Шаптала, Н.Н. Подгорный // Строительные материалы. 1979. № 9. – С. 22–23.

55. 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.

56. Михайлов, В.А. Борьба с пылью в рудных карьерах / В.А. Михайлов, П.В. Бересневич, В.Г. Борисов, А.И. Лобода. – М.: Недра, 1981. – 262 с.

57. Монаков, А.С. Разработка метода прогнозирования пылегазовых выбросов горно-обогатительными комбинатами в окружающую среду. Автореферат дис. к.т.н. – М.: МГГУ, 2004. – 20 с.

58. Мосейкин, В.В. Минеральный состав железистых кварцитов Лебединского месторождения и его взаимосвязь с процессами разрушения пород / В.В. Мосейкин, С.Х. Абсатаров // -2008. Семинар №1 симпозиума «Неделя горняка-2007». ГИАБ. – 7 с.

59. Мохаммад, А. А. Работа гидросистемы экскаватора в условиях экстремально высоких температур / А. А. Мохаммад, А. А. Каверзина // Вестник Красноярского аграрного университета. Вестник Крас. ГАУ. - 2014. - № 7. -С. 146-151.

60. Муратова, К.М. Исследование и разработка технических средств для очистки газопылевых мелкодисперсных выбросов предприятий горно-перерабатывающих комплексов: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Тула: Тульский государственный университет, 2020. – 18 с.

61. Мусаибов, Б.М., Устаев, И.Ю. изнашивание поверхностей трения деталей двигателя при наличии в зоне контакта твердых частиц // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №2 (37), 2015. – С. 12-17.

62. Мухаметшина, Р.М. Влияние климатических факторов на свойства материалов и надежность дорожно-строительных машин Известия КГАСУ, 2014, № 4(30). – С. 490-496.

63. Научно-технологический отдел восстановления и обслуживания рукавных фильтров. ООО «НПП «Сфера». Основы фильтрации. URL: https://sfera-saratov.ru/HelpfulArticle_001/?ysclid=lwhlbb9fv8121553741 (дата доступа 05.02.2024 г.).

64. Нураков, С.Н. Влияние износа деталей гидроцилиндра на технико-экономические показатели гидроприводов и экологические показатели дорожных машин / С.Н. Нураков, А.К. Томашец, В.В. Савинкин // Вестник СибАДИ, выпуск 2 (12), 2009. – С. 22-26.

65. Обработка видеogramм при функционировании гидроманипулятора экскаватора. URL:<https://www.youtube.com/watch?v=eALomKjVEm4>. (дата доступа 24.12.2023)

66. ОНД-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Общесоюзный нормативный документ. – Л.: ГГО им. Воейкова, 1987. – 64 с.

67. ОСТ 1 00228-77 Методика определения режимов ускоренных эквивалентных испытаний агрегатов управления потоком жидкости в гидросистемах.

68. ОСТ 22-1417-79 Основные параметры гидроцилиндров. Гидроцилиндры двустороннего действия.

69. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. Пермь: ФГУП МНИ И ЭКО ТЭК, 2003. – 117 с.

70. Патент РФ на полезную модель № 216641. Устройство защиты штока гидроцилиндра экскаватора от запыленности// А.В. Михайлов, Агагена Абдельвахаб, А.С. Федоров//МПК F15B 15/20 (2006.01). Опубл. 16.02.2023. Бюл. № 5.

71. Подэрни, Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для ВУЗов / Р.Ю. Подэрни. – 8-е изд., перераб. И доп. – М.: Издательство «Майнинг Медиа-Групп». – 2013. – 594 с.

72. Подэрни, Р. Ю. Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ. // Горный информационно-аналитический бюллетень, № 2, 2015. – С. 148-167.

73. Потапов, А.А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур / А.А. Потапов, В.В. Булавкин, В.А. Герман, О.Ф. Вячеславова // ЖТФ. 2005. Т. 75, №5. – С. 28-45.

74. Прибор УВТ малый (из лаборатории Литвинова) [Электронный доступ]: https://www.kip-partner.ru/goods/141867696-pribor_uvt_maly_iz_laboratorii_litvinova (дата доступа 22.03.2023).

75. Репин, С.В. Методология совершенствования системы технической эксплуатации строительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.04 СПбГАСУ. – СПб.: 2008. – 50 с.

76. Репин, С.В. Резервирование как метод повышения эффективности эксплуатации строительных машин // Строительные и дорожные машины, 2008, № 2. – С 45-50.

77. Романченко, С.Б. Пылевая динамика в угольных шахтах / С.Б. Романченко, Ю.Ф. Руденко, В.Н. Костеренко // Горное дело, 2011. Т.6, Кн. 9. – 255 с.

78. Романченко, С.Б. К вопросу исследования динамики рудничных аэрозолей с твердой дисперсной фазой / С.Б. Романченко, В.В. Соболев // ВЕСТНИК Научно-технический журнал, №1-2021. – С. 6-15.

79. Савинкин, В.В. Повышение долговечности восстановленных деталей элементов гидропривода строительно-дорожных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. – Омск: Сибирская гос. автод. академия, 2009. – 228 с.

80. Севагин, С. В. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин / С.В. Севагин, А.П. Вержанский // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021, № 5. – С. 35–44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_35.

81. Слесарев, Б.В. Исследование условий и параметров экскавации мощных карьерных гидравлических экскаваторов / Б.В. Слесарев, П. Булес // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S1-2. – С. 42-51.

82. Тененбаум, М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию // М.М Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 270 с.

83. Тинь, Н. В. Совершенствование технической эксплуатации гидроприводов строительных и дорожных машин, используемых в условиях жаркого климата: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1991. – 16 с.

84. ТКП 17.08-17-2012 (02120) Технический кодекс установившейся практики. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов загрязняющих веществ от предприятий по производству цемента и извести. – Минск: Минприроды 2012. – 51 с.

85. Толстова, Ю.И. Охрана воздушного бассейна: учеб. пособие. 2 – е изд., перераб. и доп./ Ю.И. Толстова, Р.Н. Шумилов, Л.Г. Пастухова. – Екатеринбург: Урал. университет, 2016. – 98 с.

86. Трубецкой, К. Н. Открытые горные работы: справочник / К. Н. Трубецкой, М. Г. Потапов, К. Е. Веницкий, Н. Н. Мельников и др. – М.: Горное бюро, 1994. – 592 с.

87. Трушко, В. Л. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий / В.Л. Трушко, О.В. Трушко // Записки Горного института, 2021. Том 250. – С. 569-577. DOI:10.31897/PMI.2021.4.10.

88. Уплотнения гидроцилиндров. Гидравлические Комплексные Системы [Электронный доступ]: <https://dynamotors.ru/upload/Files/hydr-catalog-fin-7-8.pdf> (дата доступа 22.09.2023).

89. Хорош, А. И. Влияние температуры рабочей жидкости на производительность экскаваторов ЭО-4121 / А. И. Хорош, С. В. Каверзин, В. А. Дмитриев // Строительные и дорожные машины. - 1981. - № 1. - С. 16-17.

90. Чооду, О.А. Влияние климатических факторов на эксплуатационные показатели дорожно строительных машин / О.А. Чооду, Э.С. Монгуш // ВЕСТНИК Технические и физико-математические науки Тувинский государственный университет 2013/3. – С. 107-116.

91. Чооду, О.А. Эксплуатация горных транспортно-технологических машин на месторождениях полезных ископаемых на территории республики

Тыва// Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки, 2014/3. – С. 92-102.

92. Чооду, О.А. Техническая эксплуатация горных машин в условиях Республики Тыва / О.А. Чооду, С.А. Евтюков // Успехи современной науки. 2017. Том 4, № 1. С. 60–64.

93. Шекунов, А., Васильченко В. Конструктор для машиностроителей. Уплотнения штоков и поршней / А. Шекунов, В. Васильченко // Основные средства» № 8, 2005. – [Электронный доступ]: <https://os1.ru/article/7158-konstruktor-dlya-mashinostroiteley-uplotneniya-shtokov-i-porshney> (дата доступа 22.09.2023).

94. Шибанов, Д.А. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства «ИЗ-КАРТЭКС» / Д.А. Шибанов, Д.И. Шишлянников, П.В. Иванова, С.Л. Иванов // Горное оборудование и электромеханика. – 2015. – № 9 (118). – С. 3-9.

95. 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.

96. Шибанов, Д.А. Внедрение элементов цифровизации в технологию ТОиР карьерных экскаваторов по фактическому состоянию / Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, А. Агагена // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XX междунар. научно-техн. конфер. «Чтения памяти В. Р. Кубачека». – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 328-331.

97. Щербаков, В.С. Снижение динамических воздействий на одноковшовый экскаватор: монография / В.С. Щербаков, П.А. Корчагин. – Омск: СибАДИ, 2000. – 147 с.

98. Щурин, К.В. Надежность мобильных машин. – Оренбург: ОГУ, 2010. – 585 с.

99. Юрченко, А.А. Обоснование степени диспергирования воды при орошении облака железорудной пыли после массовых взрывов в карьерах // Збірник наукових праць НГУ. №40, 2013. – С. 209-215.

100. **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](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132600007).

101. Agrawal, A. Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC) / A. Agrawal, S. Goelb, W.B. Rashid, P. Mark // Applied Soft Computing, 2015. Vol. 30, pp. 279–286. DOI: [10.1016/j.asoc.2015.01.059](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.01.059).

102. Aguayo, I.A.O. Optimizing productivity and safety of the open pit loading and haulage system with a surge loader / I.A.O. Aguayo, M. Nehring, G.W. Ullah // Mining. 2021. 1(2): 167-179. DOI:[10.3390/mining1020011](https://doi.org/10.3390/mining1020011).

103. Aoulmi, Z. Contribution to the maintenance of T4 BH drilling machine (case of the mine of Boukhadra, Algeria) / Z. Aoulmi, Y. Nouiri, N. Abdi // Mining Science. vol. 24, 2017, 73–83. DOI: [10.5277/msc172404](https://doi.org/10.5277/msc172404).

104. Andrey S. Eliseev, **Abdelwahab Agaguena**, Aleksandr V. Mikhailov, Vladimir N. Gusev. Application of positioning systems for the working bodies of mining equipment to update mining surveying plans and digital surface models // Geoingegneria Ambientale & Mineraria, 2023, (169), P. 5–15.

105. Anwar, U. Maintenance system for heavy earth moving equipment J. Engg. and Appl. Sci. Vol. 34 No. 2 July - December 2015 pp. 47-53.

106. Ayala-Landeros, J.G. Correlation between Roughness (Ra) and Fractal Dimension (D) Using Artificial Vision Systems for On-Site Inspection. Comp. y Sist. [online]. 2018, vol.22, n.4, pp.1473-1485. doi: [10.13053/cys-22-4-2785](https://doi.org/10.13053/cys-22-4-2785).

107. Benyoucef, A.A. Mining operations and geotechnical issues in deep hard rock mining – case of Boukhadra iron mine. Geomatics, Landmanagement and Landscape No. 4 – 2022, 27–46. DOI:[10.15576/GLL/2022.4.27](https://doi.org/10.15576/GLL/2022.4.27).

108. BSI 1994, Characterization of air quality – Part 2: Glossary, British Standard Institute, Great Britain, BS 6069-2:1994 / ISO 4225:1994. P. 18.

109. Buchenau, T. Post-Processing of Surface Topography Data for As-Built Metal Additive Surface Texture Characterization. Preprint from Preprints.org, 03 Mar 2023. [Электронный доступ]: <https://www.preprints.org/manuscript/202303.0051/v1/downloadUnpaywall> DOI:10.20944/preprints202303.0051.v1 (дата обращения: 26.09.2023).

110. Chaulya, S.K. Emission rate formulae for surface iron ore mining activities. *Environmental Modeling and Assessment* (2006) 11: 361Y370. DOI: 10.1007/s10666-005-9026-2.

111. Chaulya, R. Air quality modelling for prediction of dust concentrations in iron ore mines of Saranda region, Jharkhand, India. *Atmospheric Pollution Research*. Volume 10, Issue 3, May 2019, Pages 675-688. DOI:10.1016/j.apr.2018.11.005.

112. Djellali, A. Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials. *Geotech Geol Eng* 37, 2811–2822 (2019). DOI:10.1007/s10706-018-00796-8.

113. Boulahbel, H. Diagnostic de l'effondrement dans la carrière de Boukhadra: Mémoire de Master. – Tébessa: Université Larbi Tebessi, 2020. 126 p.

114. Dust load. - URL: <https://forecast.uoa.gr/en/forecast-maps/dust/europe> (дата доступа 18.02.2024).

115. Gadri, L. Study of fractured rock masses deformation in Boukhadra (Tebessa) underground mine empirical and numerical approach (NE Algeria). *Journal of Geology and Mining Research*. 2012. 4(2), pp. 23–34. DOI: 10.5897/JGMR11.041

116. Ghodrati, B. Reliability and operating environment-based spare parts estimation approach: A case study in Kiruna Mine, Sweden", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2021. Vol. 11 No. 2, pp. 169-184. DOI:10.1108/13552510510601366.

117. Hamad, A. Integrating gravity data for structural investigation of the Youkous-Tebessa and Foussana-Talah transboundary basins (North Africa) / A. Hamad, R. Hadji, D. Boubaya, S. Brahmi, F. Baali, R. Legrioui, Y. Hamad // Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. 2021. 6(2), pp.1–11.
118. Hinds, W. C. Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of Airborne particles, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York. 1998.
119. Institut national de recherche et de sécurité Contrôle de la concentration en silice cristalline dans l'atmosphère des lieux de travail. Ministère du Travail et des affaires sociales édition, Paris. 1998. 25 p.
120. ISO 1995, Air quality – Particle Size fraction Definitions for Health-related Sampling, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, ISO 7708. p. 9.
121. ISO 25178-6:2010. Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 6: Classification of methods for measuring surface texture.
122. Ivanov, S L. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators / S.L. Ivanov, P.V. Ivanova, S.U. Kuvshinkin // IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series 1399 (2019) 044070. DOI:10.1088/1742-6596/1399/4/044070.
123. Kayahan, E. O. Measurement of Surface roughness of metals using binary speckle image analysis. Tribology International. 2010. Vol. 43, pp. 307–311. DOI:10.1016/j.triboint.2009.06.010.
124. Kerbati, N.R. Graphical and Numerical Methods for Stability Analysis in Surrounding Rock of Underground Excavations, Example of Boukhadra Iron Mine NE Algeria. Geotechnical and Geological Engineering. 2020. 1–9.
125. Kerbati, N. R. Diagnostic de la stabilité d'anciennes exploitations souterraines et utilisation du remblayage comme un support des terrains adjacents. (Cas de la mine de fer de Boukhadra): Résumé de la thèse Doctorat. – Annaba: Université Badji Mokhtar, 2021. 30 p.

126. Koçer, E. Noncontact Surface Roughness Measurement Using a Vision System / E. Kocer, E. Horozoglu, I. Asilturk // Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV'14). 2015. Vol. 9445, pp. 4–5. DOI: 10.1117/12.2180683.

127. Kok, J.F: Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance / Kok, J.F., Adebisi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P. R., Hamilton, D. S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Leung, D. M., Li, L., Mahowald, N. M., Miller, R. L., Obiso, V., Pérez García-Pando, C., Rocha-Lima, A., Wan, J. S., Whicker, C. A. // *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 2021, 8127–8167. DOI:10.5194/acp-21-8127-2021.

128. Kubatova, D. Roughness evaluation using Abbott-Firestone curve parameters / D. Kubatova, M. Melichar // *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*; ed. by B. Katalinic. – Vienna, Austria: DAAAM International Publ., 2019. – P. 0467-0475. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063.

129. Lemrabet, A. Approche comparative de deux gisements de fer Boukhadra et Rouina: Contexte géologique et Méthodes d'exploitation / A. Lemrabet, A. Tayebi // *Mémoire de Master, université Abderrahmane Mira - Bejaia*, pp. 85-86, 2015.

130. Lou, S. Material ratio curve of 3D surface topography of additively manufactured parts: an attempt to characterize open surface pores / S. Lou, Z. Zhu, W. Zeng, C. Majewski, P.J. Scott, X. Jiang // *Surface Topography: Metrology and Properties*. 20221. 9 015029. DOI:10.1088/2051-672X/abedf9.

131. Merah, C. Evaluation of the Variable Component of Truck Travel Time Based on the Maximum Speed for an Optimal Management of the Fleet, Case of Boukhadra Iron Ore Mine, NE Algeria / C. Merah, S. Ghodelbourk, M. Taleb // *Journal Européen des Systèmes Automatisés* Vol. 56, No. 1, February, 2023, pp. 43-48. DOI:10.18280/jesa.560106.

132. Mexer, I. High temperature hydraulic system. – Machine Design, 1970. #8, P. 132-134.
133. Myshkin, N. K. Surface roughness and texture analysis in microscale / N.K. Myshkin, A. Already, S.A. Chizhik, K.Y. Choi, M.I. Petrokovets // Wear. 2003. Vol. 254, pp. 1001–1009. DOI: 10.1016/S0043- 1648(03)00306-5.
134. 2020 National Emissions Inventory Technical Support Document: Industrial Processes - Mining and Quarrying. EPA-454/R-23-001bb March 2023 [Электронный доступ]: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-03/NEI2020_TSD_Section28_MiningQuarrying.pdf. (дата доступа 24.12.2023).
135. Nečas, D., Klapetek, P. (2012). Gwyddion: an open-source software for SPM data analysis. Open Physics, 10(1). <https://doi.org/10.2478/s11534-011-0096-2>
136. Nouri, A. Etude et analyse des aspects géotechniques d'une mine souterraine – cas de la mine de Boukhadra): Résumé de la thèse de Master académique. – Tébessa: Université Laarbi Tebessi, 2023. – 197 p.
137. Okoro, F. Technical and economic overview of iron ore production in Australia / F. Okoro, D. Oyewole, O. Okunlola, A. Akosua, N. Yannick // Politecnico di Torino. 2016, pp. 1-15. DOI: 10.13140/RG.2.2.16885.58087.
138. Persson, B. N. J. On the Fractal Dimension of Rough Surfaces. Tribol Lett. 2014. Vol. 54, pp. 99–106. DOI: 10.1007/s11249-014-0313-4.
139. Podulka, P. Roughness Evaluation of Burnished Topography with a Precise Definition of the S-L Surface. Appl. Sci. 2022, 12, 12788. DOI:10.3390/app122412788.
140. Qingliang, Z. Maintenance Strategy Based on Reliability Analysis and FMEA: A Case Study for Hydraulic Cylinders of Traditional Excavators with ERRS / Z. Qingliang, L. Wenting, W. Lirong, W. Chenglong, G. Kuidong // Hindawi Mathematical Problems in Engineering Volume 2020, Article ID 2908568, 11 pages. DOI:10.1155/2020/2908568.
141. Quanren, Z. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined

components / Z. Quanren, Q. Yi, C. Wenlong, L. Xichun // *International Journal of Mechanical Sciences* 149 (2018) 62–72. DOI:10.1016/j.ijmecsci.2018.09.044.

142. Rouaiguia, I. Valorization of waste rocks from Boukhadra iron ore mine for better environmental management Overview on the Boukhadra mine / I. Rouaiguia, M. Bounouala, C. Abdelmalek, A. Idres // *Науковий вісник НГУ*, 2017, № 6. – С. 60-67.

143. Shanmugavadivu, P. Fractal Dimension Based Texture analysis of digital images / P. Shanmugavadivu, V. Sivakumar // *Process Engineering*. 2012. Vol. 38, pp. 2981–2986. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.06.348.

144. Shibanov, D, **Agaguena, A**, Annakulov, T. Extraction of Inclined Exit Ledges in Coal Mines in Presence of Mobile Crushing and Conveyor Complexes // *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024;37(08):1658-66. DOI: 10.5829/ije.2024.37.08b.17.

145. Shivanna, D. M. Evaluation of 3D Surface roughness Parameters of EDM Components Using Vision System / D.M. Shivanna, M.B. Kiran, S.D. Kavitha // *Proceeded Materials Science*. 2014. Vol. 5, pp. 2132–2141. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.416.

146. Shchokin, V. Methodology for Determining Emissions of Pollutants into Atmospheric Air by Open-Pit Mining Works / V. Shchokin, V. Yezhov, O. Shchokina, W. Sobczyk // *Inżynieria Mineralna*. 2023. 1(1 (51), 185–188. doi.org/10.29227/IM-2023-01-23.

147. Singh, G. Estimation of assimilative capacity of the airshed in iron ore mining region of Goa / G. Singh, A. Perwez // *Indian Journal of Science and Technology*. 2020. 8: 1-7. DOI:10.17485/ijst/2015/v8i23/54671.

148. Taib, M. The Mineral Industry of Algeria. In 2019 Minerals Yearbook // *National Minerals Information Center*. 2023. p. 12.

149. Tamani, F. Integrating Remotely Sensed and GIS Data for the Detailed Geological Mapping in Semi-Arid Regions: Case of Youks les Bains Area, Tebessa Province, NE Algeria / F. Tamani, R. Hadji, A. Hamad, Y. Hamad // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019. pp. 1–11.

150. United States Environmental Protection Agency. Generalized Particle Size Distributions for Use in Preparing Size-Specific Particulate Emissions Inventories, EPA-450/4-86-013, July 1986.

151. US EPA 1998, Technical assessment paper: Available information for estimating air emissions from stone mining and quarrying operations, US EPA, USA, Vol. II: Chapter 13. P. 9.

152. Vasques Freitas, A. C. Characterization of particulate matter in the iron ore mining region of Itabira / A.C. Vasques Freitas, R.M. Belardi, H. de M. Jorge Barbosa // Minas Gerais, Brazil. *Atmósfera*. 2022. 35(4), 781–802. DOI:10.20937/ATM.52987.

153. Vesselenyi, T. Surface roughness image analysis using quasifractal characteristics and fuzzy clustering methods / T. Vesselenyi, I. Dzitac, S. Dzita, V. Vaida // *International Journal of Computers, Communications & Control*. 2008, vol. 3, no. 3, pp. 304-316. DOI: 10.15837/ijccc.2008.3.2398.

154. Wu, C. The global dust cycle and uncertainty in CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) models / C. Wu, Z. Lin, X. Liu // *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 10401–10425, DOI:10.5194/acp-20-10401-2020, 2020.

155. Zenati, F. Chapitre 2 : Aperçu générale sur le site minier de Boukhadra et description géominéralogique du gisement): Résumé de la thèse Doctorat. – Tébessa: Université Laarbi Tebessi, 2024. – 1-15 pp.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Гидравлический экскаватор Komatsu PC1250-7 прямая лопата

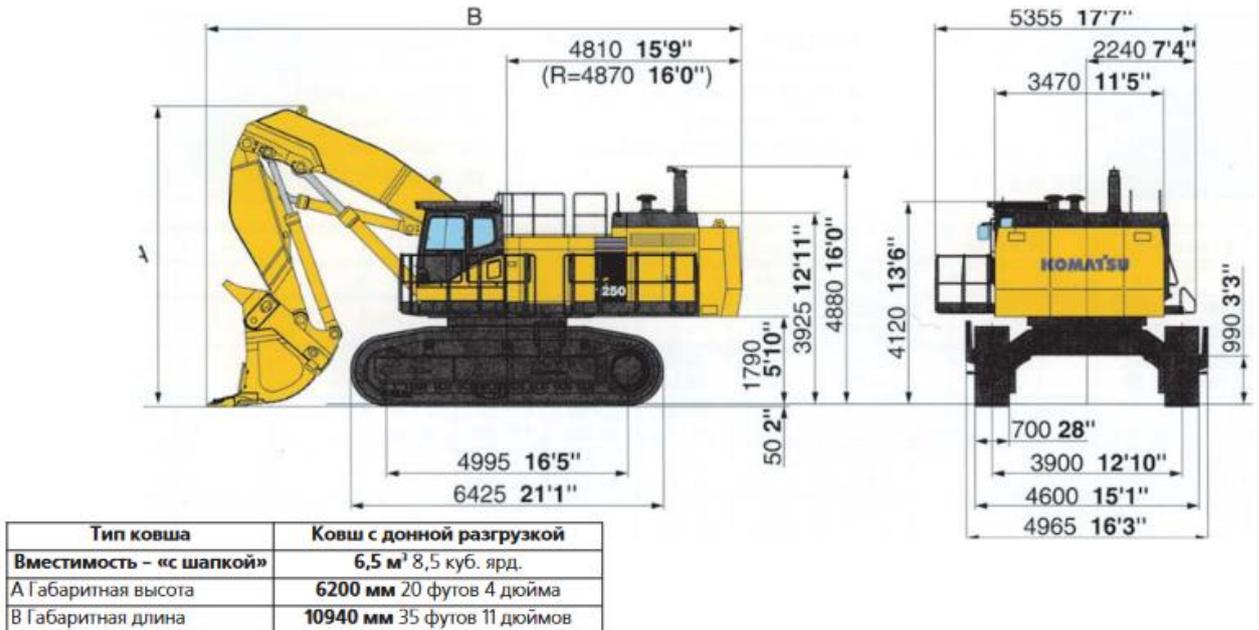


Рисунок А.1 – Основные параметры экскаватора Komatsu PC1250-7

Таблица А.1 – Технические характеристики

Двигатель (модель)	KOMATSU SAA6D170E#3
Мощность двигателя (кВт)	485
Скорость макс, (км/ч)	3,2
Давление на грунт макс. (кПа)	141
Объем ковша (м ³)	3,4-6,5
Усилие отрыва, кг	59000
Усилие на рукояти кг	62000
Габаритная ширина (мм)	5355
Габаритная длина (мм)	14790-16050
Габаритная высота по стреле (мм)	6040-6990
Макс, вылет при выемке (мм)	14070-17450
Макс, глубина выемки (мм)	7745-11500
Макс, высота резания (мм)	13000-13910
Макс, высота разгрузки (мм)	8450-9000
Снаряженная масса машины (кг)	106700-109500
Вместимость топливного бака (л)	1360

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Карьерный самосвал Caterpillar 775G



Рисунок Б.1 – Общий вид карьерного самосвала Caterpillar 775G.

Таблица Б.1 – Технические характеристики карьерного самосвала Caterpillar 775G

Двигатель Caterpillar C32 ACERT	
Полная мощность	758 кВт
Ёмкость топливного бака	1136 л
Вместимость жидкости в системе охлаждения	232 л
Объем масла, заливаемого в двигатель	504 л
Вместимость жидкости в гидравлической системе	189 л
Размер шин	27.00 49(E4)
Максимальная скорость	64.5 км/ч
Масса	73976.4 кг
Номинальная полезная нагрузка	90718.5 кг
Вместимость - полный кузов	41.9 м ³
Вместимость — кузов с горкой	60.2 м ³
Угол выгрузки	49.4 градусов
Время подъёма	15 с
Время опускания	13 с

Таблица Б.2 – Основные параметры карьерного самосвала Caterpillar 775G

A. Общая длина	10535 мм
B. Общая ширина	6494 мм
C. Общая высота	5170 мм
D. Колёсная база	4560 мм
E. Дорожный просвет	896 мм
F. Dump Height	10325 мм
G. Клиренс при выгрузке	965 мм

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Грязесъемные уплотнения штока SAF

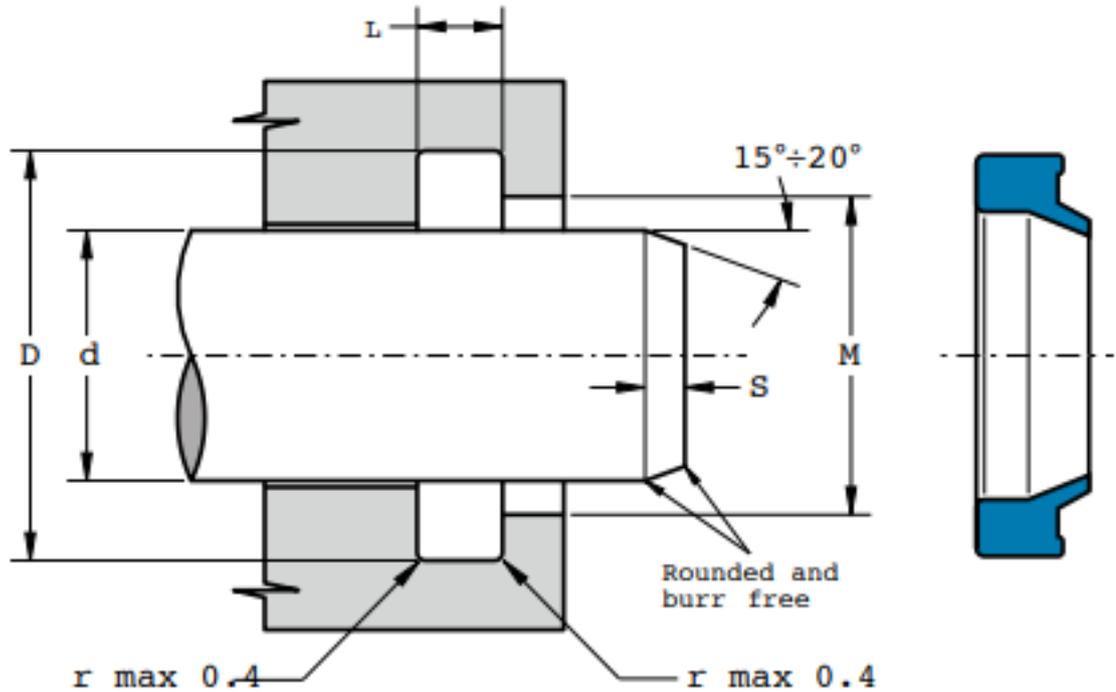


Рисунок В.1 – Грязесъемные уплотнения штока

Основным назначением грязесъемника является предотвращение попадания пыли, грязи и посторонних предметов в гидравлическую систему. Это достигается за счет специальной кромки, которая очищает шток, препятствует развитию рисок, защищает опорно-направляющее кольцо и уплотнение. Грязесъемник производится из полиуретана, что обеспечивает его хорошую работу в экстремальных условиях.

Таблица В.1 – Условия эксплуатации грязесъемника

Скорость, м/с	0,8
Температура, °С	- 45 - +100
Жидкости	Гидравлические масла (на основе минерального масла)
Стандартные значения твердости: по Шору А	93
Шероховатость поверхностей	
Динамическая поверхность:	Подходит для системы уплотнения штока
Статическая поверхность:	$Ra \leq 1,6$ мкм

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Уплотнение штока с асимметричным профилем А

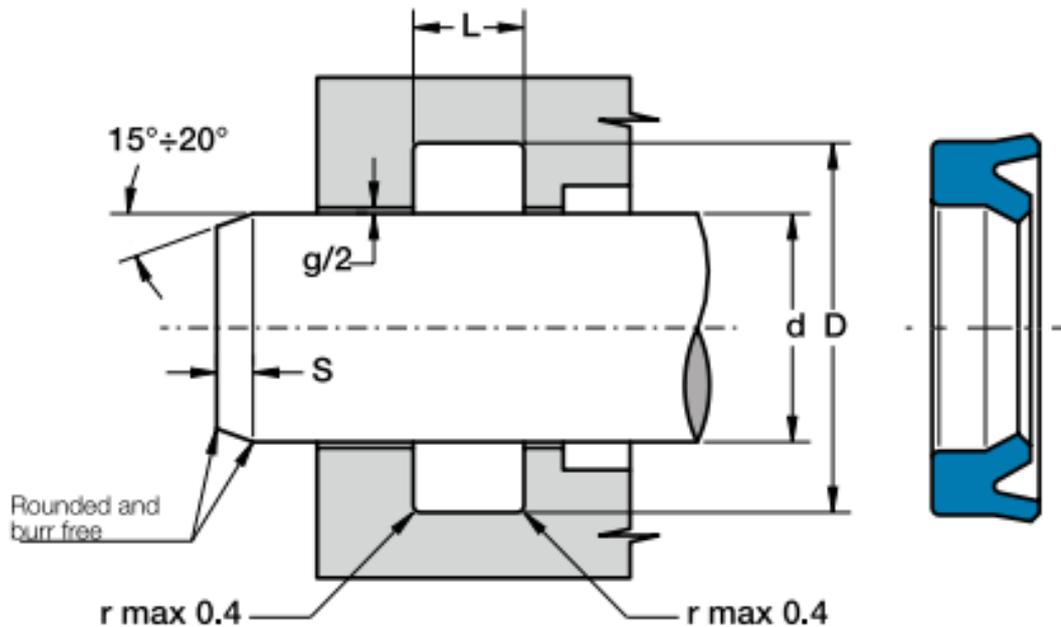


Рисунок Г.1 – Уплотнения штока

Уплотнение штока стабильную работу при перепадах давления. Асимметричные губки предназначены для того, чтобы дифференцировать работу уплотнительных кромок на статических и динамических поверхностях.

Основным материалом для производства уплотнений является полиуретан.

Таблица Г.1 – Условия эксплуатации уплотнения штока

Давление, МПа	40
Скорость, м/с	0,8
Температура, °С	- 45°С - +100
Жидкости	Гидравлические масла (на основе минерального масла)
Шероховатость поверхностей	
Динамическая поверхность, мкм	$Ra \leq 0,3$
Статическая поверхность:	$Ra \leq 1,6$ мкм
Стандартные значения твердости: по Шору А	90-95
Максимальный диаметральный зазор (мм) за уплотнением при определенном давлении, МПа	
5	1,2
10	0,80
20	0,40
30	0,25
40	0,17

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Пример определения текстуры и шероховатости поверхности штока в программе Gwiddion

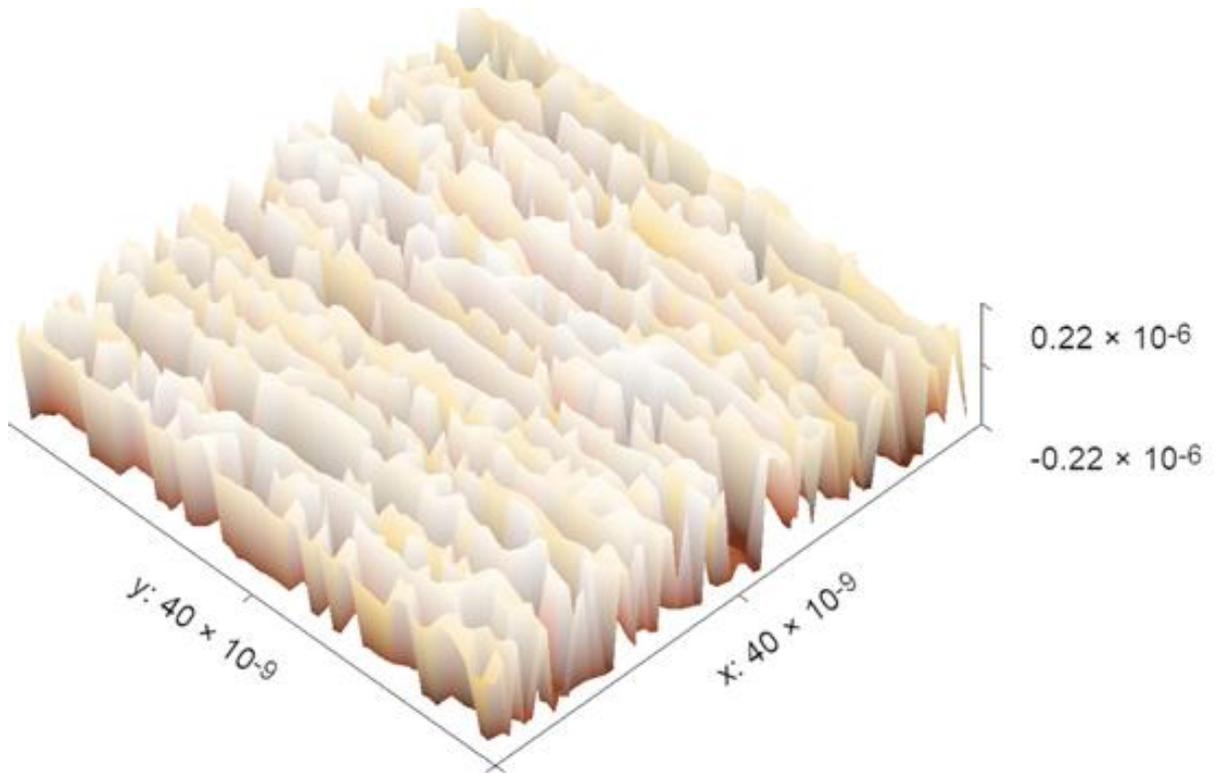


Рисунок Д.1 – 3D изображение поверхности штока

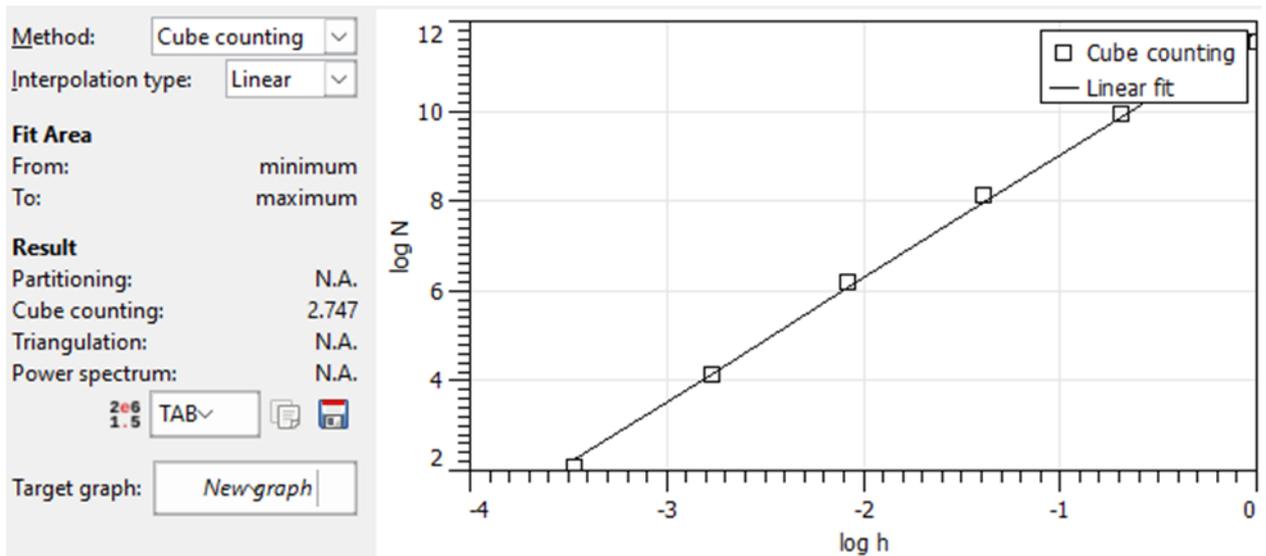


Рисунок Д.2 – Фрактальная размерность поверхности штока

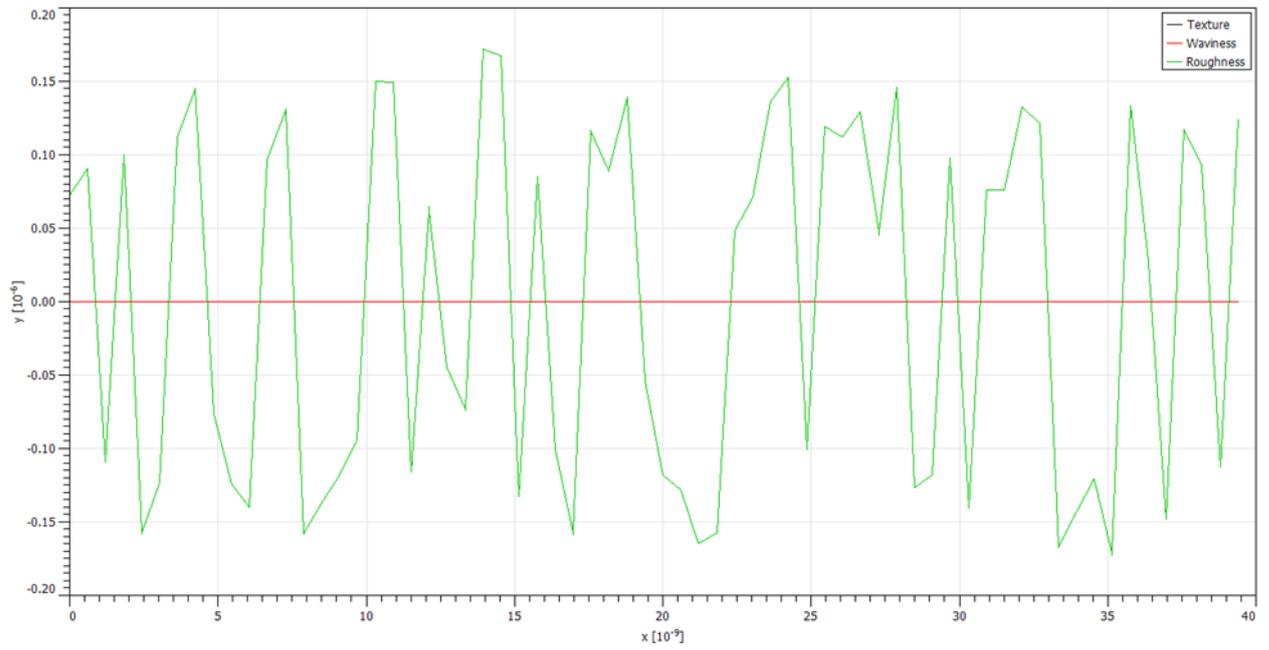


Рисунок Д.3 – Профиль шероховатости поверхности штока

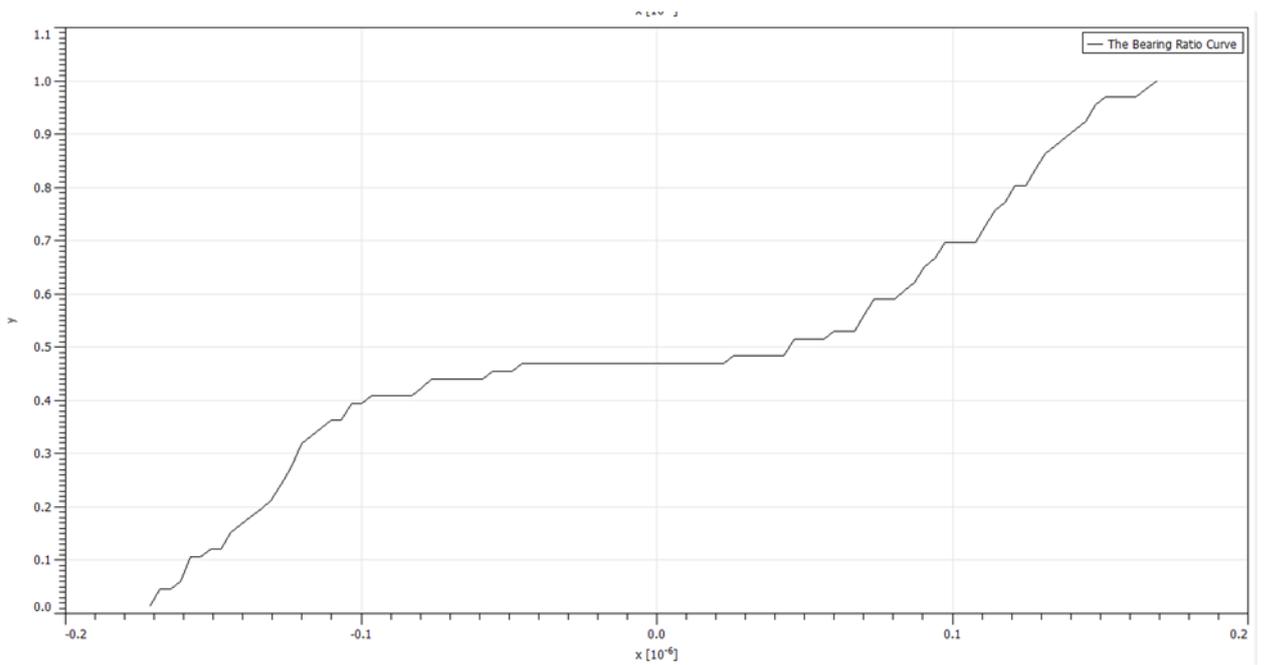


Рисунок Д.4 – Кривая Эббота-Файрстоуна поверхности штока

Таблица Д.1 – Данные по шероховатости поверхности штока

Amplitude		
R_a	Roughness average	116.3×10^{-9}
R_q	Root mean square roughness	121.2×10^{-9}
R_t	Maximum height of the roughness	343.6×10^{-9}
R_v	Maximum roughness valley depth	171.3×10^{-9}
R_p	Maximum roughness peak height	172.3×10^{-9}
R_{tm}	Average maximum height of the roughness	306.9×10^{-9}
R_{vm}	Average maximum roughness valley depth	158.6×10^{-9}
R_{pm}	Average maximum roughness peak height	148.3×10^{-9}
R_{3z}	Average third highest peak to third lowest valley height	307.7×10^{-9}
$R_{3z ISO}$	Average third highest peak to third lowest valley height	263.6×10^{-9}
R_z	Average maximum height of the profile	314.9×10^{-9}
$R_{z ISO}$	Average maximum height of the roughness	306.9×10^{-9}
$R_y = R_{max}$	Maximum peak to valley roughness	330.1×10^{-9}
R_{sk}	Skewness	-0.08463
R_{ku}	Kurtosis	1.275
W_a	Waviness average	0.0000
W_q	Root mean square waviness	0.0000
$W_y = W_{max}$	Waviness maximum height	6.617×10^{-24}
P_t	Maximum height of the profile	343.6×10^{-9}
Spatial		
S_m	Mean spacing of profile irregularities	2.500×10^{-9}
λ_a	Average wavelength of the profile	3.603×10^{-9}
λ_q	Root mean square (RMS) wavelength of the profile	2.827×10^{-9}
Hybrid		
Δ_a	Average absolute slope	202.9
Δ_q	Root mean square (RMS) slope	269.4
L	Length	40.00×10^{-9}
L_0	Developed profile length	8.240×10^{-6}
l_r	Profile length ratio	206.0
Functional		
H	Swedish height	302.7×10^{-9}

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 216641

**УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ШТОКА
ГИДРОЦИЛИНДРА ЭКСКАВАТОРА ОТ
ЗАПЫЛЕННОСТИ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Михайлов Александр Викторович (RU), Агагена
Абдельвахаб (RU), Федоров Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022133285

Приоритет полезной модели 19 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 16 февраля 2023 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 19 декабря 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



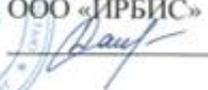
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт о промышленном внедрении результатов диссертации



Утверждаю

Генеральный директор
ООО «ИРБИС»

 Дашкова О.В.

Дата «04» апреля 2024 г.

АКТ (СПРАВКА)
о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертации
Агагена Абдельвахаб

по научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Рабочая комиссия в составе:

Председатель: Дашкова О.В.;

Члены комиссии: Бобылев Н.В.; Висицкий А.А.

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование регламента технического обслуживания гидроцилиндров карьерного экскаватора при добыче железной руды в условиях Алжира», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности ООО «Ирбис» при разработке регламента технического обслуживания и ремонта гидравлических цилиндров экскаваторов в виде:

- технических предложений по разработке технических решений для защиты от запыленности;
- экспресс-метод диагностирования текущего состояния поверхности штока гидроцилиндра;
- метод бесконтактного оптического измерения топографии поверхности штока при его изнашивании в абразивной мелкодисперсной пылевоздушной среде;
- результаты могут быть использованы при корректировке регламента технического обслуживания и ремонта гидроцилиндров экскаватора в качестве 90%-ного ресурса наработки на отказ;
- рекомендации по техническому обслуживанию и ремонту силовых гидроцилиндров карьерных экскаваторов.

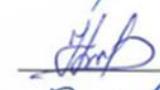
Использование указанных результатов позволяет:

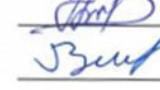
- применять на практике рекомендации по корректировке регламента технического обслуживания и ремонта гидроцилиндров экскаватора.
- разработать инженерные методики по экспресс-диагностированию наработки штока гидроцилиндра.

Председатель комиссии

Генеральный директор  Дашкова О.В.

Члены комиссии:

Инженер-конструктор  Бобылев Н.В.

Техник-механик  Висицкий А.А.