

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

На правах рукописи

Корогодин Артур Сергеевич



ПОВЫШЕНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСА И РЕМОНТНОЙ
ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ БАРАБАННОЙ
МЕЛЬНИЦЫ БЕЗ ДЕМОНТАЖА ЦАПФ НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Иванов С.Л.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ГЕОТЕХНОЛОГИЯ И ГОРНЫЕ МАШИНЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ.....	11
1.1 Стратегия развития добычи свинцово-цинковых руд.....	12
1.2 Горные машины и оборудование открытых горных работ	15
1.3 Факторы, влияющие на уровень готовности горного оборудования	16
1.4 Способы поддержания уровня готовности горных машин	18
1.5 Месторождение «Павловское» как специфический объект эксплуатации горной техники и стратегический пункт горной промышленности арктической зоны.....	20
1.6 Геотехнология на примере освоении месторождения «Павловское»	23
1.7 Горное оборудование в составе ГОКов свинцово-цинковых месторождений ...	28
1.8 Особенности технического обслуживания и ремонта горного оборудования при эксплуатации в ограниченном рабочем пространстве	30
1.9 Барабанные мельницы в составе ГОКов свинцово-цинковых месторождений .	33
1.10 Анализ отказов ресурсоопределяющих узлов барабанной мельницы	36
1.11 Теротехнологический подход к поддержанию уровня готовности барабанной мельницы в составе оборудования дезинтеграции.....	40
1.12 Техническое обслуживание и ремонт опорных подшипников как ресурсоопределяющих узлов барабанной мельницы	41
1.12.1 Анализ традиционных методов ремонта цапф барабанной мельницы	41
1.13 Контроль технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы в процессе эксплуатации	45
1.13.1 Анализ видов оценки технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы.....	46
1.13.2 Оценка технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы на основе применения карт Шухарта.....	52
1.14 Выводы по главе 1.....	53

ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ	56
2.1 Адаптивная структура системы технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов барабанной мельницы в условиях эксплуатации в ограниченном рабочем пространстве.....	56
2.1.1 Мониторинг по величине нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковых узлах барабанной мельницы	60
2.2 Величина нагрева и интенсивность роста температуры как индикатор оценки технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы	63
2.3 Алгоритм проведения мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию температуры в подшипниковых узлах барабанной мельницы.....	64
2.4 Оценка критичности риска возникновения отказа подшипниковых узлов барабанной мельницы	68
2.5 Выводы по главе 2.....	70
ГЛАВА 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ НАГРЕВА И ИНТЕНСИВНОСТИ РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ В УЗЛАХ.....	72
3.1 Испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований ...	73
3.2 Измерительные средства контроля геометрического профиля испытываемых цапф опорных подшипников передаточных узлов	74
3.3 Методика проведения экспериментального исследования оценки зависимости величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковых узлах от отклонения формы поверхностей цапф	75
3.4 Параметры и геометрия испытываемых подшипниковых узлов и цапф	80
3.5 Оценка величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковых узлах от отклонения формы поверхностей цапф.....	81
3.6 Анализ интенсивности процесса изнашивания поверхностей цапф при предельно допустимых значениях температуры в опорных подшипниках.....	86

3.7 Зависимость межремонтного ресурса подшипника скольжения от температуры в узле.....	93
3.8 Выводы по главе 3.....	95
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ЦАПФ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ БЕЗ ИХ ДЕМОНТАЖА НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ	97
4.1 Оценка технического состояния опорных подшипников барабанной мельницы на основе применения карт Шухарта.....	100
4.2 Алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по обеспечению работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы.....	107
4.3 Повышение уровня ремонтной технологичности подшипниковых узлов барабанной мельницы.....	114
4.3.1 Ремонтный способ цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации.....	114
4.3.2 Схема базирования корпуса барабанной мельницы при проведении ремонтных работ подшипниковых цапф	116
4.3.3 Содержание основных работ и этапов, выполняемых при проведении ремонта опорных цапф барабанных мельниц с применением модульного комплекта вспомогательного оборудования.....	120
4.3.4 Расчет коэффициента времени нахождения в ремонте подшипниковых цапф согласно разработанному способу ремонта	124
4.4 Выводы по главе 4.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов исследования	150
ПРИЛОЖЕНИЕ В Концепт конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В современных условиях развития горнодобывающей промышленности России наблюдается устойчивый рост потребности в свинцово-цинковых концентратах, что обусловлено растущим спросом на цветные металлы данной группы на отечественном и мировом рынке. Основные месторождения свинцово-цинковой руды, характеризующейся высокой крепостью (8-12 единиц по шкале Протодьяконова), расположены на Урале и в Сибири, где функционируют крупные горно-обогатительные комбинаты (ГОКи). В их структуре значительную долю оборудования составляют барабанные мельницы, на которые приходятся наибольшие технологические нагрузки при переработке свинцово-цинковой руды, при этом мельницы представлены различными типоразмерами и производителями, включая отечественных крупнейших производителей АО «Тяжмаш» и ПАО «Уралмашзавод», а также зарубежных Metso и FLSmidth. Также важно отметить, что барабанные мельницы планируется активно применять и в составе модульных комплексов горного оборудования в рамках разработки нетрадиционных технических и технологических решений для добычи и переработки свинцово-цинковых руд арктической зоны при минимально развитой инфраструктуре территорий.

Эксплуатация барабанной мельницы сопровождается высокими удельными нагрузками на опорные подшипники, являющиеся ее ресурсопределяющими узлами, что приводит к их интенсивному изнашиванию, а учитывая традиционное применение баббитовых гидростатических подшипников скольжения в опорных узлах – существенно увеличивает риски их отказа. Переход на новые конструктивные решения опорных подшипников с применением современных антифрикционных материалов приводит к значительному удорожанию при минимальной выгоде. Ситуация усугубляется и эксплуатацией мельниц в ограниченном рабочем пространстве: как в случае поточного производства на ГОКах, так и в условиях компактного расположения горного оборудования в составе модульных комплексов.

В связи с этим особую актуальность приобретает повышение межремонтного ресурса и ремонтной технологичности подшипниковых узлов барабанной мельницы путем проведения корректирующего технического обслуживания, а также ремонтов крупными блоками без демонтажа цапф на месте эксплуатации.

Степень проработанности темы исследования

Вопросами развития ремонтных технологий горных машин и их технического обслуживания, в частности крупногабаритных деталей и узлов, занимались как отечественные, так и зарубежные исследователи: Бестужева О.В., Бойко П.Ф., Бондаренко Ю.А., Бочков В.С., Воронцов И.И., Габов В.В., Гусев Е.Л., Камаев В.А., Лагунова Ю.А., Леванов И.Г., Новиков А.Н., Погонин А.А., Репин С.В., Санина Т.М., Федоренко М.А., Фурин В.О., Ahmadzadeh F., Hao S., Hilden M.M., Neves M.D.M., Roy R., Xu L. и др.

Однако в недостаточной мере рассмотрены вопросы повышения межремонтного ресурса и ремонтной технологичности подшипников скольжения горного оборудования за счет создания новых технических решений в рамках мероприятий технического обслуживания и ремонта в условиях эксплуатации в ограниченном пространстве и отсутствии ремонтных баз, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования – процесс изменения температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения, являющихся ресурсоопределяющими узлами барабанной мельницы, и его влияние на их остаточный ресурс в пределах межремонтного интервала.

Предмет исследования – опорные баббитовые гидростатические подшипники скольжения как ресурсоопределяющие узлы барабанной мельницы.

Цель исследования – повышение межремонтного ресурса опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения как ресурсоопределяющих узлов барабанной мельницы и снижение времени нахождения ее в ремонте.

Идея исследования состоит в том, что повышение межремонтного ресурса опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной

мельницы обеспечивается поддержанием их температуры в допустимых пределах путем проведения мероприятий корректирующего технического обслуживания по специальному алгоритму с применением карт Шухарта и организации ремонта подшипниковых цапф непосредственно на месте эксплуатации без их демонтажа с использованием модульных комплектов вспомогательного оборудования.

Для реализации поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие **задачи**:

1. Обосновать выбор индикатора для оценки технического состояния опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы.

2. Установить функциональные зависимости изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения от отклонения формы поверхностей цапф с учетом эксплуатационных нагрузок.

3. Разработать алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы на месте ее эксплуатации, основанный на анализе величины нагрева и интенсивности роста температуры подшипников с применением карт Шухарта.

4. Разработать техническо-технологическое решение для повышения уровня ремонтной технологичности цапф барабанной мельницы.

Научная новизна работы:

1. Установлены функциональные зависимости величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения барабанной мельницы от отклонения формы поверхностей цапф при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа и влияния этих отклонений на межремонтный ресурс последних.

2. Разработан алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы на основе

непрерывной оценки их технического состояния по величине нагрева и интенсивности роста температуры внутри узлов, фиксируемой в контрольной карте Шухарта.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Обоснован контроль величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном гидростатическом баббитовом подшипнике скольжения в качестве диагностического параметра для оценки технического состояния в системе мониторинга барабанной мельницы, направленный на обеспечение безотказности в течение назначенного ресурса.

2. Обоснованы предупредительные и предельные границы контрольной карты Шухарта, позволяющие оценивать техническое состояние подшипников барабанной мельницы по величине нагрева и интенсивности роста температуры в узлах в режиме реального времени.

3. Разработан способ ремонта подшипниковых цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации (Приложение А), а также обоснован концепт конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования для повышения уровня ремонтной технологичности цапф.

4. Результаты работы планируются к внедрению в рамках проведения актуализации программы и методики аттестации стендов для проведения испытаний редукторных передач повышенной и большой мощности с баббитовыми подшипниками скольжения на ПАО «ЗВЕЗДА» (акт внедрения от 28.01.2025 представлен в Приложении Б).

Методология и методы исследований

Методологической основой работы является комплексный подход, сочетающий научный анализ и обобщение результатов ранее опубликованных исследований, а также обработку данных производственных наблюдений, теоретических и экспериментальных изысканий в области повышения межремонтного ресурса критических узлов горных машин для дезинтеграции рудного сырья в рамках стратегий технического обслуживания и ремонта в условиях эксплуатации оборудования в ограниченных рабочих пространствах. Стендовые экспериментальные исследования проведены с применением современной

измерительной аппаратуры, а методы сбора и обработки данных соответствуют требованиям государственных стандартов и утвержденных методик.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

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

Положения, выносимые на защиту:

1. Величина нагрева и интенсивность роста температуры в опорном баббитовом гидростатическом подшипнике скольжения барабанной мельницы определяет его межремонтный ресурс, при этом допуск полного радиального биения цапфы, превышающий 12 % толщины масляного слоя, сопровождается ростом температуры в подшипнике до предельно допустимого значения в 70 °С и снижением межремонтного ресурса на 30 %.

2. Применение разработанного алгоритма мероприятий корректирующего технического обслуживания, основанного на анализе величины нагрева и интенсивности роста температуры опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы в режиме реального времени с применением карт Шухарта, обеспечивает поддержание работоспособности подшипников, повышая их межремонтный ресурс, а также позволяет обоснованно принимать решение о направлении в ремонт подшипниковых цапф без их демонтажа с применением модульного комплекта вспомогательного оборудования.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается репрезентативным объемом статистических данных и воспроизводимостью результатов экспериментов. Положения основаны на общепризнанных научных фактах и согласуются с результатами производственных наблюдений.

Апробация результатов

Основные положения и результаты исследований были представлены и получили положительную оценку на ряде конференций: Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое

оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (апрель 2022, 2023, 2024, 2025 гг., г. Екатеринбург); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (апрель 2022, 2024, 2025 гг., г. Магнитогорск); VI Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (декабрь 2022 г., г. Кемерово); Ежегодная научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (апрель 2023 г., г. Санкт-Петербург); XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2023 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора

Состоит в участии соискателя во всех этапах процесса написания диссертационной работы, в том числе в: проведении экспериментов и получении научных зависимостей; апробации результатов исследования, выполненных лично автором; обработке и интерпретации экспериментальных данных; разработке способа ремонта подшипниковых цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации, защищенный патентом РФ; подготовке основных публикаций по результатам работы.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в полной мере освещены в 15 печатных работах (пункты списка литературы № 1, 25 – 38), 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент на изобретение (Приложение А).

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа изложена на 163 страницах машинописного текста, включающего 49 рисунков, 7 таблиц, 122 литературных источника.

ГЛАВА 1 ГЕОТЕХНОЛОГИЯ И ГОРНЫЕ МАШИНЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Одной из важнейших экономических составляющих Российской Федерации наряду с нефтегазовой промышленностью является ее горно-обогатительная отрасль [33]. Однако в нынешних условиях в России наблюдается некоторое несоответствие состояния минерально-сырьевой базы с ее плановыми стратегическими целями развития. Основу современной минерально-сырьевой базы России преимущественно составляют бедные труднообогатимые руды [61]. В основном это связано с пониженным содержанием концентрации полезных компонентов в исходном рудном сырье и повышенным содержанием неблагоприятных сопутствующих компонентов [25]. Немаловажным в современных условиях является, и соблюдение природоохранных мероприятий, связанных с повышенной негативной техногенной нагрузкой на природно-климатическую составляющую зоны добычи [118], что включает в себя дополнительные расходы на обязательные мероприятия по проведению последующей рекультивации отработанных месторождений, и напрямую влияет на стоимость конечного добываемого продукта [99].

Открытые горные работы являются важным и широко применяемым методом добычи полезных ископаемых в труднодоступных месторождениях арктической зоны [49]. В этом процессе используются разнообразные горные машины с высокой единичной мощностью, габаритами и рабочим циклом, не предполагающим их перемещения на значительные расстояния, которые позволяет выполнять различные задачи, начиная от подготовки территории и вскрытия месторождений до добычи и транспортировки руды, а также рекультивации земель [82]. В подобных наиболее тяжелых арктических условиях при открытом способе разработки месторождений преимущественно задействованы такие горные машины как: экскаваторы, бульдозеры, карьерные автосамосвалы, буровые установки, скреперы, драглайны, конвейеры, транспортеры, карьерное дробильно-сортировочное оборудование. Данные горные машины играют ключевую роль в

разработке рудных месторождений открытым способом, обеспечивая эффективное и безопасное извлечение полезных ископаемых из недр земли.

1.1 Стратегия развития добычи свинцово-цинковых руд

Рост потребления свинца и цинка в высокотехнологичных отраслях промышленности, включая электронику, энергетику и производство аккумуляторных систем, формирует устойчивый спрос на сырьевые ресурсы [5]. Рост спроса на свинцово-цинковые концентраты в первую очередь обусловлен активным потреблением Китая. В структуре китайского импорта цинка 63,3 % поставок приходится на Россию, США и Вьетнам, что подчеркивает ключевую роль этих стран в обеспечении сырьевой безопасности китайской промышленности. Россия и Казахстан активно наращивают добычу: к 2030 году в Якутии планируется увеличить производство свинца на 31 тыс. тонн в год за счет разработки месторождений, таких как Сардана и Верхне-Менкече. Проект «Верхнее Менкече» в Республике Бурятия, запуск которого запланирован на 2025 год, позволит нарастить выпуск цинковых концентратов на 29 тыс. тонн ежегодно. Прогнозы указывают, что к 2029 году производство цинковых концентратов в России вырастет на 4,8 %, чему способствует модернизация обогатительных фабрик и внедрение технологий глубокой переработки.

Современные тенденции развития промышленности стимулируют растущий спрос на цинк. Этот металл находит широкое применение в сфере солнечной энергетики, где используется для гальванического покрытия конструкций, а также в машиностроении для защиты от коррозии [102]. Свинец сохраняет лидерство в аккумуляторной отрасли – 85 % его потребления связано с производством батарей, включая гибридные автомобили. Эти факторы формируют устойчивый долгосрочный спрос на свинцово-цинковые руды.

Российская Федерация, обладая значительными запасами свинцово-цинковых руд и занимает ключевое положение в обеспечении глобальных поставок [65]. В России ключевые месторождения свинцово-цинковых руд сосредоточены в Сибири, на Урале и в арктической зоне. Основные из них [4]:

1. Горевское (Красноярский край):

- Запасы: 4,9 млн т свинца; 1,6 млн т цинка; 3,85 тыс. т серебра;
- Крупнейшее в России по запасам свинца (40 % общероссийских);
- Разрабатывается открытым способом (карьер глубиной до 435 м);
- Годовая добыча: 2,5 млн т руды, производство свинцового и цинкового концентратов;
- Планируется переход на подземную добычу.

2. Озерное (Республика Бурятия):

- Запасы: 135 млн т руды (6,16 % цинка; 1,17 % свинца; 35 г/т серебра);
- Крупнейшее в России по цинку;
- Запуск горно-обогатительного комбината запланирован на 2024–2025 гг. с проектной мощностью 6 млн т руды/год;
- Инвестиции: 71 млрд руб.;
- Создаст 2 тыс. рабочих мест.

3. Холоднинское (Республика Бурятия):

- Запасы: 334 млн т руды (4,3 % цинка; 0,65 % свинца; 28 г/т серебра);
- Расположено в Центральной экологической зоне Байкала, из-за чего разработка запрещена с 2008 г.;
- Историческое загрязнение шахтными водами (токсичные стоки в реки Тья и Холодная);
- Балансовая ценность: 13,34 млн т цинка; 2,01 млн т свинца.

4. Павловское (Архангельская область, Новая Земля):

- Запасы: 2,7 млн т цинка; 0,5 млн т свинца;
- Первый арктический ГОК (строительство начато в 2025 г.);
- Инвестиции: 53 млрд руб.;
- Планируемая мощность: 3,5 млн т руды/год.

5. Учалинское (Башкортостан):

- Запасы: 450 млн т руды (1,2 % меди; 1,5 % цинка);

- Внедрение высокопроизводительных флотационных машин (объем камер до 130 м³);
- Увеличение извлечения меди и цинка на 9,98 %.

6. Верхне-Аршинское (Южный Урал):

- Руды залегают в карбонатно-терригенных породах рифея;
- Содержание: 4-6 % цинка; 1,5-2 % свинца.

Крупнейшие месторождения, такие как Горевское (Красноярский край), Корбалихинское (Алтайский край) и Урупское (Северный Кавказ), содержат руды с повышенным содержанием металлов (до 5-7 % цинка, 1-3 % свинца), что делает их конкурентоспособными на международном уровне.

Современные технологии переработки свинцово-цинковых руд требуют применения высокопроизводительного оборудования, способного работать с рудами повышенной крепости (8-12 единиц по шкале Протодяконова) и обеспечивать стабильное качество концентратов [98]. На российских горно-обогатительных комбинатах (ГОКах) ключевыми звеньями технологической цепочки являются дробильно-измельчительные комплексы. Однако рост сложности рудных тел, наблюдаемый на месторождениях Урала (Гайское) и Сибири (Озерное), диктует необходимость модернизации оборудования и внедрения новых подходов к его техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР).

Основные проблемы эксплуатации оборудования связаны с высокими удельными энергозатратами на дробление и измельчение (до 10,5 кВт·ч/т), а также с повышенным износом рабочих органов при переработке абразивных руд. Например, шаровые мельницы МШЦ, применяемые на Качканарском ГОКе, требуют регулярной замены футеровки и мелющих тел, что увеличивает простои на 15-20 % [11]. Решение этих задач видится в использовании мельниц полусамои измельчения с резинометаллической футеровкой, снижающей износ на 30 % [58], и внедрении систем онлайн-мониторинга вибрации подшипниковых узлов.

Критически важным направлением является автоматизация процессов ТОиР [18]. Внедрение цифровых платформ, таких как система управления ремонтами компании «Северсталь», позволило сократить незапланированные простои на 20 %

за счет прогнозирования отказов и оптимизации графика замены расходных элементов [24]. На Михайловском ГОКе применение мобильных решений для инспекции оборудования сократило время оформления заявок на 25 %, а ошибки в документации – на 30 %.

Перспективным направлением считается интеграция предиктивной аналитики в процессы ТОиР [67, 71]. Например, на Челябинском цинковом заводе внедрена система мониторинга состояния дробилок СМД-118 на базе датчиков вибрации и термографии [23]. Анализ данных через алгоритмы машинного обучения позволяет прогнозировать остаточный ресурс подшипников с точностью до 95 %, сокращая затраты на внеплановые ремонты [42].

Для арктических месторождений, таких как «Павловское» (Новая Земля) [22], актуально применение модульного оборудования с повышенной ремонтпригодностью. Использование конусных дробилок Metso MX Multi-Action с гидравлической регулировкой разгрузочной щели снижает частоту вмешательства оператора на 70 % [68], а система самодренажа пульпы в загустителях Outotec предотвращает обледенение узлов в зимний период.

Таким образом, повышение работоспособности оборудования для переработки свинцово-цинковых руд требует комплексного подхода, сочетающего модернизацию технической базы, цифровизацию процессов ТОиР и обучение персонала [26]. Реализация этих мер позволит снизить себестоимость концентратов на 20-25 % и обеспечить рентабельную разработку месторождений с низким содержанием металлов.

1.2 Горные машины и оборудование открытых горных работ

На территории России в настоящее время открытым способом добывается свыше 70 % руд цветных металлов. Все месторождения, разрабатываемые открытым способом, являются комплексными, так как горные породы в пределах карьерного поля потенциально могут быть полезными ископаемыми. Комплексное использования сырья – основное направление технической политики при освоении недр [12].

Процесс разработки рудосодержащих месторождений открытым способом начинается с мероприятий по подготовке территории карьерного поля, где основную работу выполняют такие горные выемочно-погрузочные машины, как: гусеничные экскаваторы ЭКГ-5А, ЭКГ-10И, ЭКГ-12, ЭКГ-15И, ЭКГ-20К, шагающие экскаваторы ЭШ 11.75, ЭШ 25.90, ЭШ 40.130, ЭШ 65.100, бульдозеры моделей Б10М, Б12 и бульдозерно-рыхлительные агрегаты ДЭТ-250М2, ДЭТ-320, Т-75.01 с помощью которых осуществляется вскрытие месторождения и проведение операций по удалению вскрыши. На ряду со вскрышными работами, параллельно производится подготовка рабочих площадок для проведения фронта работ по бурению. Наиболее распространенной буровой техникой открытых горных работах являются станки шарошечного бурения типа СБШ-250Н, СБШ-270.

После вскрышных и буровзрывных работ осуществляется непосредственная экскавация руды. Одноковшовые электромеханические и гидравлические экскаваторы выполняют значительный объём экскаваторных работ при открытой разработке месторождений. Карьерный транспорт обеспечивает быструю и эффективную транспортировку добытого сырья, минимизируя время простоя в процессе добычи.

Горно-обоганительное оборудование входит в единую технологическую цепочку горных машин по разработке месторождения и в свою очередь оно необходимо для переработки добываемых полезных ископаемых и отделения их от пустой породы. Данное оборудование устанавливается на комбинатах, которые, как правило, расположены вблизи шахт, рудников и карьеров, что сокращает расходы на транспортировку добытого минерального сырья. Горно-обоганительное оборудование включает в свой состав мельницы различного типа, сепараторы, классификаторы, скрубберы, дробилки и т.д.

1.3 Факторы, влияющие на уровень готовности горного оборудования

Уровень готовности горного оборудования к эксплуатации определяется множеством факторов, которые должны быть заблаговременно учтены для обеспечения эффективной и безопасной работы в условиях открытых горных

разработок [89], включая физико-механические характеристики горных пород (прочность и абразивность), а также параметры рабочей среды (уровень запыленности и влажность рудничной атмосферы) [90]. Эти факторы могут увеличивать интенсивность изнашивания оборудования и требовать дополнительных мер по его защите и разработке специальных адаптивных подходов и мероприятий в рамках проведения технического обслуживания.

Немаловажным фактором является и корректная оценка технического состояния горных машин и оборудования. Регулярное проведение технического обслуживания, диагностики и ремонта позволяет своевременно выявлять и устранять неисправности, что способствует поддержанию высокого уровня готовности оборудования [104]. Важно следить за состоянием основных узлов и агрегатов, таких как двигатели, трансмиссии, гидравлические системы, подвески, опорные подшипниковые узлы и т.д.

Профессионализм и квалификация обслуживающего персонала тоже вносит свой вклад в поддержание оборудования в рабочем состоянии. Операторы и механики должны обладать необходимыми знаниями и навыками для выполнения мероприятий технического обслуживания, диагностики неисправностей и проведения ремонтных работ [115]. Регулярное обучение и повышение квалификации персонала способствуют снижению риска ошибок, аварий и соответственно возникновение отказов в ресурсопределяющих узлах и механизмах [29].

Для своевременного проведения ремонтов и технического обслуживания необходимо обеспечить доступность запасных частей и расходных материалов [29]. Наличие на складе необходимых компонентов позволяет оперативно устранять повреждения и минимизировать время простоя оборудования. Важно наладить надежные логистические цепочки для своевременной поставки запчастей. В особенности это касается горной техники, которая эксплуатируется в специфических условиях, когда имеет место быть ограниченность рабочего пространства и невозможность перемещения горных машин с места их эксплуатации для проведения ремонтных работ, отсутствие ремонтных баз.

Внедрение современных технологий и инноваций в процесс эксплуатации горного оборудования может значительно повысить его готовность [80]. Использование систем автоматизации, мониторинга состояния оборудования и дистанционного управления позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы и принимать меры по их устранению. Модернизация оборудования с учетом современных требований и стандартов также способствует повышению его надежности и эффективности [64].

Четкое распределение задач, составление графиков ТОиР, а также координация действий различных служб и подразделений также позволяют минимизировать простои и повысить производительность [70].

Таким образом, уровень готовности горного оборудования определяется множеством факторов, включая техническое состояние, условия эксплуатации, квалификацию персонала, доступность запасных частей, инновации, соблюдение экологических норм и организацию работ. Учет и управление этими факторами позволяют обеспечить эффективную и безопасную работу оборудования карьеров. В особенности это относится к инновационным подходам в геотехнологии, на момент осуществления которой еще не существует наработанной нормативной базы по эксплуатации горного оборудования, что в большинстве случаев требует заблаговременной рационализации системы ТОиР горной техники применительно к данным условиям эксплуатации в рамках реализации новой геотехнологии [114].

1.4 Способы поддержания уровня готовности горных машин

Уровень готовности горной машины является важным показателем, определяющим способность оборудования выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации, выступая ключевым комплексным показателем надежности, объединяющим в себя безотказность и ремонтпригодность, характеризуя тем самым коэффициент готовности K_r горной машины.

В основном поддержание уровня готовности горных машин достигается за счет повышения их качества на всех этапах жизненного цикла [69], чаще всего речь идет о качестве при проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, что комплексно

решается в рамках теротехнологии [62]. Поскольку значительно повлиять на две первые стадии, а именно: проектирования и изготовления, не представляется возможным без значительных временных, трудо- и ресурсозатрат в рамках уже эксплуатируемого горного оборудования в инновационных геотехнологических подходах при разработке месторождений в сложно доступных географических условиях, релевантным направлением выступает корректирование и рационализация проведения мероприятий в рамках системы ТОиР на этапе эксплуатации горных машин [100].

Для открытых горных работ характерна высокая динамичность работы горных машин, сопровождающаяся частыми остановками, недогрузками или, наоборот, перегрузками машин и оборудования [14]. Возникающая нестабильность в процессе эксплуатации в целом приводит к снижению производительности, преждевременному выходу из строя оборудования, повышенной нервной напряженности и утомляемости людей, а вследствие этого к авариям и ухудшению экологической обстановки [116]. Поэтому стабилизация работы горного оборудования при открытой разработке – один из наиболее действенных резервов повышения эффективности производства. Исследования показывают, что до 25 % нестабильности работы карьеров вызваны межсменными операциями, однако основные причины высокой неритмичности работы накладываются на организационно-технические мероприятия, устранение или уменьшение влияния которых существенно повышает эффективность производства.

Важную роль здесь может сыграть регулярная аппаратурная диагностика установившегося режима работы ресурсопределяющих узлов горных машин, основанная на корреляционном анализе диаграмм исследуемых функций, которые выступают индикаторами адекватной оценки технического состояния оборудования [19]. Такой анализ позволяет обнаружить скрытые закономерности в работе оборудования, нежелательные или вредные тенденции и своевременно устранять их. Так как большие резервы повышения эффективности по поддержанию уровня готовности горных машин и оборудования скрыты в системе ТОиР [94], важно заблаговременно устанавливать индикаторы адекватности оценки технического

состояния в купе с соблюдением рекомендаций по повышению качества ремонта горных машин и оборудования [20], особенно эксплуатируемых в неблагоприятных климатических условиях месторождений арктической зоны [63, 83].

Стационарное значение коэффициента готовности оборудования « K_r » при этом определяют по формуле (1.1):

$$K_r = \frac{T_o}{T_o + T_b}, \quad (1.1)$$

где K_r – коэффициент готовности оборудования;

T_o – средняя наработка между отказами восстанавливаемого объекта, ч;

T_b – среднее время восстановления объекта после отказа, ч.

Помимо коэффициента готовности, также для оценки уровня готовности объектов применяют коэффициент технического использования « $K_{т.и.}$ », который учитывает не только время работы оборудования, но и периоды технического обслуживания и ремонта, определяемый по формуле (1.2):

$$K_{т.и.} = \frac{T_o}{T_o + T_b + T_{п}}, \quad (1.2)$$

где $K_{т.и.}$ – коэффициент технического использования;

T_o – средняя наработка между отказами восстанавливаемого объекта, ч;

T_b – среднее время восстановления объекта после отказа, ч;

$T_{п}$ – время простоя объекта, обусловленное выполнением планового технического обслуживания и ремонта (время профилактики), пересчитанное на один отказ, ч.

1.5 Месторождение «Павловское» как специфический объект эксплуатации горной техники и стратегический пункт горной промышленности арктической зоны

За последние десятилетия становится все более привлекательной перспектива освоения обширных труднодоступных месторождений арктической зоны, которые включают в себя ряд таких полезных после обогащения сырьевых концентратов как золото, олово, серебро, свинец, цинк, титан, циркон и прочие минералы благородных металлов [107]. Наличие обширного набора геоданных

арктической зоны наряду с богатой геологией и инфраструктурой делают ее одним из ключевых экономических драйверов развития России в условиях борьбы за контроль над минеральными ресурсами, обеспечивая тем самым непосредственно региональную безопасность самой России [36]. Одним из пилотных проектов в этой области на период с 2021 года, включенным в список по социально-экономическому развитию отечественных территорий Арктики, заявлено свинцово-цинковое серебросодержащее рудное поле «Павловское», входящее в пятерку подобных крупнейших перспективных месторождений России (Постановление Правительства Российской Федерации от 30.03.2021 г. № 484). Также месторождение «Павловское» относится к ряду крупнейших месторождений Арктики по запасам цинковых руд [35].

Месторождение находится на северо-западе России в составе Архангельской области на острове Южный, входящем в архипелаг Новая Земля в Севером Ледовитом океане, в 15-18 км от побережья Баренцева моря. Минерализация свинцово-цинкового сырья была выявлена в 1991 году геологами в бассейне губы Безымянной во время проведения Полярной морской государственной геологической поисково-съёмочной партии. В последствии чего в 1993-1994 годах на территории участка производилось минералогическое исследование и геологическое кадрирование, с дальнейшим проведением в период с 2000 по 2002 год поисково-оценочных геологоразведочных работ, в ходе которых и было открыто серебросодержащее свинцово-цинковое месторождение «Павловское», простирающиеся более чем на 12 км² вблизи губы Безымянной [25].

К настоящему времени данное месторождение является единственным расположенным на Новой Земле с утвержденным балансовым запасом. Геологическое строение месторождения относят к стратиформному геологопромышленному типу в карбонатных толщах [25].

В своей основе месторождение «Павловское» представляет из себя три рудоносных блока: Центральный, Западный и Восточный. Преимущественно разведаны залежи Центрального и Восточного блоков. Сплошные рудные тела преимущественно выходят на поверхность Восточной залежи в борту губы

Безымянной. Восточная залежь заключена в антиклинальной складке, она составляет единое рудное тело шириной около 120-250 м, а в некоторых местах и более чем на 800 м с глубиной более 250 м и протяженностью более чем 900-1000 м с мощностью 50-100 м и приурочена к зонам катаклаза с локализацией в низших слоях рудовмещающей толщи. Центральный блок в свою очередь характерен субпластовыми сплошными телами рудопроявления, представляя собой ряд линз, пологопадающих на восток и северо-восток. Рудная минерализация Центральной залежи простирается более чем на 550-600 м преимущественно по оси складки к северу с мощностью 3-25 м, аналогично приуроченными к зонам катаклаза с локализацией в низах рудовмещающей толщи. В месте пересечения залежь имеет размер около 350 м [25].

На основе анализа статической обработки кернового и площадного опробования рудного сырья произведена оценка качественного содержания полезных минеральных ресурсов трех элементарных ассоциаций: рудной (Pb, Zn, Ag, Cd, As, Sb, Ge, Fe и др.), карбонатной (Ca, Mg, Mn) и глинистой (Al, Ba, Ga, Cr, Co, Cu, Ni, Sc, V, Ti, Zr и др.). Из установленных минеральных ресурсов, основной промышленный интерес составляют цинк и свинец. Их распределение по рудным телам является условно равномерным в процентном соотношении. Также в рудах месторождения содержится значительное число примесей, из которых наибольшую ценность в качестве попутных компонентов имеет серебро [25].

Таким образом, рудный потенциал месторождения «Павловское» представляют из себя природный концентрат с примерным содержанием цинка до 35 % и свинца до 20 % соответственно, а проведенные полупромышленные испытания окончательно подтвердили высокое качество товарной продукции. Таким образом, на период 2017 года по общедоступным источникам итоговое количество рудного потенциала недр составляет в общем, около 47 млн. тонн, а прогнозные ресурсы свинца и цинка суммарно оцениваются в 19 млн. тонн. Что делает серебросодержащие свинцово-цинковое месторождение «Павловское» одним из пяти крупнейших подобных минерально-сырьевых баз в мировой экономике [25].

1.6 Геотехнология на примере освоении месторождения «Павловское»

Географическое расположение месторождения «Павловское» относительно крупнейших предприятий по переработки горных концентратов представляет весомое стратегическое преимущество по отношению к подобным месторождениям [3]. А имеющаяся договоренность с подобными потенциальными потребителями сырья, покрывающими сбыт планируемой продукции месторождения, подтверждает рыночные перспективы проекта, делая его высокорентабельным [25].

Однако в то же время географическое месторасположение данного месторождения накладывает и определенную степень повышенной сложности по его разработке, практически исключая возможность совмещения мероприятий по проведению добычи и обогащения традиционными методами с помощью применения стационарных горно-обогатительных комбинатов [2]. Помимо этого, в ходе строительства и дальнейшей эксплуатации месторождения имеет место возникновение повышенной негативной нагрузки на природно-климатическую составляющую побережья губы Безымянной, в ходе которого могут быть разрушены местообитания животных, занесенных в красную книгу Российской Федерации. В целом, рассматриваемый район является достаточно сложным для строительства горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Здесь имеет место, как и суровые арктические условия, характеризующиеся сильными ветрами, метелями и отрицательными температурами, достигающими значений $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, так и неблагоприятные инженерно-геологические условия для строительства стационарных горных предприятий в купе с высокочувствительными к техногенным нагрузкам ландшафтами. Все это требует создание специально климатически сберегающей геотехнологии [25].

Помимо этого, вести строительство предполагается в неосвоенной и незаселенной части острова, где в целом отсутствуют объекты логистической инфраструктуры. А имеющаяся транспортная инфраструктура в районе планируемого обустройства месторождения представлена исключительно морским транспортом [74]. При этом береговая инфраструктура на подходах и

непосредственно на губе Безымянная отсутствует. Наличие каких-либо железных или автомобильных дорог также не предусмотрено [25].

В последнее десятилетие в связи с радикальными изменениями в политической сфере и ужесточении климатического регулирования в купе с истощением доступных запасов сырья становится привлекательной концепция разработки и применения гибких плавучих предприятий или комплексов с целью ухода от инвестирования в стационарные недвижимые наземные предприятия, которые становятся зачастую все более нерентабельными [25, 99].

Плавучие предприятия или комплексы в своей основе представляют собой судно, на котором конструктивно закладывается некий производственный процесс добычи или переработки природного сырья, в отличие от судов, используемых исключительно для перевозки товаров. Производственный процесс на плавучем комплексе представляет из себя непрерывный поток, отдельные операции которого чередуются в строго определенной последовательности [25].

Плавучие комплексы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению со стационарными предприятиями. В первую очередь это компактность конструкции, связанная с внедрением на плавучий комплекс технологий с наземных заводов и производств путем упрощения конструктивных решений [97]. Во-вторых, это малые сроки продолжительности строения плавучих комплексов на водной поверхности, которая позволяет за считанные месяцы, а не за годы возводить промышленные объекты, выступая тем самым идеальной строительной площадкой. Также разработка и применение плавучих комплексов является конкурентоспособной в сравнении с возросшей стоимостью сырья, произведенного стационарными заводами в купе с затратами на их непосредственное возведение и оборудование. Однако, ключевым фактором их преимущества является мобильность [25].

Россия построит первый плавучий комплекс горного оборудования для разработки месторождения «Павловское», а также по окончании планируется и применение плавучего комплекса на ряде других подобных перспективных месторождений рудопроявления цветных металлов. Таким образом, после исчерпания запасов перспективных сложно доступных месторождений

рудопроявления арктической зоны, к которым в частности относится и месторождение «Павловское», имеется возможность применения плавучего комплекса горного оборудования на других аналогичных месторождениях, при этом на новом месте требуется только беспрепятственный подход к берегу и причал, что в свою очередь позволяет минимизировать риски разработки проектов и сократить затраты и время для подготовки разработки месторождений [28]. Также позволяя разрабатывать месторождения, не предусматривающие применение традиционных методов из-за их нерентабельности, и тем самым делая данные проекты разработок экономически целесообразными [25].

Имеющийся опыт блочного строительства плавучих комплексов показывает, что трудозатраты в сравнении со стационарными предприятиями снижаются практически в два раза. Помимо этого, в несколько раз сокращается и сама стоимость объекта, а необходимая для его постройки площадь сокращается уже в несколько десятков раз. Это связано с конструктивным решением многоэтажности плавучего комплекса, где все оборудование располагается не на одной единой площади, а на различных технических палубах и затем объединяется при производстве в единый непрерывный технологический процесс [25].

Создавать различные плавучие объекты готовы предприятия из абсолютно разных сфер производства начиная от энергетики и заканчивая нефтедобычей. Среди них плавучие электростанции, нефтехимические заводы, заводы по переработке нефти и нефтяного газа, заводы по опреснению морской воды, заводы по производству сжиженного газа, заводы для производства полиэтилена, бумагоделательные комбинаты, заводы для производства прутковой стали и по производству шпона, плавучие электростанции, атомные электростанции, ветровые и приливно-энергетические установки и другие. Всевозможные плавучие предприятия предлагают компании Швеции, Финляндии, Норвегии, Германии, Италии, Франции, США и России [93, 101, 103]. Данная модель лучше всего подходит для разработки небольших, удаленных месторождений [25].

Проект разработки специализированного плавучего комплекса горного оборудования и модель разработки месторождения «Павловское» с помощью его

применения был предложен госкорпорацией «Росатомом», как перспективный вариант предусматривающий уход от классического метода добычи при освоении свинцово-цинковых месторождений [25].

В 2021 году началось планирование непосредственно конструкции плавучего комплекса, которая будет перерабатывать 50 тыс. тонн свинцового и 220 тыс. тонн цинкового концентрата в год. Начало строительства последнего было намечено на 2022 год. Генеральным проектировщиком выступила АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» (АО «ВНИПИпромтехнологии»). Плавучий горно-обогатительный комплекс будет включать в себя несколько основных функциональных участков, расположенных на соответствующих палубах. Состав оборудования и технических средств плавучего комплекса включает в себя [25]:

- Палубное оборудование, леерное ограждение, кранцевую защиту, кнехты для швартовки и буксировки, мачты с сигнальными огнями и светильниками палубного освещения, трап;
- Палубы с расположенным в технологической последовательности горно-обогатительного оборудования;
- Административно-бытовые помещения;
- Палубы для обеспечения хранения во внутренних помещениях плавучего комплекса вспомогательной, ремонтной техники и прочего имущества, включая палубные люки с трапами, съемное грузоподъемное оборудование, системы освещения и вентиляции.
- Электростанция, непосредственно питающая плавучий комплекс;
- Различные лабораторные площадки;
- Дополнительно установленные съемные контейнеризированные комплексы различного назначения и прочие вспомогательные объекты.

Загрузка и непосредственно монтаж горного оборудования на борт плавучего горного комплекса предполагается при его постройке. Таким образом, горно-обогатительное оборудование плавучего комплекса будет работать в единой технологической цепи с горным оборудованием карьера, а сам плавучий комплекс

эффективно размещается у залежь рудного сырья месторождения «Павловское» с осуществлением переработки минеральных ресурсов и получения конечного концентрата в море, а не на суше, что позволит существенно снизить неблагоприятное влияние на экосистему, а также минимизировать риски и затраты, как временные, так и финансовые [25].

Технологическая схема отработки месторождения предусматривает комплексную систему переработки рудного сырья. Добытая горная масса транспортируется из карьера автосамосвалами на производственную площадку плавучего горно-обогатительного комплекса, где осуществляется многостадийная переработка [25]. На первом этапе производится предварительная подготовка материала, включающая дробление, измельчение и классификацию. После этого рудное сырье поступает на селективную флотационную схему обогащения, которая обеспечивает эффективное разделение минералов. В результате последовательно проводимых операций флотации достигается высокое качество получаемых продуктов свинцового, цинкового и серебряного концентратов (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Укрупненная технологическая схема переработки серебряносодержащих свинцово-цинковых руд месторождения «Павловское» (составлено автором)

При этом непосредственно цинк и свинец встречаются в основном в виде очень мелкозернистых агрегатов сфалерита и галенита, которые поддаются флотации, но могут потребовать очень тонкого измельчения, чтобы отделить их от сопутствующего пирита [25].

1.7 Горное оборудование в составе ГОКов свинцово-цинковых месторождений

В оборудовании для обогащения свинцово-цинковой руды преобладают флотационные машины, а также дробилки и мельницы. Статистика по типам оборудования (на примере типовой линии 1000-2000 т/сутки):

1. Флотационные машины (35-45 %):

Примеры моделей: SF-8, XCF/KYF, 4A, 5A.

Функция: разделение свинцовых и цинковых минералов.

Количество: на линию 1000 т/сутки – 24-30 единиц (включая грубую, контрольную и перечистную флотацию); на линию 2000 т/сутки – до 44 единиц.

Доля затрат: 25-30 % от стоимости оборудования.

2. Дробильно-измельчительное оборудование (25-30 %):

Типы оборудования:

- Щековые дробилки (PE-600×900) – 1-2 шт.
- Конусные дробилки (CS-160, PYZ1200) – 1-2 шт.
- Шаровые мельницы (MQG-2736, MQG-2760) – 2-4 шт.

Функция: дробление руды до 8-20 мм, измельчение до 0,074 мм.

Энергопотребление: 55-65 % от общего расхода электроэнергии.

3. Классификаторы и гидроциклоны (15-20 %):

Типы оборудования:

- Спиральные классификаторы (2FG-20) – 2-4 шт.
- Гидроциклоны (300×4) – 2-6 групп.

Функция: разделение частиц по крупности для оптимизации флотации.

4. Оборудование для обезвоживания (10-15 %):

- Сгустители (NXZ-18, TS-1845) – 1-2 шт.
- Фильтр-прессы (XGZ-150/2000) – 1-3 шт.

Производительность: 15–25 т/ч по сухому концентрату.

5. Вспомогательное оборудование (5-10 %):

- Питатели (GZD-960×3800) – 1-2 шт.
- Конвейеры (DT-75) – 8-12 шт.
- Смесительные резервуары – 2-4 шт.

Основное горное оборудование в составе горно-обогачительных комплексов свинцово-цинковых месторождений в процентном соотношении представлено в таблице 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Основное оборудование в составе свинцово-цинковых ГОКов в процентном соотношении (составлено автором)

Оборудование	Доля в составе ГОКа
Флотационные машины	30 %
Дробилки и мельницы	25 %
Классификаторы, гидроциклоны	15 %
Сушильные установки	18 %
Питатели, конвейеры, смесители	12 %

Таблица 1.2 – Распределение оборудование в составе свинцово-цинковых ГОКов по стоимости в процентном соотношении для линии 2000 т/сутки (составлено автором)

Оборудование	Доля в стоимости ГОКа
Дробилки и мельницы	30 %
Флотационные машины	25 %
Классификаторы	15 %
Машины обезвоживания	12 %
Электрооборудование	10 %
Вспомогательные системы	8 %

1.8 Особенности технического обслуживания и ремонта горного оборудования при эксплуатации в ограниченном рабочем пространстве

За последние 20 лет подход к организации и планированию системы технического обслуживания и ремонта горного оборудования радикально изменился [41]. В первую очередь это связано с возросшим числом новых горных машин и оборудования применяемых на разработке месторождений открытым способом обусловленным применением инновационных геотехнологий. Горные машины стали обладать гораздо более сложной конструкцией и эксплуатироваться в условиях повышенного отказаообразования их ресурсопределяющих элементов, что в свою очередь сподвигло крупные компании на переосмысление подходов к ТОиР [113]. На первое место вышло исключение внеплановых простоев оборудования, так как подавляющее число горного оборудования в условиях современных горных предприятий работает в единых технологических цепочках [96]. Этот момент крайне актуален в рамках эксплуатации горного оборудования в ограниченном рабочем пространстве [92], как например в случае плавучего комплекса, где все оборудование технологически и кинематически жестко связано друг с другом в замкнутые технологические линии на разных ярусах межпалубных пространств. И выход из строя хотя бы одной единицы оборудования замкнутой производственной линии приводит не только к остановке цепочки технологического процесса, но и влияет на нормальное функционирование горного оборудование карьера, вызывая длительные простои.

Поддержание работоспособности горного оборудования также сильно усугубляется отсутствием ремонтных баз и невозможности перемещения машин с места их установки для проведения ремонтных работ, что представляет собой значительные вызовы для организации системы ТОиР. Эти особенности эксплуатации требуют применения специализированных методов и технологий, направленных на обеспечение надежности и безопасности работы оборудования в таких специфических условиях [81].

Одной из ключевых задач является разработка и внедрение эффективных стратегий технического обслуживания, адаптированных к условиям эксплуатации

в ограниченном пространстве. Это включает в себя регулярное проведение профилактических осмотров и диагностики состояния машин с использованием современных методов и инструментов. Важно своевременно выявлять и устранять мелкие неисправности, предотвращая их перерастание в серьезные поломки, которые могут привести к длительным простоям и значительным финансовым потерям [72].

Отсутствие ремонтных баз требует тщательного планирования логистических процессов и обеспечения доступности запасных частей и расходных материалов. Необходимо наладить эффективные цепочки поставок, чтобы оперативно пополнять запасы и минимизировать простои оборудования. Это может включать организацию специальных мобильных ремонтных бригад и специально спроектированных, и имеющихся в составе предприятия ремонтных средств и комплектов оборудования, необходимых для проведения срочных ремонтных работ на месте технологического стояния горных машин горно-обогатительных комбинатов или комплексов.

Также имеет место невозможность перемещения горного оборудования с места его установки, в связи с жестким распределением оборудования в рабочем пространстве, что также накладывает определенные ограничения на методы технического обслуживания и ремонта. В таких условиях особое значение приобретает использование модульных и переносных ремонтных комплексов, которые могут быть доставлены непосредственно к месту эксплуатации машины [110]. Это позволяет проводить ремонтные работы без необходимости демонтажа и транспортировки оборудования, что существенно сокращает время простоя и снижает затраты.

Таким образом, эксплуатация горного оборудования в условиях ограниченного пространства, отсутствия ремонтных баз и невозможности перемещения эксплуатируемых машин требует комплексного подхода, включающего профилактическое обслуживание, эффективную логистику, использование мобильных ремонтных комплексов и квалифицированный персонал. Учет этих особенностей позволяет обеспечить надежную и безопасную работу оборудования, минимизируя

простои и повышая общую эффективность производственных процессов при проведении разработки месторождения [79].

В ходе технологического процесса измельчения свинцово-цинковых руд критическому изнашиванию подвержены элементы шаровых барабанных мельниц, на которые приходится 30-40 % всех технологических отказов обогатительного оборудования (рисунок 1.2). Анализ эксплуатационной статистики, полученный на основе производственных данных ГОК «Горевский» и «Озерный», демонстрирует характерные особенности работы данного оборудования. Основным фактором, ограничивающим ресурс шаровых мельниц, является интенсивное изнашивание футеровок, требующий их регулярной замены с периодичностью 4-6 месяцев [105]. Значительную долю отказов составляют повреждения подшипниковых узлов, частота которых достигает 12-15 случаев в год на каждую мельницу. Дополнительным критическим фактором является механическая деформация барабанов, возникающая при неконтролируемых перегрузках оборудования [86].

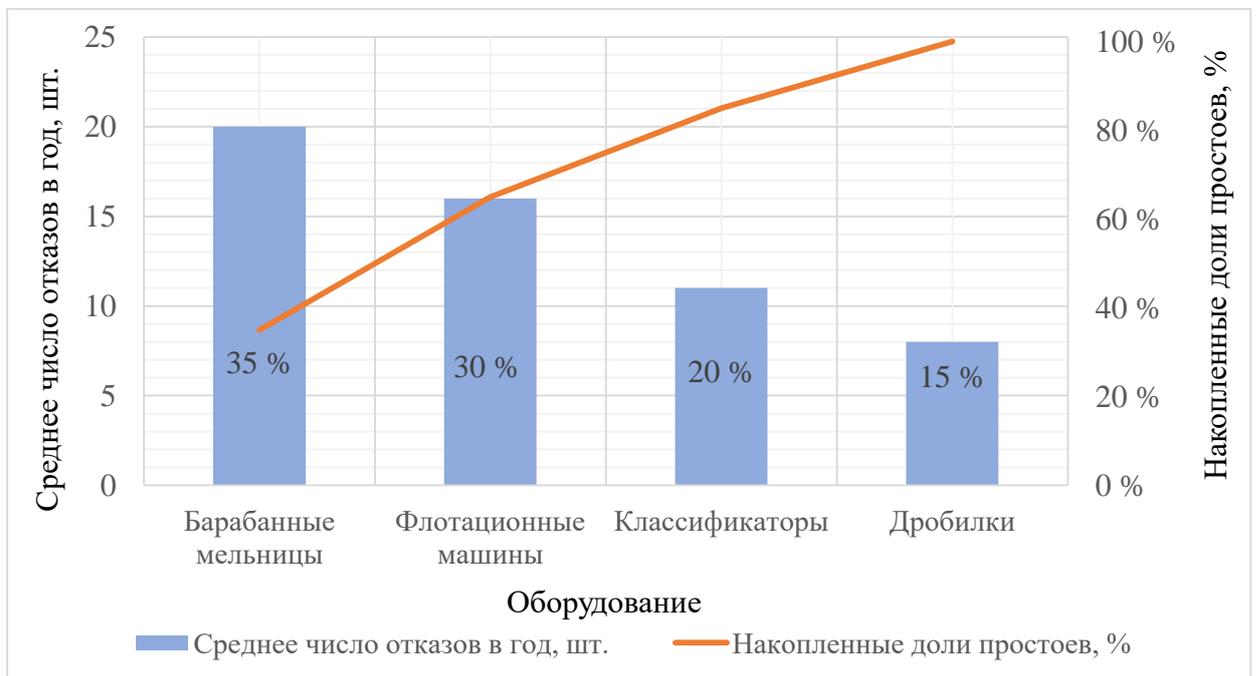


Рисунок 1.2 – Данные по отказам оборудования в составе свинцово-цинковых ГОКов по отчетам за 2023-2024 гг. (составлено автором)

Эксплуатационные потери проявляются в значительных простоях оборудования, составляющих 8-12 дней в год на каждую единицу. Экономическая эффективность эксплуатации существенно снижается за счет высоких затрат на

ремонтные работы, которые достигают 18-25 % от общей стоимости технического обслуживания технологической линии. Основными факторами, приводящими к интенсивному изнашиванию оборудования на ГОКах, являются абразивное воздействие частиц руды.

Для минимизации поломок и продления срока службы оборудования применяются комплексные меры. В первую очередь, это использование современных износостойких материалов, внедрение систем IoT-мониторинга, позволяющей в режиме реального времени отслеживать критические значения параметров работы оборудования – уровень вибрации и температуру узлов, что дает возможность своевременно выявлять и устранять потенциальные неисправности [78]. Дополнительно рекомендуется проводить регулярный ультразвуковой контроль сварных швов и ответственных узлов, а также внедрять системы автоматической смазки для снижения трения подвижных частей.

1.9 Барабанные мельницы в составе ГОКов свинцово-цинковых месторождений

подавляющим же оборудованием дезинтеграции руды в составе ГОКов свинцово-цинковых месторождений являются барабанные мельницы, на которые приходится наибольшие технологические нагрузки при переработке свинцово-цинковой руды, при этом мельницы представлены различными типоразмерами и производителями, включая отечественных крупнейших производителей АО «Тяжмаш» и ПАО «Урал-машзавод», а также зарубежных Metso и FLSmidth. Также важно отметить, что барабанные мельницы планируется активно применять и в составе модульных комплексов горного оборудования в рамках разработки нетрадиционных технических и технологических решений для добычи и переработки свинцово-цинковых руд арктической зоны при минимально развитой инфраструктуре территорий.

На ГОКе в составе месторождения «Павловское», например, планируется использование шаровых мельниц, характеризующихся следующими параметрами: диаметр барабана составляет 7,5 метров, длина – 12 метра, а производительность

достигает до 250 тонн в час. Корпус мельниц выполнен из высокопрочной стали с внутренней футеровкой из износостойких материалов. Каждая мельница оснащена двойной системой привода и системой автоматической смазки подшипников, а также герметичными разгрузочными устройствами [1].

В процессе работы скорость вращения мельниц поддерживается на уровне 75-80 % от критической, при этом загрузка стальными шарами составляет 25-30 % от объема барабана [87]. Степень измельчения достигает 80 % класса -0,074 мм при расходе электроэнергии 2,5-3 кВт·ч на тонну [1].

Для обеспечения эффективной работы предусмотрены системы контроля загрузки и автоматического регулирования скорости [91], а также мониторинг износа футеровки и контроль гранулометрического состава [15]. Дополнительно установлены системы пылеудаления и циркуляционные насосы для классификации. Каждое рабочее место оснащено магнитным сепаратором для очистки мелющих тел и системой подачи воды для классификации.

Эксплуатационные характеристики мельниц обеспечивают коэффициент использования на уровне 92-95 %, а срок службы достигает 15-20 лет [16]. Для обслуживания каждой мельницы требуется 2-3 человека в смену. Все эти характеристики делают выбранные мельницы оптимальным решением для переработки свинцово-цинковых руд в составе ГОКов месторождений, расположенных в сложных климатических условиях Арктики.

Межремонтный период мельницы на примере МШР 4,5×5,0 в среднем составляет 10 тыс. машино-часов. При продолжительности капитального ремонта $K=400$ ч, периодичность текущего ремонта T_1 составляет 1580 машино-часов, второго текущего ремонта T_2 – 4900 ч. Продолжительность указанных ремонтов – 80 ч и 200 ч соответственно. Структура ремонтного цикла Π_p барабанной мельницы: $K-T_1-T_1-T_2-T_1-T_1-K$ (рисунок 1.3). Время на проведение технического обслуживания в год составляет в среднем 440-520 ч.

Текущий ремонт T_1 (ТО № 1) выполняется для обеспечения или восстановления работоспособности и состоит в замене или восстановлении быстроизнашивающихся деталей или узлов, выверке отдельных узлов, элементов

металлоконструкций, трубопроводов и др., смене масла, проверке креплений и замене вышедших из строя крепежных деталей. Обычно при текущем ремонте проводят внешний осмотр основных узлов и механизмов на наличие течей, различных дефектов, качества затяжки болтовых соединений (проверяют контровку), заменяют сальники, проверяют смазку узлов и заменяют ее, подливают масло в приводной редуктор и т.д. [45].

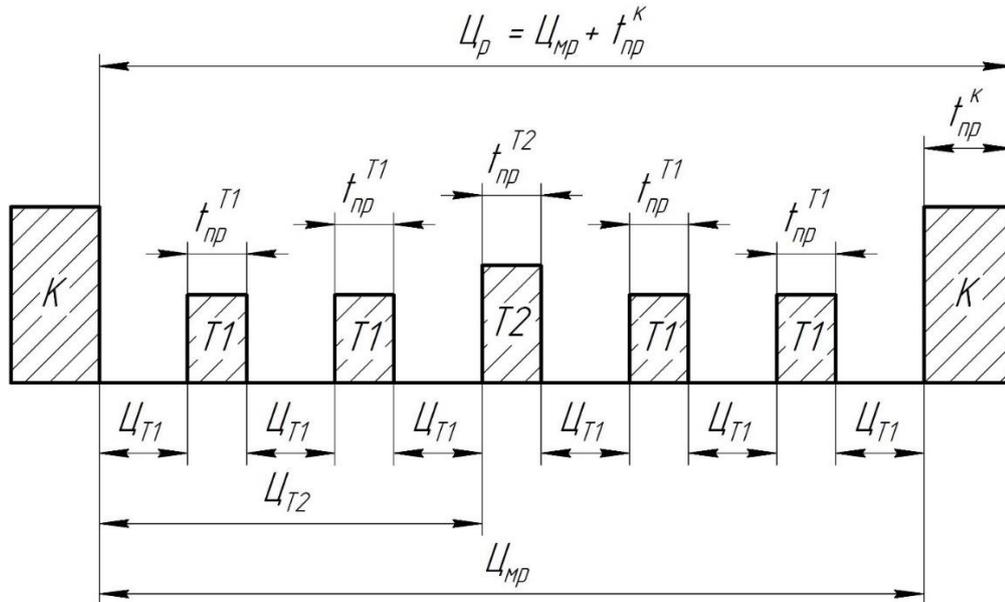


Рисунок 1.3 – Ремонтный цикл для МШР 4,5×5,0: К – капитальный ремонт; Т1 – текущий ремонт; Т2 – средний ремонт; ζ_{MP} – межремонтный период, м/час; ζ_p – принятый ремонтный цикл, ч; ζ_{T1} – периодичность текущего ремонта, м/час; ζ_{T2} – периодичность среднего ремонта, м/час; $t_{пр}^{T1}$ – простой при текущем ремонте, ч; $t_{пр}^{T2}$ – простой при среднем ремонте, ч; $t_{пр}^K$ – простой при капитальном ремонте, ч (составлено автором)

При Т2 среднем ремонте (ТО № 2) производится осмотр уплотнений патрубков, муфт сцеплений, уплотнений подшипников, брони. Производится проверка зазоров в зубчатом зацеплении и износа зубьев, проверка центровки муфт, проверка состояния подшипников приводной шестерни, а также включаются работы ремонта ТО. Все выявленные дефекты должны быть устранены. В данном случае делают все тоже самое что и при текущем ремонте, только с дополнительной

сменой масла в системе, более точной проверке узлов и замене износившихся деталей.

В период проведения капитального ремонта полностью демонтируют барабанную мельницу и ремонтируют, и заменяют все износившиеся в ходе ее функционирования элементы, включая базовые [56].

В процессе эксплуатации для поддержания уровня надежности применяют предупредительную стратегию технического обслуживания, в частности систему планово-предупредительных ремонтов.

1.10 Анализ отказов ресурсопределяющих узлов барабанной мельницы

Основные минусы при эксплуатации барабанных мельниц связаны с повышенными показателями степени износа ее механических элементов. В значительной мере эти показатели являются критическими при интенсивном процессе изнашивания базовых ресурсопределяющих узлов мельниц (рисунок 1.4), к которым относятся: зубчатое зацепление ведущей шестерни и ведомого секторного венца барабана, футеровка внутрибарабанного пространства корпуса, опорные коренные подшипники корпуса [51], передающие момент вращения элементы привода мельницы и т.д.

Перегрев опорных коренных подшипников в процессе своей работы под действием значительных динамических нагрузок [85], засорения системы смазки и неисправности уплотнительных средств является одной из наиболее распространенных причин выхода из строя барабанных мельниц [32]. Опорные подшипниковые узлы, обозначенные позицией 6 на схеме (рисунок 1.4) состоят из баббитовых вкладышей и пустотелых загрузочной и разгрузочной цапф. Возникающие вследствие тепловых процессов неуравновешенности и вибрации в сочетании с высокими удельными нагрузками на коренные подшипники мельницы приводит к неравномерному изнашиванию узлов [17], зазор в подвижном соединении увеличивается, масляная подушка, разделяющая цапфу и баббитовый вкладыш, истончается и опорные коренные подшипники перестают нормально функционировать [32].

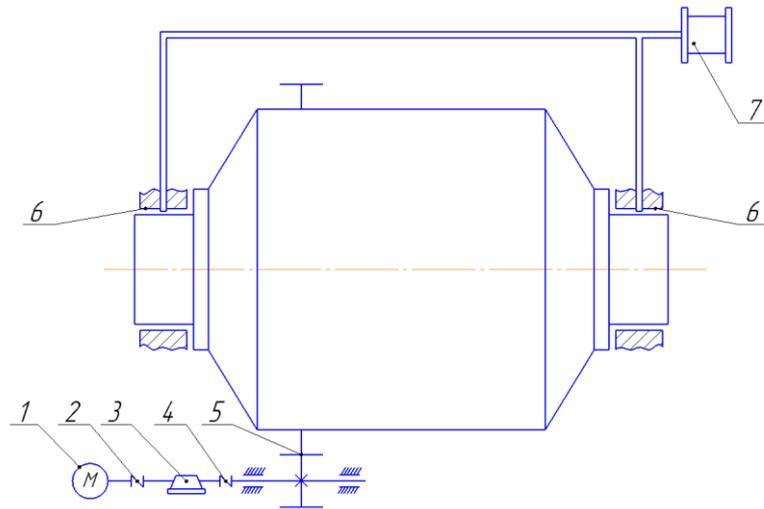


Рисунок 1.4 – Схема базовых конструктивных элементов барабанной мельницы в составе плавучего комплекса горного оборудования:

- 1 – электродвигатель; 2, 4 – муфты; 3 – редуктор; 5 – зубчатое зацепление;
6 – опорные коренные подшипники; 7 – маслостанция (составлено автором)

Вероятность безотказной работы барабанной мельницы в составе свинцово-цинкового ГОКа будет рассчитываться по формуле (1.1):

$$P = P_{ЭЛ} P_{M1} P_{РЕД} P_{M2} P_{З.П} P_{П.С} P_{П.С} P_{М.С} , \quad (1.1)$$

где $P_{ЭЛ}$ – вероятность безотказной работы электродвигателя мельницы;

P_{M1} – вероятность безотказной работы муфты вала электродвигателя и быстрого вала редуктора мельницы;

$P_{РЕД}$ – вероятность безотказной работы редуктора мельницы;

P_{M2} – вероятность безотказной работы муфты тихоходного вала редуктора и ведущей шестерни мельницы;

$P_{З.П}$ – вероятность безотказной работы открытой зубчатой передачи мельницы;

$P_{П.С}$ – вероятность безотказной работы подшипникового узла мельницы;

$P_{М.С}$ – вероятность безотказной работы маслостанции мельницы.

При выкрашивании поверхностного слоя баббитовых вкладышей коренного подшипника, образовавшиеся абразивные частицы способствуют интенсивному изнашиванию уже опорных цапф корпуса, в результате чего на рабочих поверхностях цапф появляются риски, забоины, задиры, вмятины, трещины и сколы, а сам профиль

цапф приобретает конусообразность [106]. Что приводит к потере работоспособности и эффективности работы барабанной мельницы. А также к отказу всей механической опорной части оборудования, что, как следствие, вызывает остановку всей технологической линии обогатительного производства. И если время, затрачиваемое на ремонтно-восстановительные работы баббитовых вкладышей опорных коренных подшипников корпуса мельницы, является сравнительно небольшим, то время, затрачиваемое уже на ремонт пустотелых цапф корпуса мельницы, превышает первое в несколько десятков раз [32]. Износ опорных цапф корпуса также может вызвать наклон шаровой мельницы. В ходе чего в открытом зацеплении зубчатого венца корпуса и ведущей шестерни образуется перекося осей, зацепление перестает нормально работать и подвергается интенсивному изнашиванию, что сопровождается возросшим уровнем шума и приводит к дополнительным простоям.

Отказ коренных подшипников скольжения приводит к простоям оборудования и вызывает самые ресурсозатратные работы по ремонту корпуса мельницы, который выходит из строя вследствие этих отказов, что приводит к отказам самой мельницы в целом и остановке одной из замкнутых цепей горного оборудования, требуя проведение как внеочередных ремонтно-восстановительных работ, так и работ в рамках мероприятий ТОиР [54]. В подтверждении сказанного проводя декомпозицию шаровой барабанной мельницы получим структурную схему (рисунок 1.5). В таблице 1.3 перечислены дефекты, которые могут возникнуть в ходе работы мельницы.

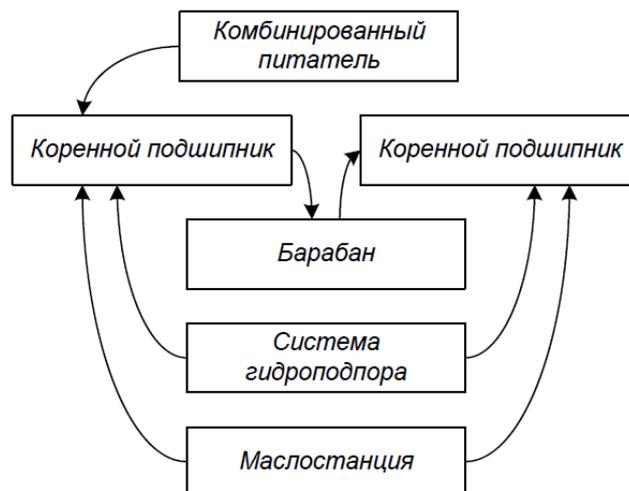


Рисунок 1.5 – Структурная декомпозиция системы барабанной мельницы [39]

Таблица 1.3 – Дефекты, возникающие в процессе эксплуатации барабанной мельницы [39]

Подсистема	Обозначение дефекта	Поток дефектов	Дефект
Коренной подшипник 1 корпуса мельницы	d_1^1	1	Повышение температуры
	d_2^1	1	Снижение давления в клиновом зазоре
	d_3^1	3	Отсутствие смазки
Коренной подшипник 2 корпуса мельницы	d_1^2	1	Повышение температуры
	d_2^2	1	Снижение давления в клиновом зазоре
	d_3^2	3	Отсутствие смазки
Система гидроподпора	d_1^3	2	Забит трубопровод
	d_2^3	2	Износ насоса
Маслостанция	d_1^4	48	Забит фильтр (раз в неделю)
	d_2^4	1	Наличие большого количества воды в масле (постоянно)
	d_3^4	2	Забиты трубы
	d_4^4	2	Износ маслонасоса
Барабан мельницы	d_1^5	3	Ослабление крепежа боковой футеровки
	d_2^5	4	Повреждение сливной решетки
	d_3^5	3	Раскол боковой футеровки
	d_4^5	2	Низкое качество шабровки
	d_5^5	2	Нарушение баббитовой заливки
	d_6^5	1	Наличие инородных тел в баббитовой заливке
	d_7^5	2	Неравномерное прилегание цапфы на баббитовую поверхность
Комбинированный питатель	d_1^6	3	Пронос черпаков
	d_2^6	2	Ослабление крепежа
	d_3^6	1	Износ насадок черпаков
	d_4^6	1	Износ заходной спирали

Оценка запаса живучести для системы шаровой барабанной мельницы в предположении равенства потоков дефектов всех подсистем, которые считаются простыми с нулевым запасом живучести дал результат 1,92. «Критерий живучести

системы хорошо приспособлен в качестве показателей ее структурно-надежностного совершенства. Повышения надежности системы вместе с уменьшением вероятности возникновения в ней дефектов имеет важное значение для оценки безопасности работы технологической системы» [39].

В процессе эксплуатации основными дефектами пустотелых цапф являются: коррозионный и абразивный износ, а также задиры и смятие поверхностей цапф. Восстановление осуществляется наплавкой, протачиванием с последующим шлифованием. Что касается вкладышей подшипников, то в качестве дефектов выступает износ, усталостное разрушение, кольцевые риски, выплавление баббита. Эти дефекты нивелируют наплавкой, перезаливкой баббита и шабрением поверхностей.

1.11 Теротехнологический подход к поддержанию уровня готовности барабанной мельницы в составе оборудования дезинтеграции

Сложные объекты длительного срока применения требуют постоянного технического обслуживания и ремонта на протяжении всего их периода эксплуатации для сохранения заданной производительности при высоком уровне готовности и минимизации рисков отказов системы элементами которой они являются [33].

Теротехнология – обеспечение эффективной работы оборудования в течение всего срока его службы с учётом технических, технологических и организационных факторов и связей между ними. Неотъемлемой частью и основой такой технологии является техническое обслуживание и ремонт оборудования. Теротехнологический подход позволяет удерживать заданную производительность отдельных машин и их комплексов при оптимизации затрат в период эксплуатации с учетом действующих технических, технологических и организационных факторов, как эргатической системы [84]. Это предоставляет дополнительные возможности для улучшения конструкции и производства эксплуатируемого оборудования создавая и используя обратные связи при широком применении диагностических процедур в его регламентном техническом обслуживании [33].

Для минимизации потерь при остановке технологического процесса и продления срока эксплуатации технологической линии горного оборудования дезинтеграции необходимо заблаговременно разрабатывать адаптивные системы оценки технического состояния ресурсопределяющих элементов оборудования [50]. А также при невозможности дальнейшего нормального функционирования оборудования без вмешательства по проведению ремонтно-восстановительных операций ресурсопределяющих узлов – иметь специальные комплекты механизированных ремонтных модулей, которые в условиях ограниченного пространства и низкой маневренности ресурсов могут быть установлены на, под или рядом с восстанавливаемым оборудованием или его узлом [8]. Наличие таких комплектов позволит не только сократить время нахождения оборудования в ремонте, но и предупредить возникающие деграционные процессы, в рамках инновационной адаптивной стратегии поддержания надежности оборудования посредством теротехнологии [34].

1.12 Техническое обслуживание и ремонт опорных подшипников как ресурсопределяющих узлов барабанной мельницы

1.12.1 Анализ традиционных методов ремонта цапф барабанной мельницы

Износ опорного подшипникового узла скольжения барабанной мельницы представляет собой сложный процесс, в котором ключевую роль играют взаимодействие баббитовых вкладышей и поверхностей цапф. Наиболее часто встречающейся причиной выхода из строя является абразивный износ сопряженных поверхностей, который приводит к их механическому разрушению. При абразивном износе вкладыши приобретают овальную форму, что существенно влияет на работоспособность всего узла, где опорная цапфа впоследствии длительной эксплуатации приобретает форму усеченного конуса. Поэтому особое внимание необходимо уделять и защите рабочих поверхностей цапф и вкладышей от задиров, которые могут возникать при перегреве подшипника [43]. При высоких температурах происходит снижение вязкости смазочного материала, что приводит к местным разрывам масляной пленки и прямому контакту трущихся поверхностей. В

результате вкладыш нагревается, и цапфа может частично или полностью захватить его [119]. Усталостное выкрашивание поверхностей вкладышей часто наблюдается под действием пульсирующих удельных нагрузок. Этот процесс может усугубляться отслоением фрикционного слоя под влиянием вибрационных или ударных нагрузок [44]. Износ цапф может также является следствием результата неточного, несоосного изготовления подшипников и самих цапф или их ремонта и последующего повторного монтажа.

Для минимизации возникновения аварийных отказов опорных подшипниковых узлов скольжения барабанной мельницы и выхода из строя оборудования, необходимо восстанавливать геометрию рабочего профиля цапфы, например: наплавкой изношенной поверхности специальным материалом с осуществлением последующей механической обработкой в необходимый ремонтный размер. Ремонт опорных цапф непосредственно на месте эксплуатации и установки барабанной мельницы носит сложноосуществимый характер. Поэтому зачастую их ремонтируют на сторонних предприятиях (рисунок 1.6). Однако, перед непосредственным осуществлением ремонтных мероприятий пустотелых опорных цапф необходимо произвести демонтаж подшипниковых узлов, для чего последовательно выполняют следующие действия:

- 1) снять сальниковые уплотнения подшипников;
- 2) отвернуть болты и снять при помощи подъемного механизма крышки опорных подшипников скольжения;
- 3) выложить под барабан клетку из шпал и установить набор домкратов грузоподъемностью 25-50 т.;
- 4) поднять корпус барабана на 100-150 мм относительно плоскости базирования домкратов и расклинить его на шпалах, после чего освободить опорные домкраты;
- 5) скрутить болтовые соединения баббитовых вкладышей и отсоединить их друг от друга, застопорить и снять с цапф путем проворота вокруг их осей вращения.

После выполнения вышеперечисленных действий демонтируют уже сам корпус барабана мельницы путем отсоединения болтовых соединений между

фланцами корпуса барабана и фланцами торцевых крышек с опорными цапфами. Данная процедура необходима для последующей обработки опорных цапф, расположенных на торцевых крышках, на стационарных металлообрабатывающих станках.

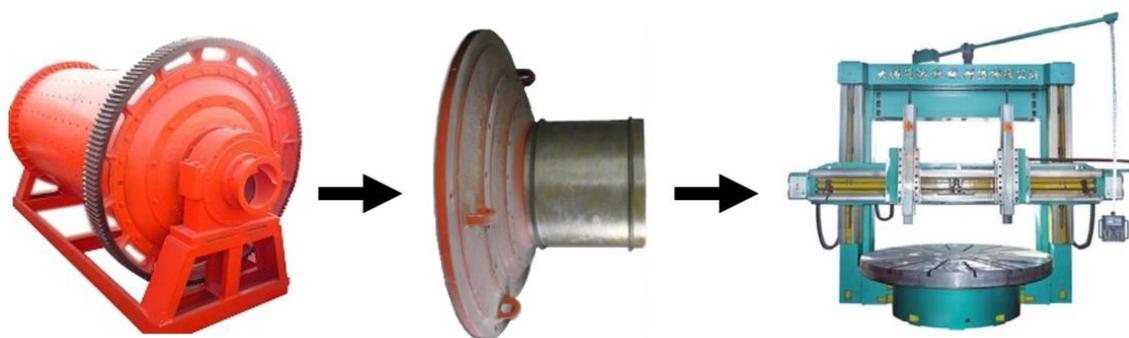


Рисунок 1.6 – Последовательность проведения ремонта подшипниковых цапф барабанной мельницы при традиционном способе (составлено автором)

После демонтажа пустотелые цапфы с крышками проходят тщательную очистку: их обезжиривают уайт-спиритом или керосином и высушивают. Далее проводится контроль состояния поверхностей - как визуальный, так и с помощью цветной дефектоскопии, что позволяет выявить имеющиеся дефекты. Устранение обнаруженных повреждений осуществляется следующим образом: сначала определяется зона дефекта, затем производится восстановление поврежденного слоя. В зависимости от характера повреждений применяются различные методы: разделка и последующая заварка, наплавка металла или напыление (особенно при незначительных и локальных дефектах). После восстановления наплавленный слой подвергается токарной обработке на специализированном оборудовании и шлифуется. Для выполнения этих работ цапфы с крышками транспортируются в ремонтные цеха, оснащенные необходимым оборудованием для обработки крупногабаритных тел вращения, включая карусельные станки с числовым программным управлением. Небольшие дефекты, такие как вмятины, забоины, задиры и царапины глубиной до 0,2 мм, устраняются путем полировки специальным абразивным порошком в масляной среде.

Когда все дефекты устранены поверхности цапф повторно обезжиривают и вытирают насухо. После шлифовки проверяют поверхности цапф на круглость

(допуск должен составлять не более 0,05 мм) и цилиндричность (допускается не более 0,08 мм).

Ввиду значительного веса барабана мельницы подача его на фундамент после установки подшипников сильно затруднена, поэтому корпус барабана до начала монтажа устанавливается на шпальную выкладку, выложенную на фундаменте с таким расчетом, чтобы не мешать в дальнейшем установке подшипников. Если на месте установки нет достаточных подъемных средств, то корпус барабана накатывают на шпальную выкладку.

Ввиду значительного веса барабана мельницы подача его на фундамент после установки подшипников сильно затруднена, поэтому корпус барабана до начала монтажа устанавливается на шпальную выкладку, выложенную на фундаменте с таким расчетом, чтобы не мешать в дальнейшем установке подшипников. Если на месте установки нет достаточных подъемных средств, то корпус барабана накатывают на шпальную выкладку.

Подогнанные вкладыши устанавливают в корпуса подшипников, поверхность цапф смазывают краской и барабан опускают на вкладыши, после чего поворачивают на 30-40° в обе стороны. Далее тали, поддерживающие вкладыш, ослабляют и после покачивания на цапфе снимают вкладыш, поднимают и закрепляют барабан, вынимают вкладыши и по следам краски на баббите производят доводочное шабрение, обеспечивая зазоры и карманы под масляную подушку в соответствии с нормами, указанными в технической документации на ремонт. Степень прилегания подшипников по баббиту проверяется методом прокрутки барабана от вспомогательного привода или лебедки. При этом добиваются, чтобы на каждом квадратном сантиметре поверхности соприкосновения получилось не менее двух пятен краски.

На установленные фундаментные рамы монтируют опорные платформы, на которые устанавливают нижние корпуса коренных подшипников. Восстановленные поверхности пустотелых цапф обезжиривают и после и насухо вытирают тряпками, после чего обильно смазывают густой смазкой на масляной основе. Затем собирают уплотнение вкладыша и крышки и устанавливают масляную трубку крышки.

Нижний вкладыш в опрокинутом положении укладывают на цапфу, проворачивают его на четверть окружности и фиксируют в этом положении. Второй вкладыш подшипника устанавливают в верхнюю крышку подшипникового узла, опускают мельницы на цапфы и сверху закрывают крышками проворачивая, чтобы мельница плавно села по цапфам в рабочее положение. По окончании сборки обоих подшипников, устанавливая барабан по цапфам и проверяют центровку.

После каждого капитального ремонта производят центровку мельницы с приводом, редуктором и электродвигателем. Плохая центровка и всевозможные перекосы между осями, усиливая вибрацию агрегата, вызывают преждевременный износ деталей и приводит к тому, что подшипниковые узлы не успевают отработать заложенный в них конструкторами ресурс.

В качестве примера, согласно графику ремонта ШБМ диаметром барабана 3,2 м и длиной 15 м, эксплуатируемую на заводе ЗАО «Белгородский цемент», простой линии в период проведения капитального ремонта составляет 390 часов. Из них около 100 часов уходит только на ремонт пустотелых опорных цапф, при этом недовыпуск продукции оценивается в 5500 тонн. С целью сокращения подобных возникающих трудозатрат и потерь необходима разработка технологии ремонта цапф мельницы на месте ее установки и эксплуатации без проведения дополнительных монтажно-демонтажных работ ее корпуса [10].

1.13 Контроль технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы в процессе эксплуатации

Для обеспечения безотказной работы барабанной мельницы, необходимо предусматривать контроль технического состояния ее подшипников. Техническое диагностирование, действуя на основе изучения динамики изменения показателей технического состояния, решает вопросы прогнозирования остаточного ресурса и безотказной работы оборудования в течение определенного промежутка времени [9].

Техническое диагностирование, представляя собой элемент системы технического обслуживания оборудования, позволяет изучать и устанавливать признаки неисправности объекта, устанавливать методы и средства, при помощи

которых делается заключение о наличии неисправностей (дефектов). Мониторинг состояния помогает не только предотвратить внезапный выход деталей и узлов оборудования из строя, но и заранее определить реальный срок их службы, что способствует разработке целесообразного плана своевременных остановок оборудования и проведения ремонтных работ [13].

Система мониторинга (технического состояния оборудования) – совокупность процедур, процессов и ресурсов, реализованных с использованием диагностической сети, позволяющая по результатам измерений заданных параметров в заданных точках и наблюдений за работой оборудования получить информацию о текущем техническом состоянии оборудования, опасностях и рисках, связанных с его применением, требуемых действиях обслуживающего персонала и другие сведения, необходимые для реализации установленных предупреждающих мер [55]. Для оценки состояния коренных подшипников барабанной мельницы возможен целый ряд методов.

1.13.1 Анализ видов оценки технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы

Динамические напряжения, возникающие в поверхностном слое материала, оцениваются не всегда надежно, и при эксплуатации возможны разрушения (усталостная деформация и выкрашивание). Этим разрушениям предшествуют: образование каверн, питтинга в местах контакта, причем отказ наступает по истечении некоторого периода времени, необходимого для развития неисправности до критического уровня. В процессе развития неисправности поток масла системы смазки систематически уносит продукты разрушения. Масло в этом случае служит носителем информации о возможных неисправностях. Методы трибодиагностики базируются на принципе обнаружения, улавливания и удержания металлических частиц износа. Для этой цели используются: магнитные пробки; электрические детекторы, вырабатывающие сигнал при замыкании электродов частицами; спектральный анализ масла; анализ изменения формы

частиц, их поверхности; рассеивание и ослабление пучка света при прохождении через поток масла; анализ электрического сопротивления масла.

Но несмотря на то, что методы трибодиагностики основаны на вполне логичном принципе обнаружения частиц износа в масле, их эффективность существенно снижается из-за ряда факторов. Во-первых, современные системы фильтрации с ячейками 15 мкм и менее эффективно улавливают большинство частиц износа, не давая им достичь контрольных точек диагностики. Это приводит к тому, что даже при наличии интенсивного износа частицы могут не попасть в пробоотборник для анализа. Во-вторых, периодичность отбора проб масла (обычно 50 часов и более) не позволяет своевременно отследить развитие неисправности, так как частицы износа выводятся из масляной системы с периодичностью около 30 секунд при циркуляции масла. В-третьих, при использовании более совершенных фильтров и систем очистки масла старые нормативы предельных концентраций металлов становятся неактуальными, что затрудняет правильную интерпретацию результатов диагностики. Все это приводит к тому, что даже при наличии объективных методов анализа, таких как феррография и спектральный анализ, они не всегда справляются со своей главной задачей - ранним прогнозированием отказа [112].

Акустическая эмиссия представляет собой колебательный волновой процесс, возникающий в деталях, если в кристаллических решетках их материалов происходят необратимые процессы разрушения с образованием микротрещин. Этот колебательный процесс может фиксироваться пьезодатчиком, установленным на контролируемой детали. Или для определения места нахождения дефекта могут использоваться несколько датчиков, расположенных вне детали, генерируемой акустические сигналы [77].

Однако, несмотря на кажущуюся эффективность метода акустической эмиссии, его практическое применение сталкивается с рядом существенных ограничений. Прежде всего, точность определения местоположения дефекта значительно снижается в условиях сложного рельефа поверхности контролируемого объекта, что затрудняет корректную интерпретацию сигналов от нескольких датчиков.

Существенной проблемой является также высокая чувствительность метода к внешним вибрациям и механическим воздействиям, которые могут создавать ложные сигналы и затруднять идентификацию реальных дефектов. К тому же, пьезодатчики демонстрируют нестабильность показаний при изменении температуры окружающей среды, что требует постоянной калибровки оборудования в процессе контроля. Наконец, высокая стоимость специализированного оборудования и необходимость привлечения квалифицированных специалистов существенно ограничивают широкое применение акустической эмиссии в производственной практике.

При работе машины все ее детали, узлы, агрегаты совершают вынужденные и резонансные колебания. Эти колебания зависят от величины и характера возмущающих сил, их частот, от упруго-массовых характеристик элементов конструкции, которые, в свою очередь, зависят от ряда конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов [75].

Хотя описание колебаний в машинах представляется достаточно полным, оно не учитывает ряд важных аспектов, влияющих на реальную эксплуатацию оборудования. Прежде всего, при анализе колебаний не учитывается влияние износа деталей и изменения их геометрических параметров в процессе работы, что существенно влияет на характеристики вынужденных колебаний и может приводить к появлению новых резонансных частот. Существенным недостатком является также отсутствие упоминания о влиянии температурных деформаций на упруго-массовые характеристики элементов конструкции, что особенно критично для высоконагруженных узлов. Также имеет место и влияние внешних факторов окружающей среды, таких как вибрация фундамента и воздействие других работающих механизмов, что существенно вносит погрешность при оценке технического состояния работы оборудования. Отсутствие упоминания о влиянии качества сборки и монтажа также является существенным пробелом, поскольку эти факторы напрямую определяют начальные условия возникновения колебаний.

Шум работающего агрегата складывается из шумов аэродинамического и механического происхождения, спектральный состав которых может меняться от внешних условий, режима работы и его состояния. Шум исправной машины по

своему спектральному составу сплошной во всем диапазоне частот с рядом дискретных составляющих. Появление неисправностей приводит к появлению новых источников шума и изменению спектра шума работы объекта. Несмотря на корректное описание основных источников шума и их характеристик, представленный подход не учитывает ряд важных факторов, влияющих на акустическую картину работающего агрегата. Прежде всего, при анализе не рассматривается влияние нелинейных эффектов и их воздействие на спектральный состав шума, что может приводить к появлению дополнительных гармоник и искажению реальной картины. Существенным недостатком является также отсутствие упоминания о влиянии конструктивных особенностей конкретного оборудования на характер генерируемого шума.

Температура как количественный показатель внутренней энергии тел является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах. Анализ тепловых процессов позволяет получить разнообразную информацию о состоянии объектов и протекании физических процессов. В отличие от других методов диагностики, температурный контроль менее подвержен влиянию внешних факторов [21]. Например, методы трибодиагностики существенно ограничены современными системами фильтрации, которые эффективно улавливают частицы износа. Вибродиагностика и акустическая эмиссия страдают от внешних вибраций и шумов производства. Температурный же контроль позволяет более объективно оценивать состояние оборудования, так как тепловые процессы менее подвержены внешним возмущениям.

Однако для эффективного применения температурного анализа необходимо обеспечить высокую точность измерительного оборудования, способного фиксировать минимальные изменения температуры в исследуемых объектах. Требуется использование калиброванных датчиков с равномерной температурной чувствительностью по всей области измерений, что позволит получать достоверные данные о температурных полях. Необходимо обеспечить стабильность теплового

режима исследуемых объектов в процессе измерений, исключая резкие перепады температур, которые могут привести к некорректным результатам. Важно применять методы компенсации тепловых потерь и учитывать теплопроводность материалов, из которых изготовлены исследуемые объекты. Необходимо учитывать и влияние температурных деформаций материалов на результаты измерений и корректировать полученные данные с учетом этих изменений [66].

В настоящее время термографическая диагностика и тепловой контроль представляет собой высокотехнологичную область прикладных исследований, объединяющую достижения не только в создании аппаратуры (тепловизоров), но и в теории теплопередачи, информационных и компьютерных технологиях [117].

Несмотря на то, что термографическая диагностика подшипниковых узлов барабанных мельниц считается современным и эффективным методом контроля, данный подход имеет ряд существенных ограничений, особенно при эксплуатации оборудования в сложных производственных условиях. Прежде всего, необходимо отметить, что тепловизионный контроль требует строгого соблюдения условий проведения измерений, включая отсутствие внешних источников теплового излучения и стабильного температурного фона окружающей среды, что далеко не всегда возможно обеспечить на действующем горно-обогатительном комбинате.

При диагностике подшипниковых узлов важно учитывать, что повышение температуры не всегда является прямым индикатором износа или неисправности. Например, при высоких нагрузках на подшипники и цапфы, характерных для барабанных мельниц, естественный нагрев в некоторых случаях может достигать предельно допустимых значений в 70 °С, что затрудняет дифференциацию между нормальным режимом работы и началом развития дефекта. Кроме того, неравномерный нагрев различных участков подшипника может быть связан не только с износом, но и с особенностями распределения смазочного материала, что требует дополнительных методов верификации полученных данных.

Существенным недостатком термографической диагностики является её ограниченная способность выявлять внутренние дефекты подшипниковых узлов, особенно на ранних стадиях их развития. При этом критический износ цапф может

длительное время не проявляться в виде заметного повышения температуры, что создаёт иллюзию нормальной работы узла. Также стоит отметить, что при использовании тепловизоров сложно получить точные количественные характеристики температурного поля из-за влияния различных факторов: скорости вращения, нагрузки, состояния смазочной системы и конструктивных особенностей конкретного подшипника.

Несмотря на эти ограничения, термографическая диагностика остаётся важным инструментом в системе мониторинга подшипниковых узлов, особенно в сочетании с другими методами контроля, такими как вибродиагностика и анализ состояния смазочных материалов. Комплексный подход позволяет нивелировать недостатки каждого отдельного метода и обеспечить надежную оценку технического состояния оборудования. В том числе она может быть значительно улучшена при измерении температуры непосредственно внутри эксплуатируемого узла, считывая температуры при максимально возможной близости к месту контактного взаимодействия масляной пленки, опорной цапфы и вкладыша подшипника.

Качественно новым этапом развития активного способа теплового контроля (АТК) является формирование таких направлений, как тепловая дефектометрия и томография. Хотя тепловая дефектометрия и томография позиционируются как передовые направления активного теплового контроля, их внедрение сталкивается с серьезными техническими и практическими проблемами. Прежде всего, методы демонстрируют недостаточную чувствительность при обнаружении микротрещин и мелких дефектов, что критически важно для предиктивной диагностики оборудования [88]. Существенным недостатком является также зависимость результатов от начальной температуры объекта и условий окружающей среды, что требует сложной предварительной подготовки и калибровки оборудования перед каждым исследованием. Практическое применение методов осложняется необходимостью длительного времени измерения для получения достоверных результатов, что существенно снижает производительность контроля. Кроме того, высокая стоимость специализированного оборудования и необходимость

привлечения высококвалифицированных специалистов делают эти технологии экономически целесообразными только для ограниченного круга задач. В результате, несмотря на теоретическую привлекательность методов, их практическое применение остается ограниченным узким спектром специфических задач контроля.

Температурный контроль также хорошо интегрируется с другими методами диагностики. Например, при обнаружении повышения температуры можно дополнительно применить методы анализа смазочных материалов или вибродиагностику для уточнения характера неисправности. Такой комплексный подход существенно повышает достоверность получаемых результатов.

1.13.2 Оценка технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы на основе применения карт Шухарта

Современные методы температурного анализа позволяют не только фиксировать текущие значения, но и строить тренды изменения температуры во времени. Это дает возможность прогнозировать развитие неисправностей и планировать профилактические мероприятия [59]. Особенно эффективен подход с использованием карт Шухарта, позволяющий в режиме реального времени отслеживать отклонения от нормального показателя и своевременно принимать корректирующие меры.

Контрольная карта Шухарта – это визуальный инструмент для статистического контроля стабильности процессов различного вида. Основной целью карт Шухарта является выявление точек выхода процесса из стабильного состояния и установление причин этих отклонений с последующим их устранением и стабилизацией процесса [59]. Для этого на контрольную карту процесса чаще всего наносятся три ключевые линии: центральная линия, представляющая собой среднее значение или медиану, нижняя контрольная граница и верхняя контрольная граница.

Структура контрольной карты позволяет отслеживать изменение параметров процесса во времени и определять границы системной вариативности. При этом

контрольные границы рассчитываются по специальным формулам и не связаны с допусками процесса. Они показывают зону системной variability, внутри которой должны находиться значения при стабильном установившемся состоянии процесса. Нарушение стабильности процесса можно определить по нескольким характерным признакам: выходу точек за контрольные границы, наличию семи и более последовательных точек по одну сторону от средней линии или шести и более точек с монотонным возрастанием или убыванием.

В зависимости от типа измеряемых данных и выборочного параметра различают различные виды карт Шухарта. Они могут быть качественными и количественными, а также различаться по выборочному параметру: карты индивидуальных значений, карты скользящих размахов, карты средних значений, карты среднеквадратического отклонения, карты медианы и карты размаха.

Практическое применение контрольных карт позволяет эффективно контролировать качество процессов, своевременно принимать решения о необходимости корректировки и прогнозировать поведение процесса, выявляя отклонения исследуемого процесса на ранних стадиях и принимая меры по предотвращению их возникновения в будущем, что способствует повышению эффективности в целом [59, 60].

1.14 Выводы по главе 1

На основании проведенного анализа состояния вопроса можно сделать следующие выводы:

1. Горно-обогатительная отрасль России сталкивается с проблемой истощения богатых свинцово-цинковых месторождений и необходимостью разработки труднообогатимых бедных руд. В современных условиях перспективным направлением становится освоение труднодоступных месторождений Арктики с применением климатически сберегающих технологий и наилучших доступных технологий (НДТ);

2. Уровень готовности горного оборудования определяется множеством факторов, включая условия эксплуатации, техническое состояние, квалификацию

персонала и доступность запасных частей. Для обеспечения эффективной работы необходимо регулярное техническое обслуживание, диагностика и ремонт оборудования, а также разработка и внедрение новых современных технологий мониторинга и обслуживания;

3. Система технического обслуживания и ремонта горных машин требует комплексного подхода, включающего модернизацию технической базы, цифровизацию процессов и обучение персонала. Это позволит снизить себестоимость концентратов на 20-25 % и обеспечить рентабельную разработку месторождений с низким содержанием металлов;

4. Разработка перспективного месторождения «Павловское» требует создания и применение специального плавучего горно-обоганительного комплекса как инновационного решения для освоения арктических месторождений. Такой подход позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду и минимизировать риски разработки проекта;

5. В составе горно-обоганительных комплексов свинцово-цинковых месторождений одним из преобладающих видов оборудования являются барабанные мельницы, которые требуют особого внимания к техническому обслуживанию из-за интенсивного износа подшипниковых узлов, вызванного высокими эксплуатационными удельными нагрузками.

6. Эксплуатация барабанных мельниц на свинцово-цинковых ГОКах требует учета абразивного воздействия частиц руды, высоких нагрузок на подшипниковые узлы и необходимости регулярного контроля состояния пустотелых опорных цапф;

7. Для повышения надежности работы барабанных мельниц необходимо внедрение механизированных модульных комплектов станочного оборудования, позволяющих проводить ремонт подшипниковых узлов без демонтажа корпуса мельницы;

8. Эффективность работы барабанных мельниц напрямую зависит от качества технического обслуживания подшипниковых узлов, точности их обработки и своевременной замены изношенных деталей;

9. Современные тенденции развития горно-обогатительной отрасли требуют постоянного совершенствования технологий эксплуатации и обслуживания барабанных мельниц, особенно их подшипниковых узлов, для обеспечения высокой производительности и качества переработки руды.

10. Эксплуатация барабанных мельниц в условиях ограниченного рабочего пространства создает значительные сложности для диагностики и обслуживания ее ресурсопределяющих узлов, требуя разработки специальных методик и технологий.

11. Даже незначительные отклонения в работе подшипников могут привести к серьезным последствиям, включая аварийные ситуации, что подчеркивает необходимость своевременного выявления дефектов и прогнозирования их остаточного ресурса.

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

Основные задачи исследования:

1. Обосновать выбор индикатора для оценки технического состояния опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы;

2. Установить функциональные зависимости изменения температуры опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения от отклонения формы поверхностей цапф с учетом эксплуатационных нагрузок;

3. Разработать алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы на месте ее эксплуатации, основанный на анализе изменения температуры подшипников с применением карт Шухарта;

4. Разработать техническо-технологическое решение для повышения уровня технологичности ремонтно-восстановительных работ цапф барабанной мельницы.

ГЛАВА 2 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Разработка эффективных методов оценки технического состояния подшипниковых узлов в условиях ограниченного пространства позволит существенно повысить надежность работы барабанных мельниц и минимизировать простои оборудования в ремонте. Что, в свою очередь, обеспечит более стабильную работу всего производственного процесса в рамках ГОКа, повысив его экономическую эффективность.

2.1 Адаптивная структура системы технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов барабанной мельницы в условиях эксплуатации в ограниченном рабочем пространстве

Основными целями управления техническим обслуживанием и ремонтом горного технологического оборудования являются обеспечение безопасной эксплуатации, минимизация затрат на техническое обслуживание и ремонты, а также обеспечение бесперебойного функционирования производственных процессов. Достижение этих целей обеспечивается проведением комплекса технологических операций и организационных действий по поддержанию работоспособности горной машины при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании.

В процессе эксплуатации машин и оборудования их ресурс вырабатывается как из-за естественных деградиационных процессов, так и под влиянием внешних и внутренних факторов. К ним относятся конструктивные особенности, горные и горно-геологические условия работы, воздействие окружающей среды, принятая система технического обслуживания, а также ряд эргатических факторов, включающих управление горной машиной, организацию работ и политику руководства предприятия (рисунок 2.1).

Система технического обслуживания представляет собой совокупность взаимосвязанных средств, документации и исполнителей, необходимых для

поддержания и восстановления объектов технического обслуживания [120]. Техническое обслуживание включает в себя все технические и административные действия, направленные на поддержание или восстановление объекта в работоспособное состояние.

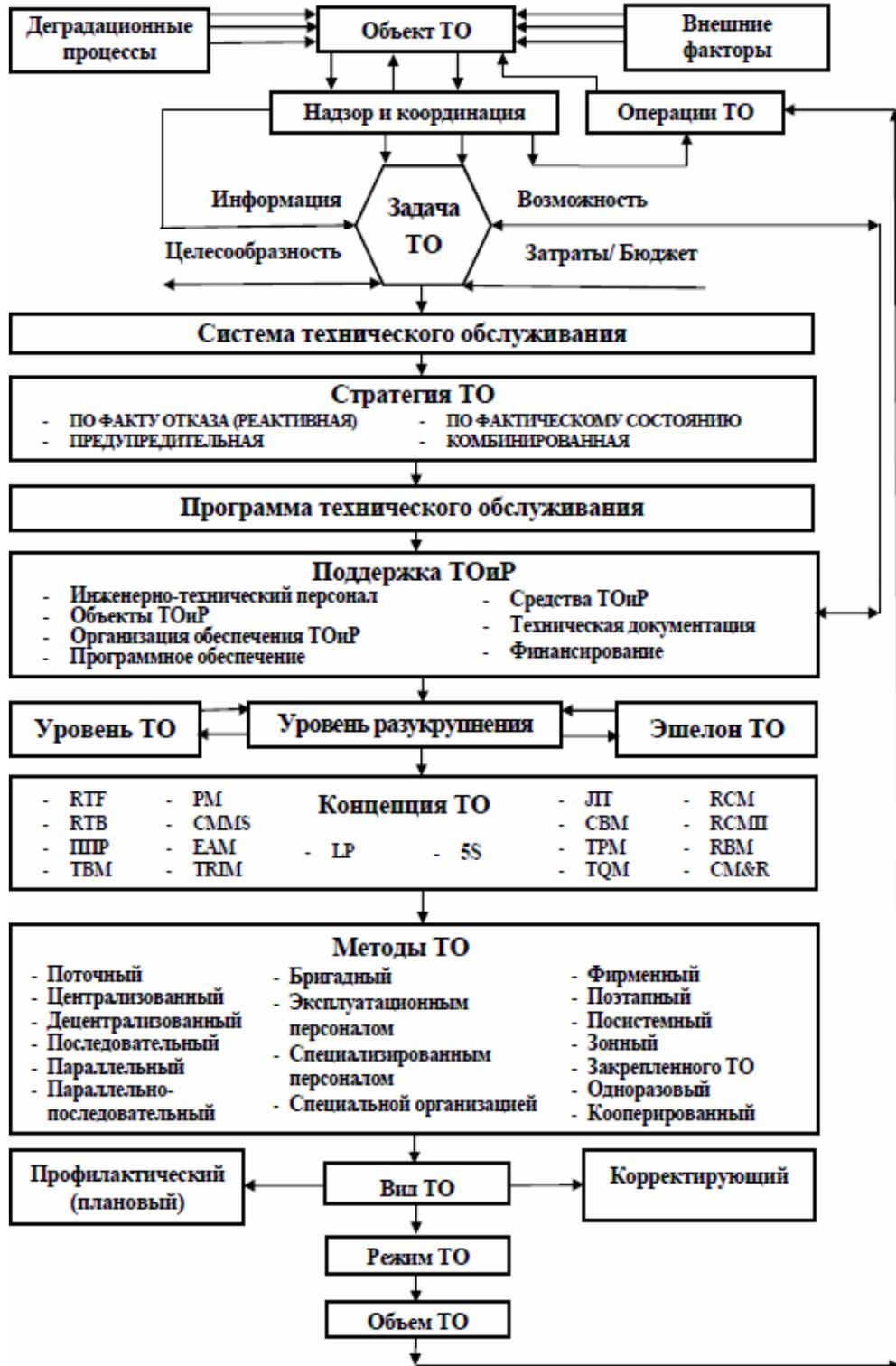


Рисунок 2.1 – Структурная схема технического обслуживания (составлено автором)

В настоящее время широко используются четыре основные стратегии технического обслуживания: реактивная (по факту отказа), предупредительная (по регламенту), обслуживание по фактическому состоянию и комбинированная стратегия. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки, и выбор конкретной стратегии зависит от специфики оборудования и условий его эксплуатации.

Программа ТОиР устанавливает стратегии, количественные характеристики видов ТОиР, порядок их корректировки на протяжении срока службы оборудования. Она включает процедуры и порядок проведения осмотров, планового ТО, ремонта и капитального ремонта, а также контроль деградиационных процессов и конструктивные доработки.

Управление техническим обслуживанием требует координации всех необходимых ресурсов: инженерно-технического персонала, объектов обслуживания, организационных ресурсов и документации. Эффективность системы ТОиР обеспечивается правильной организацией структуры обслуживания, включающей различные уровни разукрупнения объекта и соответствующие линии технического обслуживания [121].

Реализация выбранной концепции технического обслуживания осуществляется различными методами, отличающимися совокупностью технологических и организационных правил выполнения операций. К ним относятся поточный, централизованный, последовательный, параллельный, бригадный и др. Каждый метод имеет свои особенности применения в зависимости от конкретных условий эксплуатации оборудования.

Адаптивная система технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов барабанной мельницы представляет собой комплексный подход к обеспечению надежной работы оборудования. В основе системы лежит комбинированный иерархический принцип организации, учитывающий специфику эксплуатации мельницы и особенности работы подшипниковых узлов. Ключевым элементом является постоянный мониторинг технического состояния подшипниковых узлов с прогнозированием их остаточного ресурса, что позволяет

своевременно планировать ремонтные работы и предотвращать аварийные ситуации.

Процесс обслуживания начинается с ежедневного контроля состояния подшипниковых узлов оперативным персоналом, который включает оценку температурных режимов, состояния смазочных материалов и общего технического состояния. Периодические осмотры позволяют более детально проанализировать работу узлов, провести диагностику вибрационных характеристик и оценить эффективность системы смазки. Особое внимание уделяется состоянию масла, которое является важнейшим показателем работоспособности подшипниковых узлов.

Система планирования ремонтных работ охватывает несколько уровней: оперативный контроль с ежедневным мониторингом состояния узлов, тактические осмотры для детальной оценки технического состояния и стратегическое планирование капитального ремонта. При этом график работ корректируется в зависимости от фактического состояния подшипниковых узлов, что позволяет оптимизировать затраты на обслуживание.

Эффективность системы обслуживания подшипниковых узлов обеспечивается оперативным реагированием на нештатные ситуации и точным прогнозированием остаточного ресурса узлов. Это приводит к значительному улучшению эксплуатационных показателей: снижению простоев оборудования, оптимизации использования ремонтного персонала и сокращению затрат на внеплановые ремонты. При этом обеспечивается стабильная работа мельницы в различных режимах эксплуатации [52]. Контроль качества обслуживания осуществляется через комплексную систему: документирование результатов мониторинга, анализ статистических данных, корректировку методик обслуживания.

Особое внимание уделяется качеству ремонтных работ. При капитальном ремонте производится полное восстановление цапф: от наплавки до финишной шлифовки. Для этого используются специальные нестационарные станки,

позволяющие проводить обработку на месте установки мельницы, сокращая время нахождения оборудования в ремонте.

Таким образом, система технического обслуживания представляет собой комплексный механизм, направленный на обеспечение заданного уровня готовности горного оборудования при оптимальном использовании всех видов ресурсов. Обладая иерархической структурой и взаимосвязанными элементами, она способна эффективно обеспечивать работоспособность оборудования на протяжении всего срока его службы с учетом всех технических, технологических и организационных факторов [109]. Система также предусматривает создание запасного фонда комплектующих и расходных материалов, что позволяет оперативно проводить замену изношенных деталей без длительных простоев оборудования. Все ремонтные работы документируются, ведется статистика отказов и ремонтов, что позволяет постоянно совершенствовать систему ТОиР.

2.1.1 Мониторинг по величине нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковых узлах барабанной мельницы

Работоспособность гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы определяется стабильностью работы системы принудительной подачи смазочного материала и точностью поддержания давления в масляном слое. В отличие от гидродинамических аналогов, где смазочная пленка формируется за счет вращения цапфы, гидростатические подшипники требуют постоянной подачи масла под высоким давлением через специальные карманы, что обеспечивает принудительное разделение трущихся поверхностей даже при отсутствии движения. Ключевым фактором надежности таких узлов является сохранение заданного давления в системе, которое должно превышать внешние нагрузки, действующие на подшипник [122].

В процессе эксплуатации гидростатических подшипников критически важно контролировать геометрию рабочих поверхностей цапфы и вкладыша, так как их износ приводит к увеличению зазоров и падению давления в масляном слое. При снижении давления ниже критического значения, составляющего, например, 4,5

МПа для типовых конструкций барабанных мельниц, происходит контакт металлических поверхностей, сопровождающийся интенсивным износом и локальным перегревом. Это вызывает нарушение режима смазки, что, в свою очередь, провоцирует лавинообразное нарастание дефектов.

Основное условие корректной работы гидростатического подшипника выражается неравенством (2.1):

$$P \geq P_{кр}, \quad (2.1)$$

где P – рабочее давление в смазочном слое, МПа;

$P_{кр}$ – критическое давление, необходимое для полного разделения поверхностей цапфы и вкладышей подшипника, МПа.

Особенностью эксплуатации гидростатических подшипников в барабанных мельницах является их подверженность переменным нагрузкам, связанным с циклическим характером работы оборудования. При резком изменении внешней нагрузки, например, при пуске мельницы или остановке, давление в масляном слое может колебаться в пределах 20-25 % от номинального значения, что требует наличия системы автоматического регулирования подачи смазки. Нестабильность давления приводит к микроперемещениям цапфы относительно вкладыша, которые, несмотря на малую амплитуду (до 0,1 мм), вызывают усталостные повреждения поверхностей.

Поэтому также условием правильной работы подшипника является полное разделение трущихся поверхностей (поверхностей баббитовых вкладышей и поверхностей подшипниковых цапф) масляной пленкой, толщина которой должна превышать сумму неровностей обработки рабочих поверхностей цапфы и вкладыша. При нарушении этого условия возникает контактное трение, являющееся крайне нежелательным явлением. Математически это выражается неравенством (2.2):

$$h < h_{кр}, \quad (2.2)$$

где h – минимальная толщина смазочной пленки, мм;

$h_{кр}$ – критическая толщина смазочной пленки, мм.

Среди методов контроля технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы, представленных в разделе 1.13.1 температурный мониторинг выделяется как наиболее перспективный и информативный. Это обусловлено несколькими ключевыми факторами, делающими данный метод особенно эффективным для диагностики состояния подшипниковых узлов.

Прежде всего, установившейся уровень температуры является универсальным интегральным показателем диссипативных потерь и состояния оборудования. При работе подшипниковых узлов любые отклонения от их геометрических параметров отражаются на температурном режиме. Это позволяет своевременно выявлять зарождающиеся дефекты и предотвращать развитие серьезных неисправностей.

Важным преимуществом температурного контроля является его способность отражать комплексные изменения в состоянии узла. Повышение температуры может свидетельствовать о различных проблемах: от нарушения режима смазывания до механического износа деталей. При этом современные методы термографии позволяют получать детальные температурные поля, что дает возможность локализовать проблемные зоны с высокой точностью.

Особую ценность температурный мониторинг приобретает при работе в условиях ограниченного пространства, характерных для барабанных мельниц. В таких условиях доступ к узлам для проведения детальной диагностики затруднен, а температурный контроль можно осуществлять дистанционно с помощью термодатчиков установленных заранее стационарно непосредственно в крышки подшипниковых узлов, что существенно упрощает процесс мониторинга.

Важно отметить, что современные датчики температуры обладают высокой точностью и позволяют фиксировать минимальные изменения температурного режима. При этом развитие цифровых технологий и внедрение SCADA-систем дает возможность автоматизировать процесс мониторинга, вести постоянный контроль и получать мгновенные уведомления при выходе параметров за допустимые пределы [76].

Таким образом, температурный контроль подшипниковых узлов барабанной мельницы представляет собой наиболее перспективный метод диагностики, сочетающий в себе высокую информативность, объективность результатов, возможность дистанционного мониторинга и хорошую интеграцию с другими методами контроля. Внедрение систем температурного мониторинга позволяет существенно повысить надежность работы оборудования, сократить время простоев и оптимизировать затраты на техническое обслуживание.

2.2 Величина нагрева и интенсивность роста температуры как индикатор оценки технического состояния подшипниковых узлов барабанной мельницы

Важным аспектом является контроль температуры масла, подаваемого в подшипник. При превышении температуры 70 °С вязкость смазочного материала снижается на 30-40 %, что нарушает гидродинамические характеристики слоя и провоцирует падение давления. Для предотвращения этого в системе предусматриваются теплообменники, поддерживающие температуру масла в диапазоне 30-50 °С.

Экспериментальные данные показывают, что при износе уплотнительных кромок карманов более чем на 15 % от первоначальной высоты (0,3-0,5 мм) происходит утечка масла, снижающая эффективность подшипника на 25 %. Это требует регулярного контроля геометрических параметров с периодичностью не реже 1 раза в 500 часов работы.

Для обеспечения надежности гидростатических подшипников критически важна синхронизация работы насосных агрегатов с режимом мельницы. Применение частотно-регулируемых приводов насосов позволяет динамически изменять подачу масла в зависимости от нагрузки, что снижает энергопотребление системы на 18 % и минимизирует риск возникновения масляного голодания. Дополнительно используются датчики давления с погрешностью не более 0,05 МПа, интегрированные в систему автоматизированного управления технологическим процессом.

Таким образом, стабильная работа гидростатических подшипников барабанной мельницы достигается за счет комплексного подхода, включающего прецизионный контроль давления и температуры смазки, мониторинг геометрии рабочих поверхностей и применение адаптивных систем управления [57]. Соблюдение этих условий позволяет увеличить межремонтный период до 15000 часов работы и снизить удельные энергозатраты на 22 % по сравнению с традиционными гидродинамическими решениями.

2.3 Алгоритм проведения мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию температуры в подшипниковых узлах барабанной мельницы

Согласно ГОСТ 18322-2016 (п. 2.2.21) корректирующее техническое обслуживание: «Техническое обслуживание, выполняемое после обнаружения неисправности с целью возвращения объекта в работоспособное состояние».

Алгоритм проведения корректирующего ТО подшипниковых узлов барабанной мельницы начинается с тщательной подготовки, включающей сбор и анализ всей необходимой документации, проверку работоспособности измерительного оборудования и подготовку необходимых инструментов и материалов. На этом этапе критически важно учитывать специфику эксплуатации оборудования в условиях ограниченного рабочего пространства.

Диагностический этап включает в себя первичный мониторинг температурного режима всех подшипниковых узлов с использованием термопреобразователей для фиксации температуры в узлах. При этом особое внимание уделяется выявлению отклонений от нормативных значений и определению проблемных зон. Детальная диагностика предполагает комплексный анализ причин превышения температурного режима, включающий проверку состояния смазочных материалов, оценку работы систем охлаждения и контроль качества монтажа подшипников. Важным аспектом является также проверка центровки узлов, которая может нарушаться под воздействием высоких динамических нагрузок и других специфических факторов при работе барабанных мельниц со свинцово-цинковой рудой.

Корректирующие мероприятия начинаются с оптимизации смазочной системы, что включает замену смазочных материалов при необходимости, очистку смазочных каналов и регулировку подачи смазочных материалов. Параллельно проводится обслуживание систем охлаждения с обязательной очисткой теплообменников, проверкой герметичности системы и контролем расхода охлаждающей жидкости. Механические регулировки предусматривают проверку и корректировку зазоров, центровку подшипниковых узлов, проверку состояния защитных кожухов и регулировку натяга вкладышей в постелях подшипниковых узлов.

На этапе реализации выполняются все запланированные корректировки, включая замену изношенных деталей, регулировку температурных режимов, настройку систем подачи смазки и корректировку работы систем охлаждения. После выполнения всех работ проводится тщательный контроль качества с повторным измерением температуры и проверкой работоспособности всех систем. Результаты фиксируются в технической документации, что позволяет отслеживать динамику изменений и оценивать эффективность проведенных мероприятий.

Заключительный этап включает мониторинг результатов в течение 72 часов, во время которого ведется наблюдение за температурным режимом и фиксируется изменение в работе оборудования. При необходимости проводятся дополнительные корректировки для достижения оптимальных показателей. Документирование выполненных работ включает составление технического отчета, внесение данных в систему мониторинга и разработку рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.

Особое внимание уделяется защите оборудования от коррозии, проверке герметичности узлов и контролю возможности влияния запыленности среды абразивными частицами. Профилактические меры включают ежедневный мониторинг температурного режима, еженедельную проверку систем смазки, ежемесячный контроль состояния подшипников и кварталный анализ работы систем охлаждения. Плановое обслуживание предусматривает регулярную замену

смазочных материалов, проверку состояния защитных покрытий, контроль износа деталей и своевременную замену изношенных элементов.

Критерии успешного выполнения корректирующих мероприятий определяются по нескольким параметрам. В первую очередь оценивается температурный режим, при котором температура подшипников не должна превышать 70 °С, обеспечивается равномерное распределение температурного поля и отсутствие локальных перегревов. Эксплуатационные показатели должны демонстрировать стабильную работу всех систем, отсутствие посторонних шумов, нормальные параметры вибрации и оптимальный расход смазочных материалов. Документальные подтверждения включают полноту заполнения технической документации, своевременное внесение данных в систему мониторинга.

В связи с чем, необходимо уделять особое внимание при эксплуатации корректировке системы смазки подшипниковых узлов барабанных мельниц. Данная система должна обеспечивать непрерывную подачу смазочного материала во все рабочие зоны опорного подшипника скольжения, что критически важно для поддержания его работоспособности до плановой остановки оборудования. Эффективность системы смазки напрямую зависит от способности поддерживать температуру в узлах в номинальных пределах, что достигается путем постоянного мониторинга в режиме реального времени с применением статистических методов контроля качества, в частности, контрольных карт Шухарта, что требует уточнения с помощью проведения комплексных экспериментальных исследований. Такие проведенные исследования, представленные в главе 4 в разделе 4.2, подтверждают необходимость адаптации классических методов гидродинамической смазки к условиям эксплуатации барабанных мельниц.

Для чего основываясь на полученных в ходе эксперимента данных согласно предлагаемой методике мониторинга работоспособности опорного подшипникового узла скольжения в режиме реального времени по величине и изменению его температуры разработан алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по обеспечению работоспособности опорных баббитовых

гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы, представленный в главе 4 в разделе 4.3.

Ключевым элементом разработанного алгоритма является профилактика температурных перегрузок подшипниковых узлов. Для этого осуществляется постоянный контроль и корректировка системы охлаждения масла, включая оптимизацию давления в смазочной системе для обеспечения нормального температурного рабочего режима подшипниковых узлов барабанной мельницы. При выявлении необходимости проводится модернизация существующей системы охлаждения смазки путем установки дополнительных охлаждающих элементов или модификации существующих компонентов системы.

Внедрение данного алгоритма позволяет обеспечить надежную работу подшипниковых узлов барабанной мельницы в составе свинцово-цинкового ГОКа, минимизировать риски аварийных ситуаций и продлить межремонтный период эксплуатации. При этом учитываются не только текущие параметры работы оборудования, но и прогнозируются возможные изменения в условиях эксплуатации, что позволяет своевременно корректировать режимы обслуживания и предотвращать развитие потенциальных неисправностей.

Важным аспектом является также интеграция корректирующего обслуживания с системой предиктивной диагностики, что позволяет предвидеть необходимость проведения тех или иных мероприятий на основе анализа трендов изменения температурного режима (с применением карт Шухарта) и других эксплуатационных параметров. Это особенно актуально для подшипниковых узлов, где своевременное выявление и устранение отклонений от нормального температурного режима может предотвратить развитие серьезных неисправностей и значительно продлить срок службы оборудования.

В процессе эксплуатации постоянно ведется работа по совершенствованию алгоритма обслуживания на основе анализа полученных данных и учета изменений в условиях эксплуатации. Это позволяет оптимизировать затраты на техническое обслуживание при одновременном повышении надежности работы оборудования и увеличении межремонтного периода [108]. При этом учитываются как общие

тенденции в развитии технологий обслуживания, так и специфические особенности конкретного оборудования и условий его эксплуатации.

Таким образом, комплексный подход к проведению корректирующего технического обслуживания подшипниковых узлов барабанной мельницы обеспечивает не только поддержание оборудования в работоспособном состоянии ориентируясь на обеспечение его безотказности в процессе эксплуатации, но и способствует его эффективной и безопасной эксплуатации в условиях ограниченного рабочего пространства. Регулярный мониторинг, своевременная корректировка режимов работы система смазки и постоянное совершенствование методов обслуживания позволяют максимально продлить срок службы оборудования и минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций.

2.4 Оценка критичности риска возникновения отказа подшипниковых узлов барабанной мельницы

Предлагаемая стратегия технического обслуживания и ремонта основывается на иерархическом подходе к системам и узлам с учетом уровня рисков их отказов. В основе оценки рисков принят принцип Файн-Кинни, который представляет собой углубленный анализ потенциальных угроз, основанный на трех взаимосвязанных параметрах: вероятность отказа эксплуатируемого элемента в межремонтный период, возможного воздействия его отказа на оборудование и последствий для производственного процесса. Все три составляющих оцениваются в безразмерных баллах по аналогии с ГОСТ Р 58771-2019, ГОСТ Р 27.606-2013, ГОСТ 12.0.230.5-2018 и ГОСТ Р ИСО 31010-2011.

Балльная шкала оценки рисков: свыше 343 баллов – уровень 5, очень высокий риск, немедленное прекращение работы; 216-343 – уровень 4, высокий риск, необходимо немедленное проведение корректирующего ТО в течение 24 часов; 64-215 – уровень 3, существенный риск, необходимо корректирующее или плановое ТО в течение недели; 8-63 – уровень 2, возможный риск, необходимо обратить внимание в рамках планового ТО; менее 8 баллов – уровень 1, незначительный риск, подлежит исследованию при следующем плановом ТО.

При анализе вероятности отказа особое внимание уделяется состоянию смазочной системы и качеству используемого масла, поскольку именно эти факторы играют ключевую роль в работе подшипников скольжения. Параллельно тщательно отслеживается температурное состояние подшипникового узла, уровень вибраций и шумов, степень износа рабочих поверхностей и качество центровки с балансировкой вращающихся элементов.

Оценка воздействия на оборудование включает комплексный анализ потенциальных последствий отказа. Рассматривается необходимость остановки производства, время, требуемое на проведение ремонтных работ, их сложность и количество задействованного персонала. Важным аспектом является потребность в запасных частях и возможность их оперативной поставки.

Последствия отказа опорного подшипника могут быть весьма серьезными: от прямого ущерба оборудованию до значительных экономических потерь из-за простоя производства. Особое внимание уделяется рискам для безопасности персонала и влиянию на производственный процесс в целом. При этом учитываются затраты на восстановление работоспособности оборудования и возможные потери от брака продукции.

Для получения итоговой оценки риска все три параметра оцениваются в баллах и перемножаются между собой. При этом учитываются данные о предыдущих отказах, возможность проведения профилактических мероприятий и целесообразность различных видов технического обслуживания. Такой подход позволяет получить объективную картину рисков и принять обоснованные решения о необходимых действиях. На основе полученной оценки принимается решение о характере дальнейших мероприятий: от немедленного вмешательства до изменения режима работы оборудования. При этом учитывается возможность проведения планового ремонта или необходимость дополнительного мониторинга состояния подшипника.

Важно отметить, что оценка риска по методу Файн-Кинни является динамическим процессом, требующим регулярного обновления данных и пересмотра оценок в зависимости от изменения условий эксплуатации и

технического состояния оборудования. Такой подход позволяет своевременно выявлять потенциально опасные ситуации, оптимизировать график технического обслуживания и эффективно распределять ресурсы на ремонт, что в конечном итоге обеспечивает надежную работу оборудования и минимизирует риски серьезных отказов.

Такой комплексный подход к оценке рисков позволяет не только своевременно выявлять потенциально опасные ситуации, но и оптимизировать график технического обслуживания, эффективно распределять ресурсы на ремонт, минимизировать риски серьезных отказов и обеспечивать надежную работу оборудования. Регулярное обновление данных и пересмотр оценок в зависимости от изменения условий эксплуатации и технического состояния оборудования позволяет поддерживать высокий уровень безопасности и эффективности производственного процесса.

2.5 Выводы по главе 2

1. При эксплуатации оборудования ГОКов особую актуальность приобретает проблема оценки технического состояния подшипниковых узлов барабанных мельниц, особенно при их размещении в условиях ограниченного пространства. Это обусловлено сложностью ТОиР данного оборудования из-за специфики конструкции мельниц и необходимости обеспечения непрерывной работы всего производственного цикла.

2. Подшипниковые узлы являются одними из наиболее ответственных элементов барабанной мельницы, от состояния которых напрямую зависит надежность и эффективность работы всего оборудования. В условиях ограниченного пространства даже незначительные отклонения в работе подшипников могут привести к серьезным последствиям, включая повышенный износ, перегрев и аварийные ситуации. Поэтому эффективность системы технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов обеспечивается своевременным выявлением отклонений от нормального режима их работы, оперативным реагированием на нештатные ситуации и точным прогнозированием

остаточного ресурса узлов, что позволяет оптимизировать затраты на обслуживание и существенно повысить надежность работы барабанной мельницы.

3. Разработка эффективных методов оценки технического состояния подшипниковых узлов в условиях ограниченного пространства позволит существенно повысить надежность работы барабанных мельниц, сократить время на проведение ремонтных работ и минимизировать простои оборудования. Это обеспечит более стабильную работу всего производственного процесса в рамках горно-обогатительного комбината и повысит его экономическую эффективность.

4. Адаптивная система технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов барабанной мельницы представляет собой комплексный подход к обеспечению надежной работы оборудования. В основе системы лежит комбинированный иерархический принцип организации, учитывающий специфику эксплуатации мельницы и особенности работы подшипниковых узлов. Ключевым элементом является постоянный мониторинг технического состояния подшипниковых узлов с прогнозированием их остаточного ресурса. Важным элементом системы является автоматизация процессов контроля. Установленные датчики постоянно отслеживают температуру подшипников, давление масла, уровень вибрации и другие параметры. При отклонении показателей от нормы система автоматически формирует сигнал тревоги, что позволяет оперативно реагировать на возможные неисправности.

ГЛАВА 3 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕЖРЕМОНТНОГО РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ НАГРЕВА И ИНТЕНСИВНОСТИ РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ В УЗЛАХ

Как указывалось выше, температурный режим является одним из наиболее информативных показателей технического состояния подшипниковых узлов, позволяющим своевременно выявлять отклонения от нормального режима работы и прогнозировать остаточный ресурс оборудования. Внедрение систем температурного мониторинга с функцией анализа величины нагрева и интенсивности роста температуры позволяет не только контролировать текущее состояние узлов, но и формировать достоверные прогнозы их дальнейшей эксплуатации.

Такой подход к оценке технического состояния подшипниковых узлов обеспечивает своевременное выявление зарождающихся дефектов, что способствует повышению надежности работы оборудования и оптимизации затрат на его обслуживание. При этом комплексный анализ величины нагрева и интенсивности роста температуры в сочетании с другими методами диагностики позволяет создать эффективную систему предиктивной диагностики, способную предупреждать о необходимости проведения профилактических мероприятий до возникновения критических ситуаций.

Существующие научные публикации демонстрируют дефицит экспериментальных данных относительно термодинамического поведения баббитовых подшипников скольжения при различных параметрах геометрической точности цапф. В частности, в технической литературе отсутствуют исчерпывающие исследования влияния отклонений формы и взаимного расположения поверхностей цапф на величину нагрева и интенсивность роста температуры в подшипниковых узлах барабанной мельницы при высоких удельных нагрузках в процессе эксплуатации. В связи с этим возникла объективная необходимость проведения серии лабораторных испытаний на специализированном испытательном стенде для получения репрезентативных

данных о тепловом режиме исследуемых баббитовых подшипников, применяемых в барабанных мельницах на КОГах.

3.1 Испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований

Испытания баббитовых подшипников скольжения передаточных узлов проводились для каждого узла на специально оборудованном испытательном стенде (рисунок 3.1) [29].

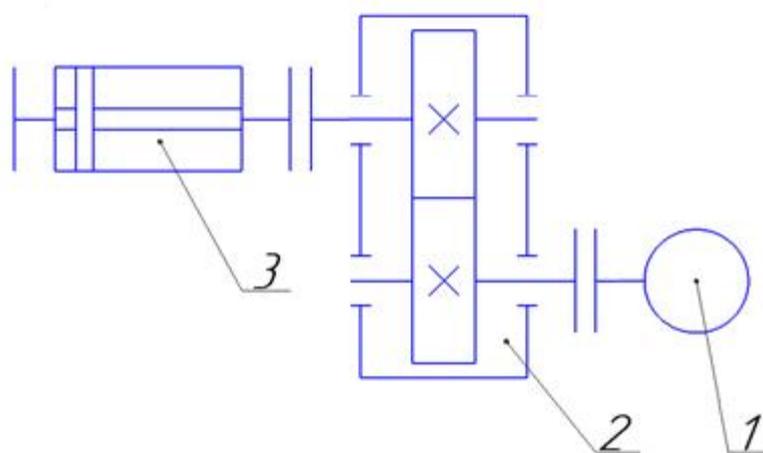


Рисунок 3.1 – Схема кинематической системы стенда для испытания подшипниковых узлов скольжения: 1 – электродвигатель; 2 – испытываемый передаточный узел; 3 – гидравлический торсионный нагрузитель (составлено автором)

Испытательный стенд имеет модульную структуру, в состав стендового оборудования входит электродвигатель, имеющий возможность работать как в режиме электродвигателя, так и в режиме генератора, гидравлический торсионный нагрузитель, компенсирующие муфты [29].

Режим работы кинематической части с испытываемыми передаточными узлами в условиях стенда обеспечивался с применением гидравлического торсионного нагрузителя с обеспечением привода системы от электродвигателя, имитируя нагрузки в системе испытаний аналогичные условиям эксплуатации подшипниковых узлов барабанной мельницы.

Охлаждающая система стенда обеспечивает эффективное охлаждение температуры масла в рабочих узлах не более 85 °С на выходе из системы и не более

50 °С на входе. В ходе испытаний давление масла в системах смазки обеспечивается штатными электронасосными агрегатами смазки, давление масла в системах управления – штатными электронасосными агрегатами управления, устанавливаемом на стендовом кронштейне и подключенным к стендовым трубопроводам.

Автоматизированная система управления (АСУ) стенда обеспечивает аварийно-предупредительную сигнализацию и защиту при испытаниях передаточных узлов по следующим параметрам: температуры масла на входе в замкнутый контур и выходе из него; минимальный и максимальный уровень масла в поддонах; давления масла в системах смазки и управления; давления масла в фрикционных муфтах и стопорных устройствах; температуры опорных подшипников скольжения передаточных узлов; температуры в системе охлаждения и температуры охлаждающей воды на входе в охладитель масла; величины вольт-амперных характеристик электродвигателя; момент силы нагружения и обороты электродвигателя; давление и температура картерных газов в корпусе [30]. Дополнительно установлена система виброконтроля с блоком обработки сигналов ГСТ 4142 с пороговыми значениями виброскорости 25 мм/с для формирования предупредительной сигнализации и 32 мм/с для формирования аварийной сигнализации.

3.2 Измерительные средства контроля геометрического профиля испытываемых цапф опорных подшипников передаточных узлов

Перед проведением экспериментальных исследований передаточных узлов с опорными подшипниками скольжения на специально оборудованном стенде для оценки их работоспособности, характеризующейся величиной нагрева и интенсивностью роста температуры в подшипнике в зависимости от геометрических отклонений поверхностей формы цапф при соответствующей рабочей нагрузке, необходимо было произвести непосредственные измерения их фактический геометрических параметров [29].

Измерения геометрических параметров осуществлялись на поверенной контрольно-измерительной машине (КИМ) Dea Delta (рисунок 3.2) при следующих значениях влияющих факторов: температура окружающей среды 20,3 °С. относительная влажность 44,3 %; атмосферное давление 99,9 кПа. Измерение диаметров и круглости цапфы производилось в трех сечениях с обкаткой шупом в 15-ти точках по окружности. Измерение профиля продольного сечения осуществлялось в двух плоскостях при обкатке цилиндра цапфы в 20-ти точках. Измерение радиального биения, соосности двух цапф и параллельность осей этих цапф производилось с учетом обкатки шупом двух цилиндров (поверхностей цапф) путем построения фактической оси вращения между ними [27].



Рисунок 3.2 – Измерение геометрических параметров испытываемых цапф на КИМ Dea Delta мод. PERFORMANCE типоразмера 35.51.25 (фото автора)

3.3 Методика проведения экспериментального исследования оценки зависимости величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковых узлах от отклонения формы поверхностей цапф

Важным элементом в обеспечении надежности и центрирования барабанных мельниц в составе свинцово-цинковых горно-обогачительных комбинатов является мониторинг технического состояния их ресурсопределяющих узлов – опорных подшипников скольжения. Для проведения мониторинга необходим автоматический контроль неисправностей опорных подшипников скольжения и их изнашивания, а также динамической неустойчивости кинематической замкнутой

системы в режиме реального времени при различных условиях работы и нагрузке на систему. Такой контроль является необходимым показателем интеллектуальной производственной системы. Своевременная информация о параметрах работоспособности, характеризующих стабильность состояния работы узлов, может быть полезной для предупреждения о неисправностях и предотвращения дорогостоящих ремонтных работ. Поэтому при эксплуатации динамического оборудования с ресурсопределяющими узлами вращения, в роли которых выступают опорные подшипники скольжения, необходимо проведение мониторинга, в ходе которого осуществляются измерения и фиксирование ряда параметров с помощью АСУ [29].

Для проведения комплексных испытаний опорных подшипников в составе передаточных узлов специализированный испытательный стенд (рисунок 3.1) был оснащен современными системами контроля и измерения параметров работы оборудования. Конструкция стенда позволила поэтапно наращивать нагрузку в системе с точным контролем всех параметров работы подшипников, что обеспечивало безопасность проведения испытаний и получение достоверных результатов.

Величина удельной нагрузки на опорный подшипник скольжения барабанной мельницы является критическим параметром, определяющим работоспособность всего узла. На величину удельной нагрузки влияют несколько ключевых факторов:

- масса вращающегося барабана;
- распределение мелющей загрузки;
- скорость вращения;
- качество и количество смазочного материала;
- состояние опорных поверхностей подшипника.

В нормальных условиях эксплуатации это значение находится в диапазоне от 2,0 до 2,5 МПа. Однако при определенных режимах работы или при возникновении неисправностей этот показатель может существенно изменяться. При высоких нагрузках, например, при неравномерной загрузке мельницы или при попадании

посторонних предметов, удельная нагрузка может возрастать до 2,5-3,0 МПа [40]. В данных условиях существует риск формирования задиров на рабочих поверхностях трения и интенсификации процесса износа подшипникового узла, что обусловлено нарушением условий жидкостной смазки и возникновением металлического контакта между цапфой и вкладышем подшипника.

Испытания подшипников скольжения проводились в несколько последовательных этапов, начиная с предварительной обкатки узлов при минимальной нагрузке для приработки поверхностей трения. Затем нагрузка постепенно увеличивалась до достижения рабочего режима с мощностью 20 МВт, что создало условия, максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации оборудования. При достижении рабочего режима была обеспечена удельная нагрузка на подшипники в 3,3 МПа, что полностью соответствовало условиям работы подшипниковых узлов барабанной мельницы при измельчении свинцово-цинковой руды. Таким образом нагрузка в системе задавалась в течение времени « T » по выражению (3.1):

$$P = (2000T^6 - 3000T^5 + 1000T^4 - 200T^3 + 20T^2 - 0,26T + 23 \cdot 10^{-4}) 10^6, \quad (3.1)$$

где P – мощность в силовом контуре системы испытаний, кВт;

T – время испытаний, мин.

При увеличении мощности, характеризующей нагрузку на испытываемые передаточные узлы в системе, сначала увеличивалась частота вращения (не более 40 (об/мин)/с), затем увеличивался момент силы (не более 1800 Н·м/с) с выдержкой на промежуточной мощности не менее 2-х минут (рисунок 3.3).

Испытания проводились на аттестованном стенде (рисунок 3.1) при нормальных климатических условиях, которые характеризуются следующими значениями: температура окружающего воздуха от 15 до 35 °С; относительная влажность воздуха от 45 до 80 %; атмосферное давление от 86 до 106 кПа; температура охлаждающей воды от минус 2 до 30 °С [27]. Регистрация показаний параметров работоспособности и создаваемой мощности в системе производилась АСУ в режиме реального времени с автоматизированного рабочего места (рисунок 3.4) [29].

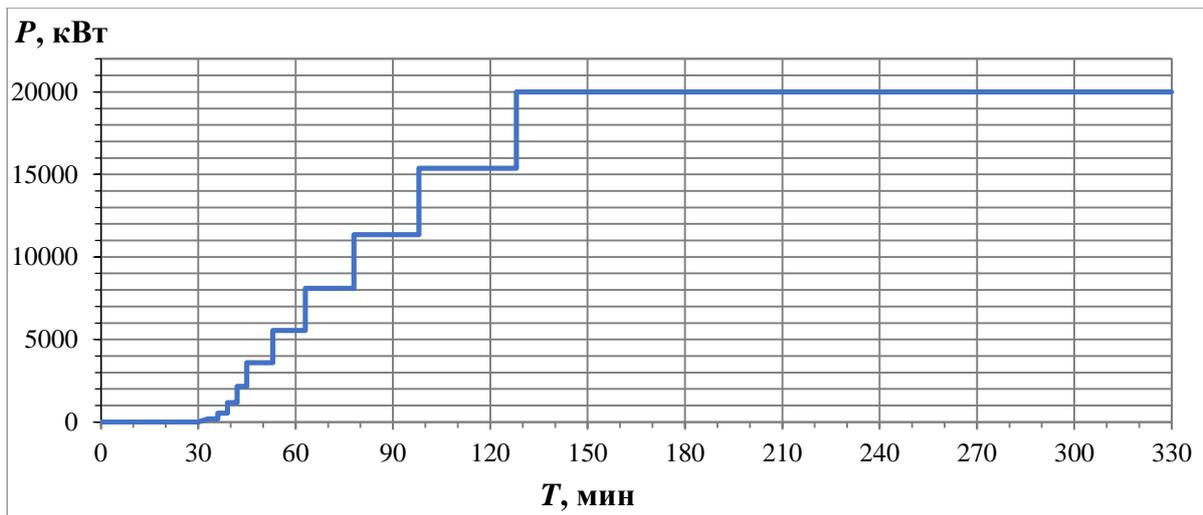


Рисунок 3.3 – График выхода на рабочий режим по выражению (3.1) при испытании подшипниковых узлов скольжения на испытательном стенде (составлено автором)

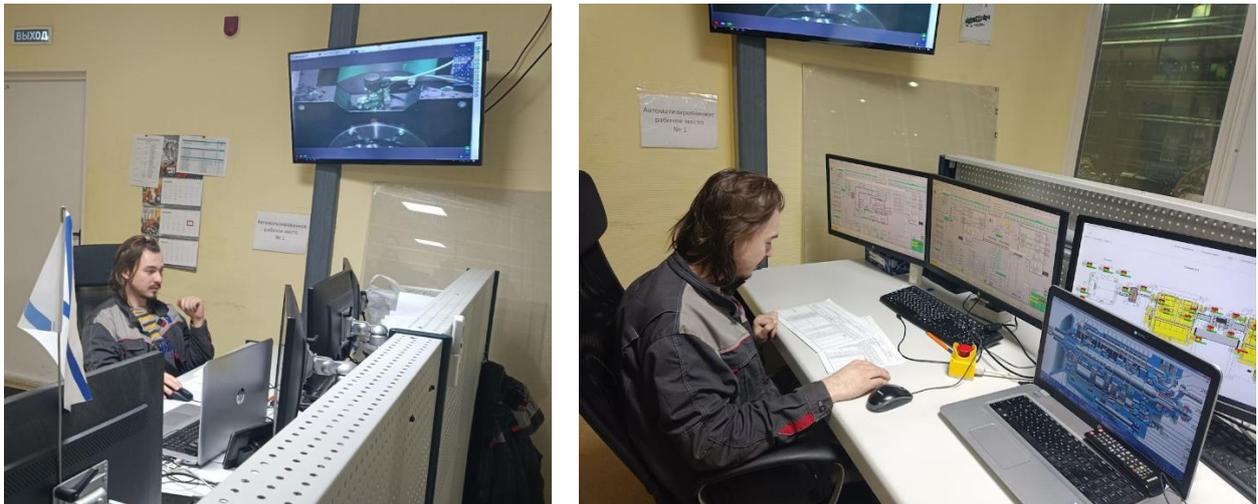


Рисунок 3.4 – Контроль параметров работоспособности испытываемых подшипников передаточных узлов с автоматизированного рабочего места (фото автора)

К контролируемым параметрам в режиме реального времени относятся: измерение температуры в подшипниках скольжения, температуры масла на входе и на сливе, замер уровня масла в поддоне, контроль температуры охлаждающей воды на входе в охладитель масла, замеры уровней виброакустических характеристик для электропривода и узлов вращения, контроль величины вольт-амперных характеристик электродвигателя, частота вращения электродвигателя и выходного звена, образующийся момент силы нагружения в системе, контроль

перепада давления на маслофильтре, давление масла в системе смазки, давление и температура картерных газов в корпусе. Также во время остановки между циклами работы осуществляется проверка невозвратных потерь масла в системе, проверка температуры наружных поверхностей, наличие абразивных частиц, металлической пыли и прочих загрязнений осевших на сетках маслофильтров, проверка функционирования всех механизмов и систем при управлении от локальной системы управления [29].

Во время стендовых испытаний опорных подшипниковых узлов скольжения на специализированном стенде, смогли оценить работоспособность этих узлов. Она была характеризована изменением величины нагрева и интенсивностью роста температуры, которая зависит от геометрических параметров формы цапфы [29].

Это связано с тем, что во время испытания подшипников передаточных узлов эмпирически было выявлено, что величина нагрева и интенсивность роста температуры внутри опорных узлов нагляднее всего дает представление о наличии геометрических отклонений формы поверхностей подшипниковых цапф от базовых значений, наличие которых соответственно и влияет на работоспособность всего передаточного узла. Для контроля температуры в подшипниковых узлах использовались термопреобразователи ТПК-67-320, устанавливаемые непосредственно в корпус крышки подшипника и баббитового вкладыша (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Контроль температуры в подшипниковом узле с помощью установки термопреобразователя ТПК-67-320 в корпус подшипника (фото автора)

3.4 Параметры и геометрия испытываемых подшипниковых узлов и цапф

Габаритные размеры пустотелых цапф в составе испытываемых опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения составляют: 300 мм в диаметре и 228 мм в длину. Материал цапф – сталь конструкционная легированная 18Х2Н4МА, материал вкладышей подшипников скольжения – баббит Б83, для создания масляной подушки в подшипниковом узле скольжения использовалось минеральное масло Тп-46. Перед проведением стендовых исследований пустотелые цапфы в составе испытываемых подшипниках были поделены на четыре соответствующие группы в зависимости от величины геометрических отклонений форм поверхностей цапф от заданных конструкторской документацией значений [29]. Геометрические параметры отобранных цапф для дальнейших испытаний подшипников представлены в таблице 3.1. Каждая отобранная группа состоит из четырех выборок передаточных узлов, каждая из которых в свою очередь представлена в виде тела вращения с двумя опорными подшипниками скольжения с пустотелыми цапфами на концах, в таблице 3.1 и далее при описании геометрических параметров цапф представлены средние значения выборок цапф тел вращения в составе группы (в том числе и при описании тепловых параметров каждой испытываемой группы) [30].

Для каждой группы цапф и их выборок были подобраны и индивидуально изготовлены баббитовые подшипниковые вкладыши с обеспечением масляного зазора в узле скольжения в пределах 0,380...0,429 мм. Внутренний диаметр двух опорных баббитовых вкладышей подшипников растачивался в сборе для каждого передаточного узла по качеству 6Н, с обеспечением круглости и профиля продольного сечения каждого подшипника в пределах 0,008 мм и соосности первого подшипника относительно второго в пределах 0,012 мм. Баббитовые вкладыши подшипников устанавливались в постели расточек опорных подшипниковых узлов трения скольжения с натягом, не превышающим 0,02 мм. Все испытываемые передаточные узлы с двумя опорными цапфами были динамически отбалансированы с величиной дисбаланса не более 40 г на см на каждой опоре.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры цапф подшипниковых узлов (составлено автором)

Геометрические допуски цапф, мм	Фактические геометрические параметры цапф каждой группы, мм			
	Номинальная, Ц _{1.ном}	Минимальная, Ц _{2.мин}	Повышенная, Ц _{3.пов}	Аварийная, Ц _{4.авр}
○ 0,005	0,004	0,016	0,023	0,056
= 0,005	0,003	0,025	0,038	0,056
↗ 0,015	0,011	0,027	0,083	0,191

Тем самым была сведена к минимуму возможность влияния геометрически-точных характеристик и дисбаланса в опорных подшипниковых узлах скольжения на исследуемую в ходе стендовых испытаний зависимость величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей подшипниковых цапф для каждой из испытываемых групп (Ц_{1.ном}, Ц_{2.мин}, Ц_{3.пов}, Ц_{4.авр}) при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа, обеспечиваемой создаваемой мощностью 20000 кВт в системе, согласно выражению (3.1), обеспечивая достоверность полученных результатов.

3.5 Оценка величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковых узлах от отклонения формы поверхностей цапф

Испытания подшипниковых узлов в составе с цапфами каждой из групп согласно таблице 3.1 проводились по методике, описанной в разделе 3.3. Регистрация показаний параметров работоспособности подшипников и создаваемой мощности в системе производились с помощью АСУ в режиме реального времени с автоматизированного рабочего места как представлено в разделе 3.3.

На рисунке 3.6 представлен график изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой

группы Ц_{1.ном} с номинальными значениями геометрических параметров, соответствующими допускам конструкторской документации (КД). Геометрический профиль опорных поверхностей цапф данной группы характеризуется следующими параметрами: отклонение от круглости 0,004 мм, отклонение по профилю продольного сечения 0,003 мм, полное радиальное биение одной цапфы относительно другой не более 0,011 мм. При испытании данной группы величина нагрева опорных подшипников не превышало 45 °С [29].

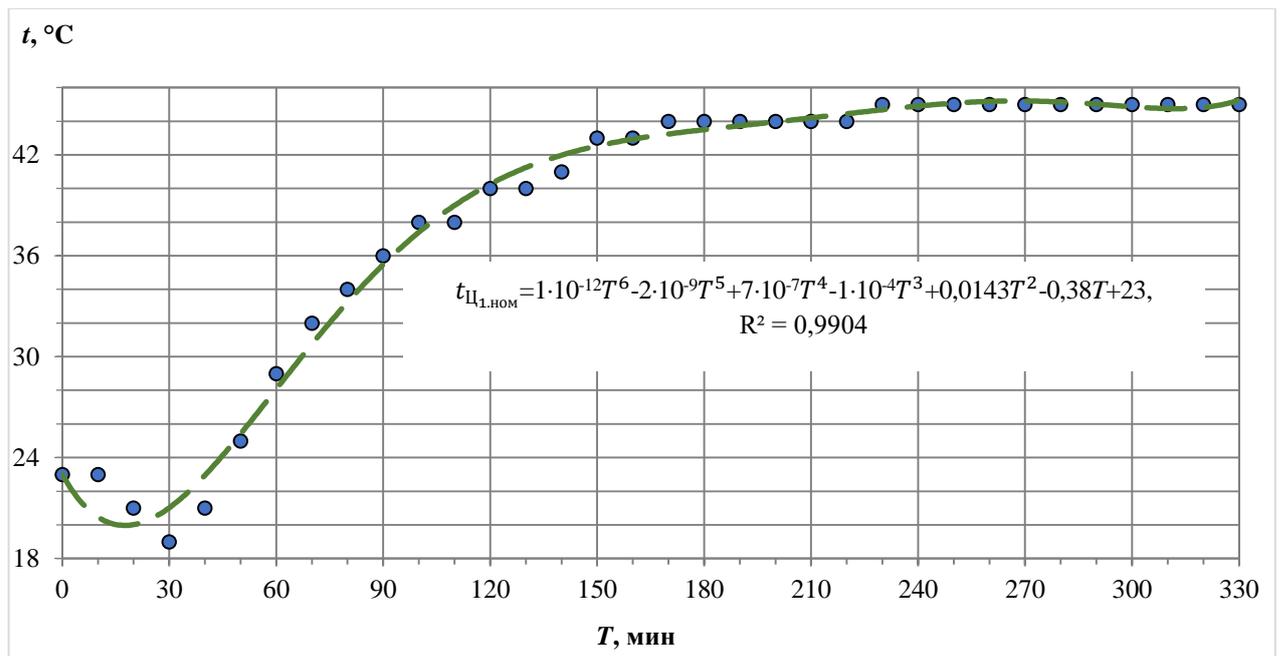


Рисунок 3.6 – Изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой группы Ц_{1.ном} (составлено автором)

График изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой группы Ц_{2.мин}, которая не соответствуют заданным параметрам КД и группа которой характеризуется равномерным не скачкообразными отклонениями. В данной группе геометрический рабочий профиль цапф отклоняется от предельно допустимой нормы примерно в 3-5 раз (см. таблицу 3.1). Геометрический профиль опорных поверхностей цапф данной группы определяется следующими параметрами: отклонение от круглости 0,016 мм, отклонение по профилю продольного сечения 0,025 мм, полное радиальное биение одной цапфы относительно другой не более 0,027 мм (7 % от толщины масляного слоя). При испытании опорных баббитовых подшипников

скольжения с цапфами данной группы величина нагрева в узлах не превышала отметки в 60 °С (рисунок 3.7) [29].

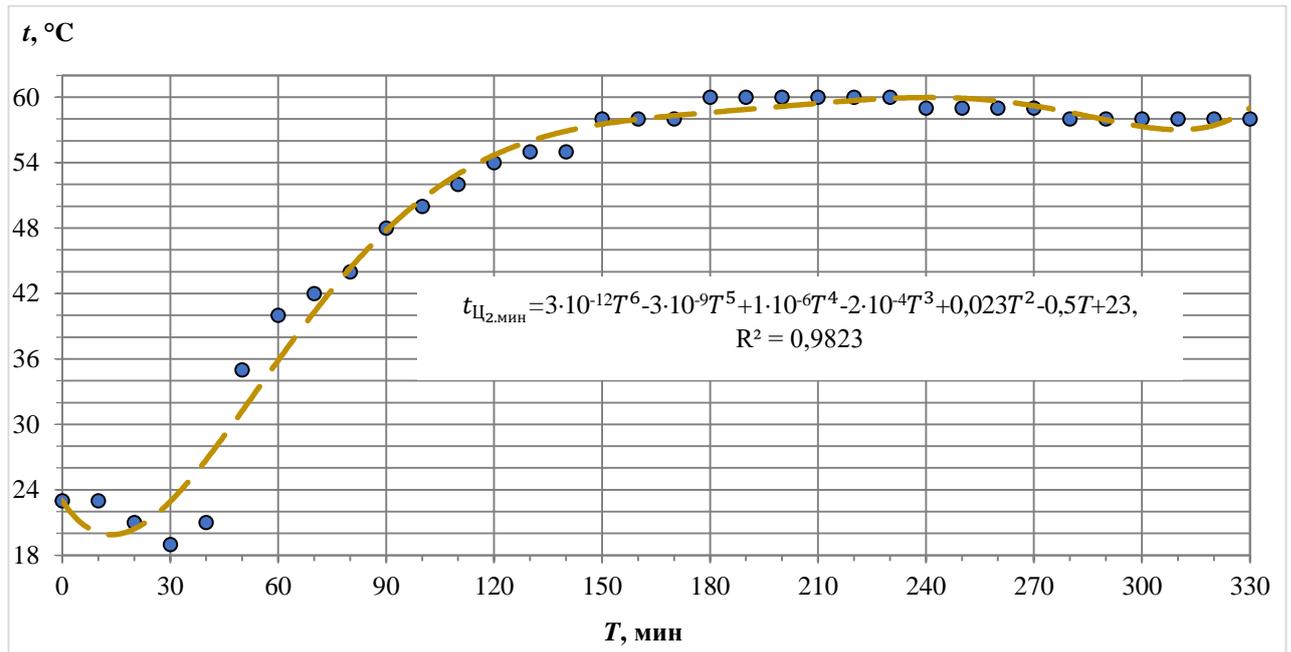


Рисунок 3.7 – Изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой группы Ц_{2.мин} (составлено автором)

На рисунке 3.8 представлен график изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой, относящейся к повышенной группе обозначенной Ц_{3.пов}. Геометрический профиль цапф данной группы характеризуется неравномерным распределением отклонений от номинальных показателей по КД со средним значением отклонений от допусков форм и расположения поверхностей цапф в 5-8 раз. Геометрический профиль опорных поверхностей цапф данной группы определяется следующими параметрами: отклонение от круглости 0,023 мм, отклонение по профилю продольного сечения 0,038 мм, полное радиальное биение одной цапфы относительно другой не более 0,083 мм (20 % от толщины масляного слоя). При выходе на рабочую нагрузку с цапфой данной группы температурный режим работы испытываемого опорного подшипникового узла скольжения характеризовался величиной нагрева в 84 °С, что превысило предельно допустимый показатель температуры и вызвало срабатывание аварийно-предупредительной сигнализации АСУ [29].

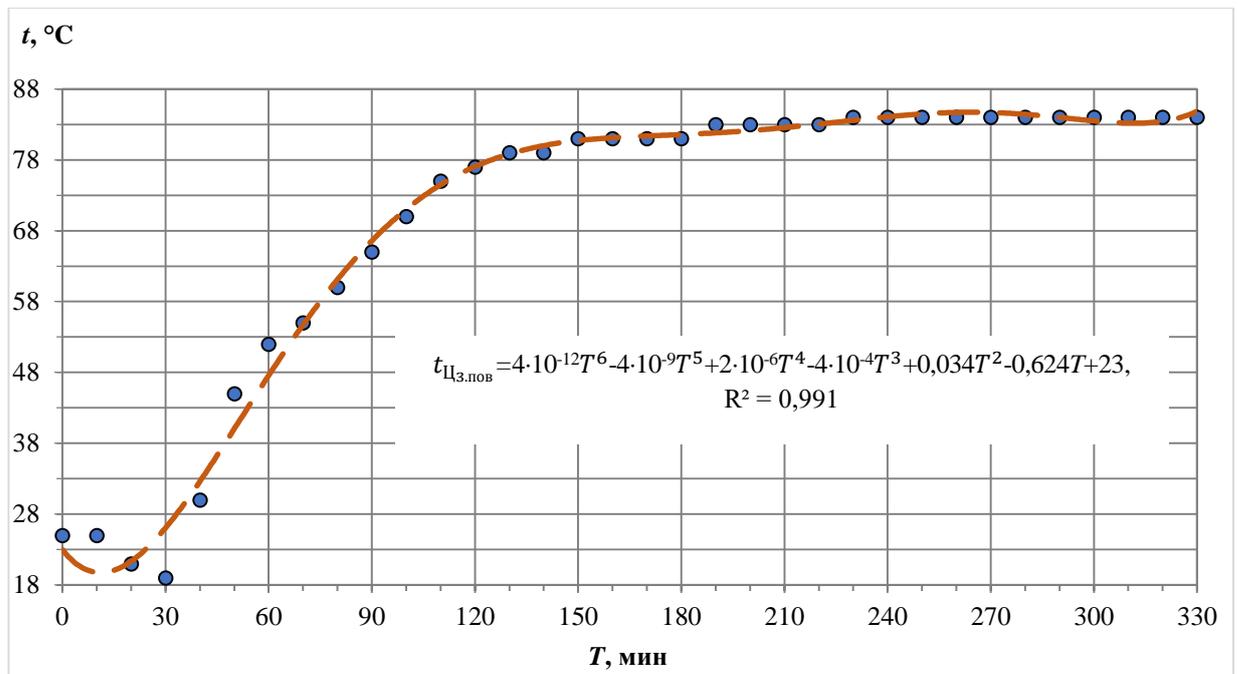


Рисунок 3.8 – Изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой группы Ц_{3.пов} (составлено автором)

Последняя испытываемая группа цапф, обозначенная как аварийная Ц_{4.авр}, характеризуется неравномерным отклонением рабочего профиля с учетом максимального и минимального фактических значений диаметра по сечениям от номинальных параметров более чем в 10 раз. Геометрические показатели данной группы составляют: отклонение от круглости и по профилю продольного сечения составляют 0,056 мм, биение одной цапфы относительно другой – 0,191 мм (46 % от толщины масляного слоя). Представленный на рисунке 3.9 график изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой, относящейся к аварийной группе Ц_{4.авр} показывает изменение величины температуры в узле до значения в 113 °С, вызывая аварийный режим работы при котором происходит разбалансировка передаточного узла вращения приводящая к повышенной вероятности зарождение процесса выкрашивания баббитовых вкладышей подшипника, в свою очередь сказывающейся на интенсификации процесса изнашивания рабочего профиля цапф и образованию неравномерного распределения масляной пленки в опорном подшипнике и закусывания рабочей поверхности цапфы о баббитовый слой вкладыша, что в ходе повышения температуры в пиковых моментах свыше 120 °С – приводит к заклиниванию опорного подшипника [29].

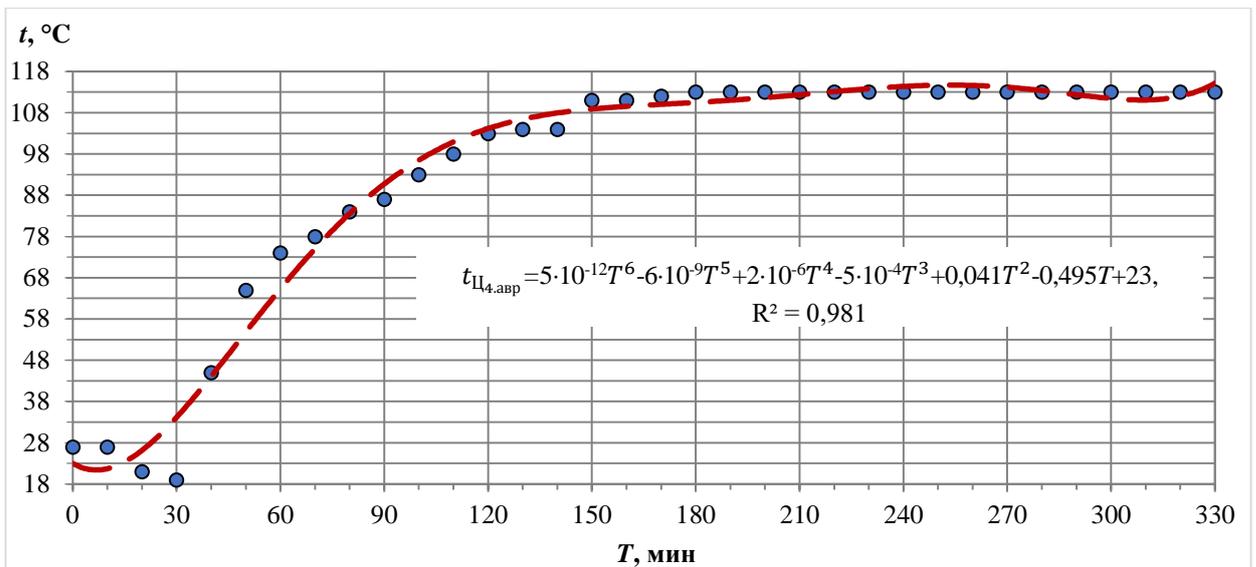


Рисунок 3.9 – Изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике скольжения с цапфой группы Ц_{4.авр} (составлено автором)

В ходе проведенных исследований подшипников скольжения на испытательном стенде доказано, что величина нагрева и интенсивность роста температуры « t » в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей цапф при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа, обеспечиваемой создаваемой мощностью в системе, согласно выражению (3.1) в течение времени « T », описывается функциональной зависимостью полинома шестой степени (3.2)-(3.5) для каждой группы цапф в составе испытываемых подшипниковых узлов [29]:

$$t_{Ц_{1.ном}} = 1 \cdot 10^{-12} T^6 - 2 \cdot 10^{-9} T^5 + 7 \cdot 10^{-7} T^4 - 1 \cdot 10^{-4} T^3 + 0,0143 T^2 - 0,38 T + 23, R^2 = 0,9904; \quad (3.2)$$

$$t_{Ц_{2.мин}} = 3 \cdot 10^{-12} T^6 - 3 \cdot 10^{-9} T^5 + 1 \cdot 10^{-6} T^4 - 2 \cdot 10^{-4} T^3 + 0,023 T^2 - 0,5 T + 23, R^2 = 0,9823; \quad (3.3)$$

$$t_{Ц_{3.пов}} = 4 \cdot 10^{-12} T^6 - 4 \cdot 10^{-9} T^5 + 2 \cdot 10^{-6} T^4 - 4 \cdot 10^{-4} T^3 + 0,034 T^2 - 0,624 T + 23, R^2 = 0,991; \quad (3.4)$$

$$t_{Ц_{4.авр}} = 5 \cdot 10^{-12} T^6 - 6 \cdot 10^{-9} T^5 + 2 \cdot 10^{-6} T^4 - 5 \cdot 10^{-4} T^3 + 0,041 T^2 - 0,495 T + 23, R^2 = 0,981, \quad (3.5)$$

где $t_{Ц_{1.ном}}$ – температура в подшипнике с цапфой номинальной группы Ц_{1.ном}, °С;

$t_{Ц_{2.мин}}$ – температура в подшипнике с цапфой минимальной группы Ц_{2.мин}, °С;

$t_{Ц_{3.пов}}$ – температура в подшипнике с цапфой повышенной группы Ц_{3.пов}, °С;

$t_{Ц_{4.авр}}$ – температура в подшипнике с цапфой аварийной группы Ц_{4.авр}, °С;

T – время испытаний, мин;

R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Приведенные выше графики функциональных зависимостей изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорных баббитовых подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей цапф при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа для каждой из отобранных четырех групп ($\zeta_{1.ном}$, $\zeta_{2.мин}$, $\zeta_{3.пов}$, $\zeta_{4.авр}$) комплексно представлены на рисунке 3.10 [29]. Величина нагрева в подшипнике скольжения для групп цапф в составе узла не превышала: для $\zeta_{1.ном}$ – 45 °С; для $\zeta_{2.мин}$ – 60 °С; для $\zeta_{3.пов}$ – 84 °С.

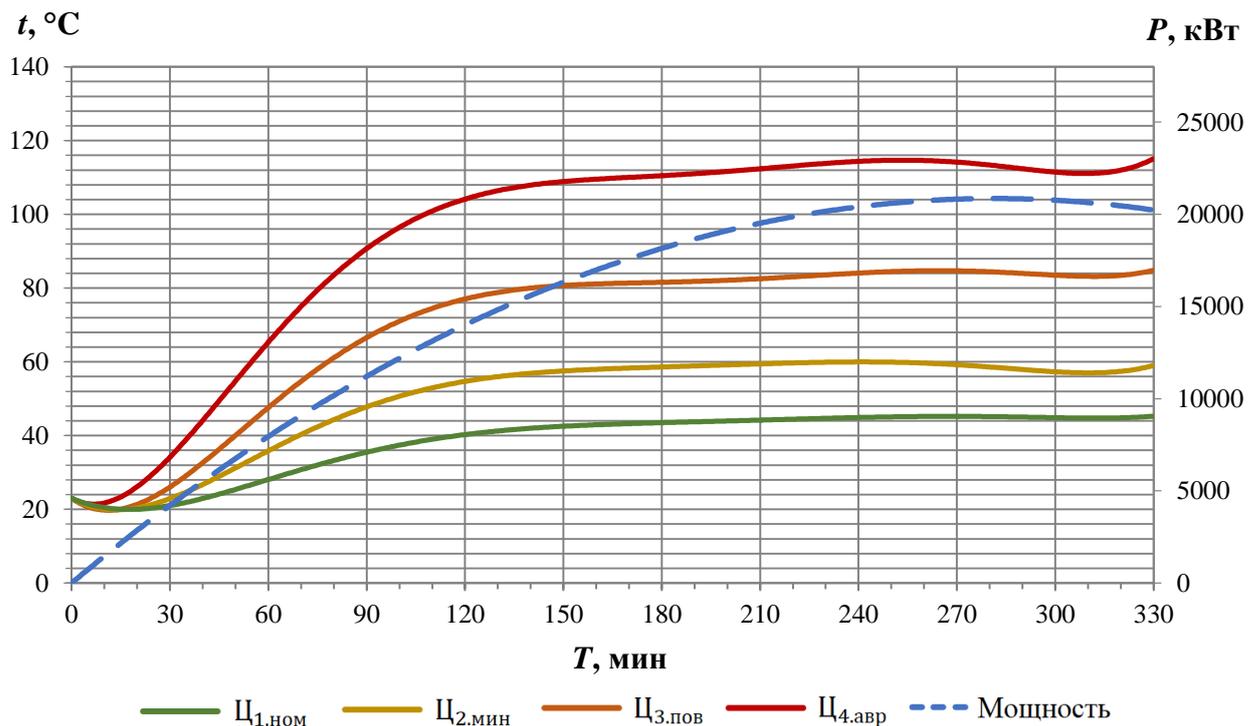


Рисунок 3.10 – Изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры « t » в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей подшипниковых цапф для каждой группы ($\zeta_{1.ном}$, $\zeta_{2.мин}$, $\zeta_{3.пов}$, $\zeta_{4.авр}$) при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа и мощности в системе 20000 кВт в течение времени « T » (составлено автором)

3.6 Анализ интенсивности процесса изнашивания поверхностей цапф при предельно допустимых значениях температуры в опорных подшипниках

В ходе стендовых испытаний было выявлено, что при достижении рабочей температуры в подшипниковом узле свыше 120 °С происходит выкрашивание

баббитового слоя вкладышей подшипника в течении нескольких часов работы (от 3-х до 6-ти часов). При повышенных температурах, приводящих к выкрашиванию баббитового слоя, опорный подшипник может не выходить из строя и продолжать работать с происходящим в нем интенсивным деградиционным процессом изменения геометрического рабочего профиля опорной цапфы [29]. Впоследствии чего профиль цапф может приобретать бочкообразную, седлообразную и конусообразную форму в зависимости от нагрузки и конструкции эксплуатируемой системы, частью которой они являются.

Контроль выкрашиваемого баббитового слоя вкладышей, представленного на рисунке 3.11, осуществлялся в процессе демонтажа опорного подшипника путем визуально-измерительного контроля.

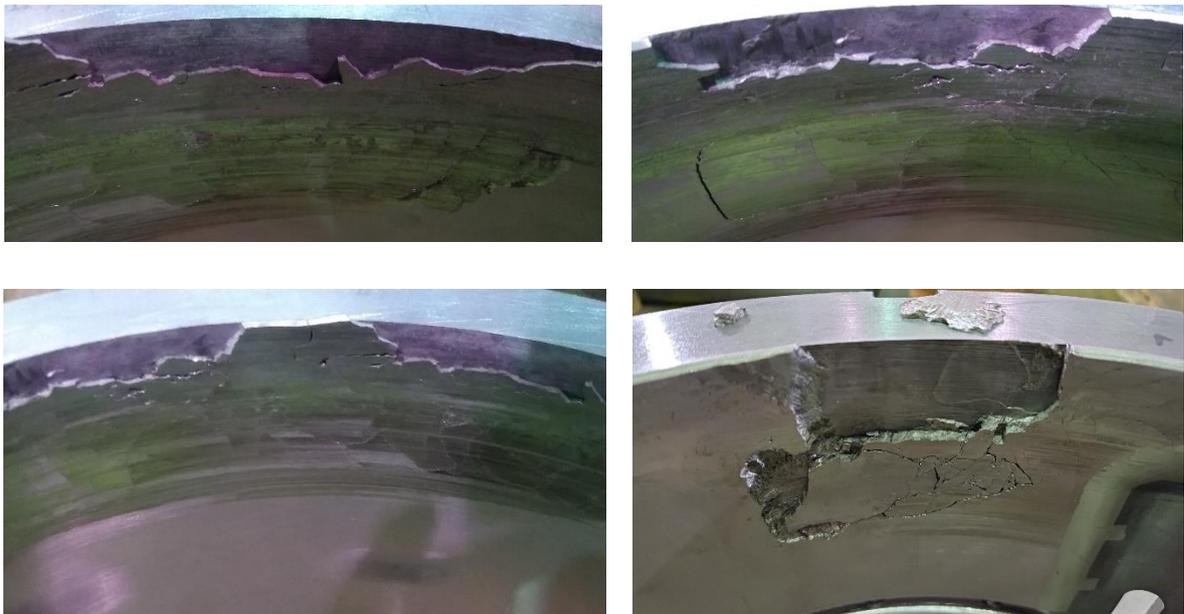


Рисунок 3.11 – Разрушение баббитового слоя вкладышей подшипников скольжения с цапфами группы Ц_{4.авр} в течение трех часов работы при температуре в узле свыше 120-130 °С и удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа (фото автора)

В нашем случае цапфы приобретали конусообразную форму с уходящим конусом в сторону торца цапф. В первую очередь это было связано с тем, что центр масс испытуемых передаточных узлов с опорными цапфами, как и в случае с корпусом мельницы, находится практически по середине тела вращения, в связи с

чем, возникающий дисбаланс при вращении испытуемых передаточных узлов из-за отклонений в геометрическом профиле опорных цапф распределялся неравномерно по всей длине в обе диаметрально расположенные стороны от центра масс и проявлял пиковые значения в крайних торцевых точках перехода поверхностей, что наглядно можно видеть по разрушению баббитового слоя вкладышей опорных подшипников скольжения на рисунке 3.11.

Разрушение баббитового слоя, которое характеризовалось преимущественно только в крайних точках по диаметрам, ближе расположенным к торцам центральных отверстий пустотелых опорных цапф. То есть вызванный дисбаланс главной центральной оси инерции при вращении испытуемых передаточных узлов, грубо говоря, был аналогичен траектории движения безключинного двухлопастного гребкового весла, что наглядно видно из рисунка 3.12.

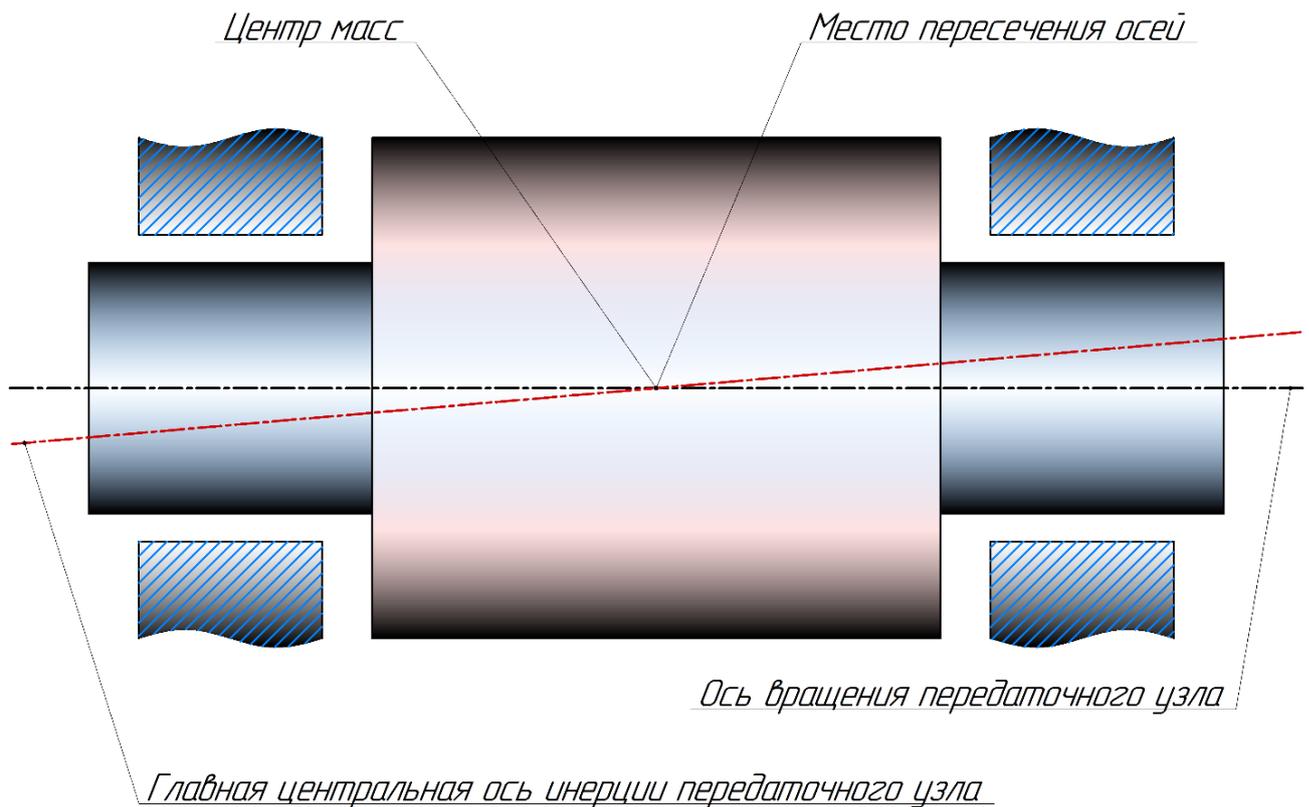


Рисунок 3.12 – Моментная неуравновешенность испытуемого передаточного узла с двумя опорными подшипниками (составлено автором)

В случае эксплуатации барабанной мельницы, при вращении барабана с мелющими телами и измельчаемым рудным сырьем, которое в свою очередь

неравномерно распределено по всей длине корпуса барабана, под действием центробежной силы возникают дополнительные нагрузки, приводящие к смещению центра масс корпуса мельницы относительно его оси вращения, что также усугубляется и наличием деформаций в опорных подшипниках в виде отклонений геометрически-точных характеристик последних от номинальных значений, что вкуче комплексно оказывает прямое влияние на изменение величины эксцентриситета « e » от изначальных статических значений в процессе эксплуатации (рисунок 3.13).

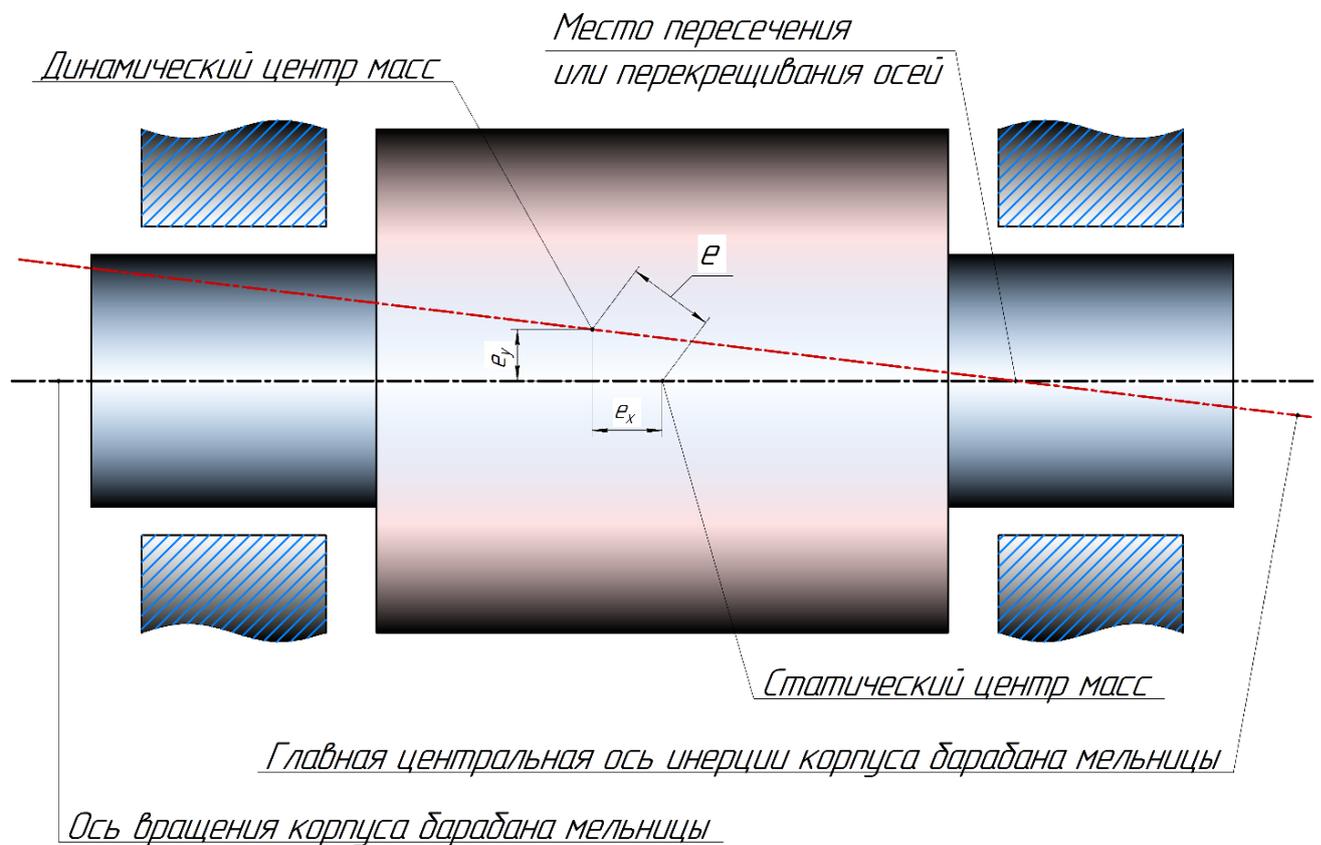


Рисунок 3.13 – Динамическая неуравновешенность корпуса барабана мельницы в процессе эксплуатации (составлено автором)

При увеличении нагрузки в замкнутой системе эксплуатации барабанной мельницы, сопровождающейся соответствующим ростом вращения корпуса барабана, возрастает и величина эксцентриситета в свою очередь провоцируя и рост действующей центробежной силы, сказывающейся на ресурсе опорных подшипниках. В таком случае, вызванное дополнительное смещение центра масс из-за неуравновешенности системы и возникающего перегиба при вращении

корпуса барабана мельницы провоцирует возникновение критической частоты вращения вызывая деформацию в опорных подшипниках, превышающую по значению возникший перекос оси вращения. Что в конечном итоге приводит к автобалансировке системы при дальнейшем росте скорости вращения корпуса барабана мельницы, смещая центр масс в сторону оси вращения за счет истирания рабочих профилей опорных цапф об баббитовые вкладыши, провоцируя возникновение роста отклонения полного радиального биения относительно оси вращения в плоскостях опорных подшипников. Что сначала сказывается на потере работоспособности и эффективности работы барабанных мельниц в целом, а в долгосрочной перспективе эксплуатации приводит к отказу всей механической опорной части мельницы и как следствие к вынужденной остановке технологической линии оборудования дезинтеграции [32].

Для анализа интенсивности изнашивания опорных поверхностей цапф в составе подшипниковых узлов выбрана группа с повышенной величиной отклонения $\Delta_{з.пов}$. Это обусловлено максимальной интенсивностью изнашивания цапф данной группы среди прочих испытываемых, так как при температуре 80-90 °С отсутствует усталостное выкрашивание баббитового слоя подшипников скольжения в течение 50 % наработки заложенного межремонтного ресурса.

В качестве образцов были отобраны 4 тела вращения с двумя опорными цапфами данной группы в составе испытываемых подшипниковых узлов. В таблице 3.2 представлено четыре парных комплекта цапф для анализа суммарного износа их опорных поверхностей. Геометрические параметры цапф для каждого комплекта цапф приведены в виде средних значений, за исключением полного радиального биения одной цапфы относительно другой, так как последний параметр и так представляет собой фактический суммарным комплексным показатель.

Испытания проводились для каждого тела вращения в течение 62 часов при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа, обеспечиваемой создаваемой мощностью 20 МВт, согласно выражению (3.1).

Из представленных данных видно, что среднее значение диаметра цапф уменьшается в связи с ростом отклонения профиля формы, а именно круглости и профиля продольного сечения. Рабочий профиль опорных цапф изнашивался неравномерно по цилиндрической образующей, и имел вид усеченного конуса. В свою очередь это повлияло на суммарный показатель отклонения формы и расположения, представленного в виде полного радиального биения одной цапфы относительно другой [29].

Таблица 3.2 – Геометрические параметры цапф группы Ц_{з.пов} до и после 62 часов испытаний при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа, обеспечиваемой создаваемой мощностью 20000 кВт в системе, согласно выражению (3.1) (составлено автором)

Геометрические допуски цапф, мм	Изменение геометрических параметров цапф, мм							
	Комплект цапф № 1		Комплект цапф № 2		Комплект цапф № 3		Комплект цапф № 4	
	До	После	До	После	До	После	До	После
○ 0,005	0,024	0,043	0,011	0,011	0,036	0,052	0,014	0,016
= 0,005	0,036	0,039	0,068	0,075	0,048	0,099	0,102	0,111
↗ 0,015	0,187	0,148	0,081	0,080	0,083	0,203	0,241	0,191

В случае комплекта цапф № 1 и № 4 цилиндрический профиль, ухудшив свои геометрические параметры круглости и профиля продольного сечения, в свою очередь повысил соосность одной цапфы относительно другой вместе с параллельностью цилиндрических опорных поверхностей, что суммарно сказалось на улучшении их полного радиального биения. У комплектов цапф № 2 и № 3 наблюдается противоположный результат. У комплекта цапф № 2 наблюдается в целом незначительный износ поверхностей, сказавшийся в основном только на форме продольного сечения. Это связано с тем, что изначальное среднее значение отклонения от круглости превышало допустимое предельное значение. У комплекта цапф № 4 в целом наблюдается подобный с комплектом цапф № 2 результат изнашивания с той лишь разницей, что в ходе испытания из-за изначального нарушения соосности и параллельности опорных цилиндрических

поверхностей цапф (полного радиального биения) произошел перекокс фактической оси вращения, который привел к тому, что противоположная базовой цапфа испытывала более интенсивный износ [29].

Износ поверхностей цапф подтверждался засорением фильтрующих элементов масляной системы металлической пылью с номинальной толщиной фильтрации 50 мкм, что свидетельствует о наличии продуктов абразивного износа (рисунок 3.14, а). В ходе визуального анализа поверхностей цапф также были выявлены характерные признаки износа: кольцевые риски, точечные вмятины, задиры и локальные наслоения баббитового покрытия (рисунок 3.14, б). Износ цапф имел неравномерный характер с образованием конусообразности поверхностей в продольном сечении, что привело к увеличению полного радиального биения.

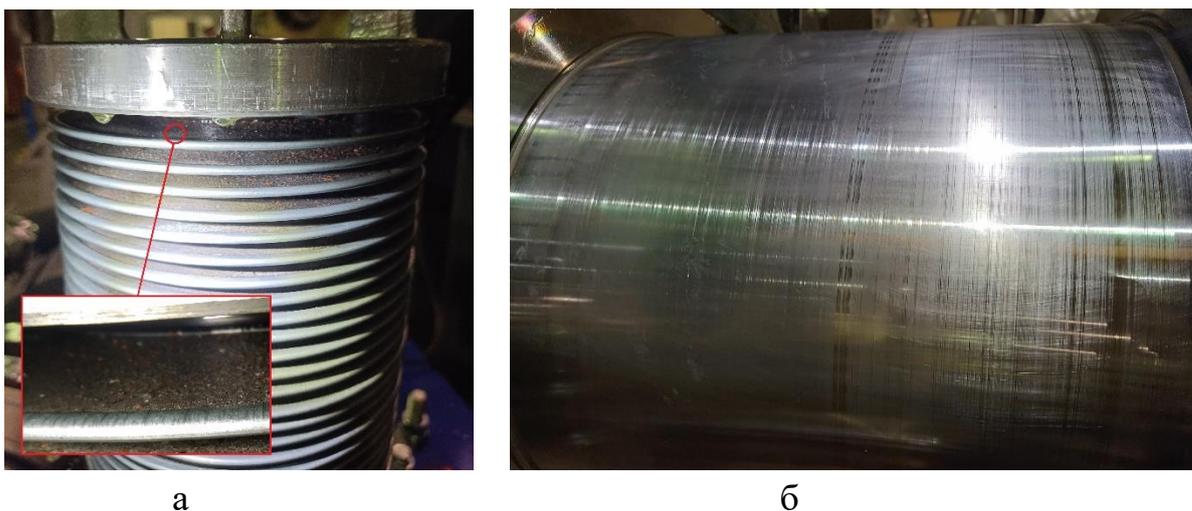


Рисунок 3.14 – Визуальное проявление износа поверхностей цапф группы Ц_{3.пов}:

а – засорение фильтрующего элемента маслофильтра металлической пылью;

б – кольцевые риски, точечные вмятины, задиры

(фото автора)

Вследствие чего средняя интенсивность износа опорных поверхностей пустотелых цапф повышенной группы Ц_{3.пов}, имеющей допуск полного радиального биения в размере 20 % от толщины масляного слоя 0,41 мм, при испытании в составе подшипниковых узлов скольжения составила 0,054 мм за 2463 км пути трения (таблица 3.2).

3.7 Зависимость межремонтного ресурса подшипника скольжения от температуры в узле

Установлено, что величина нагрева и интенсивность роста температуры в подшипниковых узлах является индикатором их остаточного ресурса в пределах межремонтного интервала и уровня технического состояния. При эксплуатации подшипниковых узлов в системе мощностью 20 МВт, работающих при удельной нагрузке 3,3 МПа в комплекте с цапфами групп Ц_{1.НОМ} и Ц_{2.МИН}, допуск полного радиального биения поверхностей которых составляет 0,011-0,027 мм (3-7 % от толщины масляного слоя 0,41 мм), температура в узлах не превышала 60 °С, что обеспечило штатный режим эксплуатации подшипников с вероятностью безотказной работы 90 % в течение установленного межремонтного ресурса в 10000 ч.

При эксплуатации подшипниковых узлов в аналогичных условиях с цапфами группы Ц_{3.ПОВ}, имеющими допуск полного радиального биения 0,083 мм (20 % от толщины масляного слоя 0,41 мм) наблюдался предотказный режим работы [47]. Который характеризовался повышением температур в узле до 84 °С и снижением межремонтного ресурса, что подтверждено испытаниями: у 2 из 8 образцов после 5000 ч наработки зафиксировано зарождение усталостного выкрашивания баббитового слоя вкладышей в зоне максимальных контактных напряжений.

Период эксплуатации опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы при удельной на них нагрузке 3,3 МПа и температуре 84 °С в узлах сопровождается сокращением их межремонтного ресурса с 10000 до 4000 часов. Что обусловлено необходимостью увеличения частоты корректирующего технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию для минимизации рисков аварийного износа.

При этом на основе выше представленных экспериментально установленных зависимостей получены допуски форм поверхностей цапф, соответствующие предельно допустимому значению температуры 70 °С в подшипниках скольжения, составившие: допуск полного радиального биения 0,05 мм, допуск профиля продольного сечения 0,03 мм, допуск круглости 0,019 мм. При таких условиях

работы опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы в составе с цапфами, имеющими данные допуски межремонтный цикл сокращается до 30 % и составляет 7000 часов.

Таким образом, в результате проведенных стендовых испытаний подшипниковых узлов под рабочей нагрузкой в системе мощностью в системе 20 МВт определено, что межремонтный ресурс работы опорного баббитового подшипникового узла скольжения, выраженный во временном эквиваленте работы « T » в часах, определяется величиной установившегося рабочего температурного режима « t » в градусах Цельсия в подшипнике, в свою очередь зависящего от геометрически-точностных характеристик пустотелых цапф в составе узла, и описывается выражением (3.6) [30]:

$$T = -984,5t^2 + 1341,1t + 10047, R^2 = 0,9544, \quad (3.6)$$

где T – межремонтный ресурс, ч;

t – величина нагрева узла, °С;

R^2 – величина достоверности аппроксимации.

Поддержание температуры в рекомендуемых пределах согласно температурному режиму цапф группы Ц_{1.НОМ} позволяет значительно продлить межремонтный срок службы подшипниковых узлов и как следствие самого оборудования – барабанной мельницы, и снизить риск внезапных отказов. Регулярный мониторинг, качественное техническое обслуживание и использование современных технологий охлаждения в системе смазки являются ключевыми факторами в обеспечении надежной эксплуатации подшипниковых узлов.

Полученная функциональная зависимость изменения межремонтного ресурса подшипника скольжения, выраженного во временном эквиваленте « T », от величины нагрева узла « t », характеризуемой отклонением формы поверхностей цапфы, представлена на рисунке 3.15.

Контроль выкрашиваемого баббитового слоя осуществлялся в процессе демонтажа опорного подшипника путем визуально-измерительного контроля (рисунок 3.16).

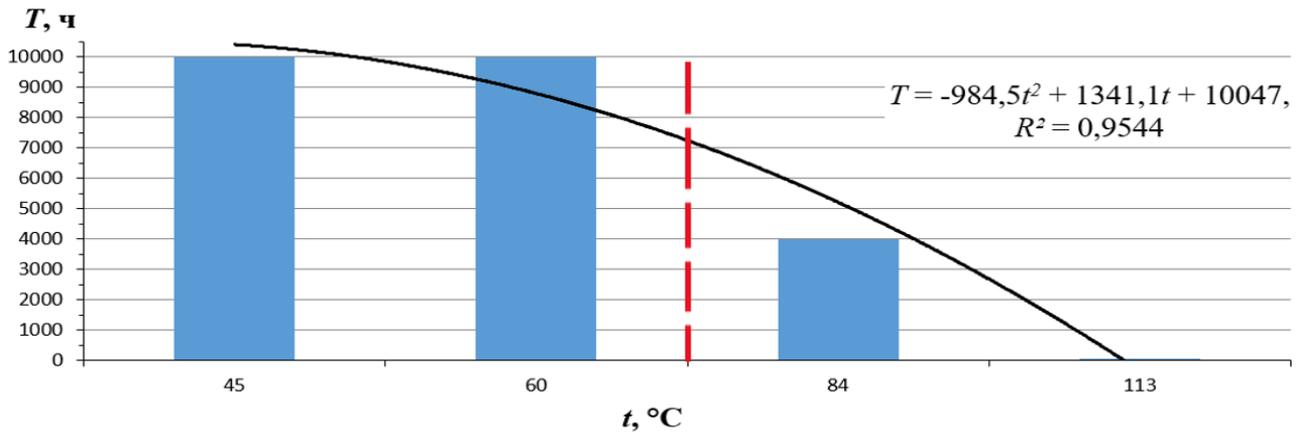


Рисунок 3.15 – Изменение межремонтного ресурса «Т» опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения от величины нагрева узла «t» при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа (составлено автором)



Рисунок 3.16 – Разрушение баббитового слоя вкладыша подшипникового узла при его испытании под нагрузкой по выражению (3.1) и изменению температуры в узле по выражению (3.5) (фото автора)

3.8 Выводы по главе 3

1. В результате проведенных исследований была разработана и апробирована комплексная методика оценки технического состояния опорных баббитовых подшипников скольжения барабанных мельниц на основе анализа величины нагрева и интенсивности роста температуры в узлах. Экспериментальные исследования показали, что температурный режим является одним из наиболее информативных показателей состояния подшипниковых узлов, позволяющим своевременно выявлять зарождающиеся отклонения в геометрии опорных поверхностей пустотелых цапф от номинальных значений и прогнозировать межремонтный ресурс подшипниковых узлов.

2. Проведенные исследования позволили выявить функциональную зависимость между геометрическими параметрами цапф и величиной нагрева в подшипниковом узле. Установлено, что при эксплуатации подшипниковых узлов в системе мощностью 20 МВт, работающих при удельной нагрузке 3,3 МПа в комплекте с цапфами допуск полного радиального биения поверхностей которых составляет 7 % от толщины масляного слоя – температура в узлах не превышала 60 °С, а при допуске полного радиального биения в 20 % от толщины масляного слоя температура достигает 84 °С. При допуске полного радиального биения в 46 % от толщины масляного слоя возникает аварийный режим работы с повышением температуры свыше 120 °С, что приводит к выкрашиванию баббитовых вкладышей и отказу подшипника.

3. Важным результатом исследования стало выявление зависимости изменения межремонтного ресурса подшипника скольжения от величины нагрева в узле. При температуре до 45 °С обеспечивается штатный режим эксплуатации с межремонтным ресурсом 10000 часов. При температуре 84 °С ресурс сокращается до 4000 часов, а при достижении 123 °С происходит полный выход подшипника из строя в течение 60-70 часов работы. Установлены предельные допуски форм поверхностей цапф, соответствующие предельно допустимой температуре 70 °С: допуск полного радиального биения 0,05 мм, допуск профиля продольного сечения 0,03 мм, допуск круглости 0,019 мм. При данных допусках цапфы в составе подшипникового узла его межремонтный ресурс сокращается до 30 % и составляет 7000 часов.

4. Даны предложения прогнозной оценки величины остаточного ресурса подшипников в пределах межремонтного интервала на основе анализа изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в узлах, что позволяет своевременно выявлять зарождающиеся дефекты и предотвращать аварийные отказы оборудования. Внедрение системы температурного мониторинга с функцией анализа изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниках обеспечивает не только контроль текущего состояния узлов, но и формирование достоверных прогнозов их дальнейшей эксплуатации, что способствует повышению надежности работы оборудования и оптимизации затрат на его обслуживание.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ЦАФФ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЫ БЕЗ ИХ ДЕМОНТАЖА НА МЕСТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В современных условиях эксплуатации горного оборудования особую актуальность приобретает вопрос адекватной оценки технического состояния ключевых ресурсопределяющих узлов оборудования, в частности барабанных мельниц, в рамках мероприятий по совершенствованию их ТОиР с учетом специфики эксплуатации. Нет сомнений в том, что своевременная информация о параметрах работоспособности барабанных мельниц, характеризующая уровень стабильности состояния работы их ресурсопределяющих узлов, была бы полезна для обеспечения раннего предупреждения о неисправностях и предотвращения ненужных дорогостоящих ремонтных работ последних, когда можно было бы обойтись лишь корректирующим техническим обслуживанием [31].

Специфика эксплуатации барабанной мельницы заключается в том, что последние размещаются в ограниченных производственных пространствах на технологическом месте стояния. Проведение внеплановых ремонтных работ до наступления планового межремонтного срока наработки оборудования усугубляется тем, что традиционный подход к ремонту, предполагающий полный демонтаж корпуса мельницы для доступа к опорным узлам и транспортирование его частей и элементов вне зоны комплекса для проведения ремонтных работ, требующий как значительных временных затрат, так и несущий существенные экономические потери из-за простоя оборудования – является экономически нецелесообразным.

В связи с этим возникает объективная необходимость внедрения системы регулярной оценки технического состояния опорных подшипников. А именно переход от традиционного метода оценки по фактическому состоянию ресурсопределяющих узлов к непрерывному контролю в режиме реального времени. Система должна фиксировать ключевые параметры-индикаторы

работоспособности ресурсопределяющих узлов с помощью автоматизированной системы управления для своевременного проведения корректирующих мероприятий [111]. Это позволит восстанавливать техническое состояние узлов до номинальных значений и прогнозировать межремонтный ресурс. В случае критических ситуаций предусматривается использование заранее подготовленного модульного комплекта вспомогательного оборудования и технологической оснастки для проведения ремонтных работ [38]. Такая система позволяет своевременно выявлять признаки критического износа и рационально планировать ТО, что значительно продлевает срок службы оборудования и снижает риски аварийных остановок.

При таком подходе эффективность работы горного оборудования должна оцениваться на всем временном промежутке эксплуатации с учетом технических, технологических и организационных факторов, взаимосвязанности их друг с другом, что глобально решается в рамках теротехнологии, обеспечивающей комплексный подход в рамках непрерывного мониторинга с выявлением и своевременным устранением причин, снижающих эффективность функционирования оборудования [27].

За базовый уровень ТО принят поузловой уровень разукomплектования с эшелонem ремонта базовых деталей на точке установки мельницы, без полной разборки корпуса – без демонтажа пустотелых цапф. Концепция ТО подшипниковых цапф предполагает предупредительный характер при плановой оценке технического состояния подшипниковых узлов в период проведения соответствующего осмотра и по контролю изменения величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковом узле. Что касается методов ТО, то применимы параллельно-последовательный, эксплуатационный и метод ТО специализированным персоналом. По результатам мониторинга и допустимом риске проводят профилактическое ТО, в противном случае – корректирующее с остановкой мельницы в удобный период времени. Формализованная методология контроля необходимости проведения ТОиР оборудования проводится с использованием контрольных карт Шухарта, что позволяет заблаговременно планировать сроки и время проведения ремонта основываясь на постоянной оценке

изменения ключевых параметров и характеристик, обладающих высокими показателями обратной связи и прямо пропорционально сказывающихся на работоспособности ресурсопределяющих узлов [27].

Для реализации данного подхода также требуется разработка и внедрение специальных вспомогательных ремонтных комплектов и технологической оснастки, позволяющих выполнять восстановительные работы опорных цапф подшипниковых узлов барабанной мельницы без необходимости полного демонтажа ее корпуса [37]. Это включает создание компактных диагностических инструментов, мобильных ремонтных приспособлений и специализированного оборудования для локальной замены и/или восстановлении изношенных элементов подшипников. Внедрение такой системы технического обслуживания позволяет:

- минимизировать простои оборудования;
- снизить затраты на капитальный ремонт;
- повысить общую эффективность эксплуатации модульных комплексов;
- обеспечить прогнозируемость ремонтных работ;
- оптимизировать складские запасы запасных частей.

Для качественного прогнозирования остаточного ресурса опорных подшипников скольжения барабанной мельницы предпочтительным в условиях ограниченных рабочих пространств является мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в узле при штатной эксплуатации мельницы, что служит критерием качественной идентификации процесса изнашивания, представленного в главе 3, и позволяет производить оценку температурных показателей совмещенных с построением особых трендов на основе карт Шухарта (ГОСТ Р ИСО 7870-2- 2015) [27].

Таким образом, разработка и внедрение комплексной системы оценки технического состояния опорных подшипников и специального ремонтного оборудования является необходимым условием для обеспечения эффективной и бесперебойной работы барабанных мельниц в составе ГОКов и модульных комплексов горного оборудования свинцово-цинковых месторождений.

4.1 Оценка технического состояния опорных подшипников барабанной мельницы на основе применения карт Шухарта

Телеметрический подход, в рамках внедрения и применения SCADA-систем позволяет преобразовывать технологический процесс в управляемый, а также основываясь на анализе технического состояния объекта по его полученным выходным характеристикам, дает возможность, в долгосрочной перспективе – прогнозировать временной период, в котором необходимо своевременное проведение ТОиР. Что позволяет провести актуализацию и корректировку плана мероприятий ТО в зависимости от состояния горного оборудования, позволяя снизить нагрузку на ремонтное подразделение в условиях малой маневренности ресурсов [73] и возможности распределения персонала сразу на несколько проблемных участков. Применение на оперативном горизонте планирования графика ТОиР на основе мониторинга состояния оборудования с автоматизированного места управления будет заключать в себе проведение регулярной оценки технического состояния подшипниковых опор скольжения барабанной мельницы в процессе ее эксплуатации при выходе на режим, осуществляя надзорно-контрольные операции по оценке работоспособности мельницы по вторичным показателям. В качестве индикатора оценки выбрана величина нагрева и интенсивность роста температуры внутри подшипникового узла скольжения, которая служит критерием качественной идентификации процесса изнашивания и позволяет производить оценку температурных показателей совмещенных с построением особых трендов на основе контрольных карт Шухарта [27].

Для составления контрольной карты Шухарта средних значений для количественных данных температуры подшипникового узла скольжения были проведены стендовые исследования. В связи с чем, были отобраны 12 передаточных узлов в составе с опорными цапфами, геометрический профиль которых соответствует группе $\text{Ц}_{1,НОМ}$ (таблица 3.1). Измерение геометрических характеристик, отобранных пустотелых подшипниковых цапф проводилось как указано в разделе 3.2 главы 3. Материал цапф, их размеры, материал вкладышей и

тип масла для создания масляной подушки в подшипниковом использовались аналогично образцам из раздела 3.4.

Таким образом для построения контрольных карт Шухарта средних значений исследовались 24 выборки опорных подшипниковых узлов скольжения. Оценка величины нагрева и интенсивности роста температуры опорных подшипниковых узлов скольжения для каждой выборки осуществлялась на аттестованном испытательном стенде из раздела 3.1, где нагрузка в системе изменялась ступенчато посредством гидравлического торсионного нагружателя в течение времени, ограничиваемого предельным временем испытаний или по показаниям диагностических датчиков (в случае интенсивного изменения контролируемых температурных значений) при нормальных климатических условиях. Продолжительность испытаний под рабочей нагрузкой в данном случае суммарно составляло 144 ч, из которых 12 ч приходилось на каждый исследуемый передаточный узел с двумя подшипниковыми узлами [27].

Регистрация показаний параметров работоспособности подшипниковых узлов и создаваемой мощности в системе производилась АСУ в режиме реального времени с автоматизированного рабочего места [29]. Снятие величин температурных значений в подшипниковом узле скольжения проводилось с помощью термопреобразователя ТПК-67-060 аналогично методике указанной в разделе 3.3, также контролировалось и давление масла, подаваемого в узел, с помощью преобразователя давления ПДК-67-И-01М0. Исследования выборок передаточных узлов проводилась при следующих нормальных климатических условиях: температура окружающей среды от +15 до +35 °С при показателях относительной влажности воздуха от 45 до 80 % и атмосферном давлении от 86 до 106кПа. Температура используемой охлаждающей воды находилась в пределах от 0 до 30 °С [27].

Снятие показаний величины и изменения температуры внутри подшипникового узла скольжения производилось в режиме реального времени с периодичностью фиксации контролируемых данных через каждые 10 минут для удобства проведения дальнейших расчетов и составления контрольной карты

Шухарта средних значений температур. При этом, контроль температурной характеристики осуществлялся только при выходе передаточного узла на установившийся режим работы, характеризующийся создаваемой мощностью в системе стенда равной 20 МВт. Контроль величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном подшипнике в процессе выхода на режим и во время технологических остановок не учитывался [27]. Для расчета контрольной карты принимался промежуток испытаний длительностью в 250 мин. для каждой из 24 выборок подшипниковых узлов, т.к. эмпирически в ходе проведения испытаний было установлено, что этого времени хватает (с учетом запаса) для того, чтобы величина рабочего температурного поля полностью вошла в неизменяющийся диапазон значений (в установившийся режим) и не превышала их в течение всех 12 ч испытаний для каждой выборки. Также данные временные промежутки фиксации температурных значений и их периодичность были выбраны с учетом дальнейших испытаний подшипниковых узлов в составе с цапфами с повышенными отклонениями в геометрическом профиле с учетом применения мероприятий корректирующего ТО по поддержанию температуры в подшипниковых узлах.

В ходе проведения стендовых испытаний, основываясь на полученных эмпирических данных величины нагрева и интенсивности роста температуры подшипниковых узлов в составе с цапфами с геометрическим профилем Ц_{1.ном} не наблюдалось изменение температуры: менее 29,5 °С и более 43,9 °С. Часть выборок испытуемых подшипниковых узлов с фиксацией температурных показателей представлена в таблице 4.1.

Для построения контрольной карты Шухарта средних значений температур на основе полученных экспериментальных данных получены следующие расчетные значения: средняя температура 38,9 °С; стандартное отклонение σ для $n-1$ – 4,43°С; нижняя предельная граница для 3σ – 25,6 °С; верхняя предельная граница для 3σ – 52,2 °С; нижняя предупредительная граница для 2σ – 30,0 °С; верхняя предупредительная граница для 2σ – 47,8 °С. Ключевые линии карты: центральная линия средних значений, предельные и предупредительные границы сведены в таблицу 4.2 [29].

Таблица 4.1 – Фиксация величины установившегося рабочего температурного режима для испытываемых подшипниковых узлов в составе с цапфами с геометрическими параметрами профилей группы Ц_{1.НОМ} (составлено автором)

Точка фиксации температурного параметра выборки с промежутком в 10 мин.	Величина зафиксированного температурного параметра для каждого номера выборки (подшипникового узла), °С								Среднее значение \bar{X} , °С	Размах R , °С
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	...	№ 23	№ 24		
точка 1	34,5	32,4	41,8	33,9	39,9	...	41	41,2	36,91	12,6
точка 2	34,5	32,4	42,3	34,3	40,1	...	41,4	41,9	37,24	12,9
точка 3	34,9	32,8	42,5	34,3	40,4	...	42	42,3	37,58	12,9
точка 4	35,2	32,8	42,8	34,5	40,6	...	42,2	42,5	37,86	12,9
точка 5	35,6	33,3	43	34,8	40,9	...	42,5	42,6	38,11	12,6
точка 6	35,7	33,4	43,1	35,1	41,1	...	42,9	42,9	38,28	12,4
точка 7	35,9	33,7	43,2	35,3	41,3	...	43	42,9	38,45	12,2
точка 8	36,1	33,7	43,2	35,5	41,4	...	43,1	43,2	38,59	12,2
точка 9	36,3	33,9	43,4	35,7	41,3	...	43,1	43,3	38,70	12
точка 10	36,5	34	43,5	35,9	41,4	...	43,2	43,3	38,83	11,9
точка 11	36,5	34,1	43,5	35,9	41,5	...	43,2	43,3	38,92	11,7
точка 12	36,7	34,3	43,6	36,2	41,6	...	43,2	43,4	39,03	11,6
точка 13	36,9	34,5	43,6	36,4	41,5	...	43,3	43,5	39,12	11,6
точка 14	36,9	34,5	43,6	36,5	41,7	...	43,5	43,5	39,18	11,7
точка 15	36,9	34,5	43,6	36,5	41,9	...	43,5	43,6	39,27	11,6
точка 16	37,1	34,8	43,6	36,5	42	...	43,6	43,6	39,35	11,4
точка 17	37,1	34,8	43,8	36,7	42	...	43,6	43,6	39,41	11,4
точка 18	37,2	34,8	43,9	36,8	42	...	43,6	43,6	39,48	11,4
точка 19	37,2	35	43,9	36,8	42	...	43,6	43,7	39,53	11,2
точка 20	37,4	35,2	43,9	36,8	42,2	...	43,6	43,8	39,61	11,1
точка 21	37,4	35,2	43,9	36,8	42,3	...	43,6	43,8	39,65	11
точка 22	37,7	35,3	43,9	36,9	42,5	...	43,6	43,8	39,72	10,9
точка 23	37,7	35,3	43,9	37,1	42,5	...	43,6	43,8	39,75	10,7
точка 24	37,7	35,3	43,9	37,1	42,5	...	43,6	43,8	39,77	10,5
точка 25	37,7	35,3	43,9	37,1	42,5	...	43,6	43,8	39,77	10,4

Контрольная карта Шухарта средних значений температур опорного баббитового гидростатического подшипника скольжения, построенная на основе расчетов по эмпирически полученным данным в ходе проведения стендовых испытаний представлена на рисунке 4.1. Построенная контрольная карта Шухарта является ключевым инструментом для мониторинга и контроля температурного режима в опорных подшипниковых узлах скольжения. Ее основное предназначение заключается в обеспечении стабильной и безопасной работы

опорных подшипниковых узлов барабанной мельницы путем своевременного выявления отклонений температурного режима от нормативных показателей и принятия соответствующих мероприятий по стабилизации процесса.

Таблица 4.2 – Расчетные ключевые линии (границы) на основе полученных экспериментальных данных температур опорных подшипниковых узлов скольжения при удельной нагрузке на опорные узлы в размере 3,3 МПа для построения контрольной карты Шухарта средних значений (составлено автором)

Центральная линия средних значений, °С	Нижняя предельная граница для 3σ , °С	Верхняя предельная граница для 3σ , °С	Нижняя предупредительная граница для 2σ , °С	Верхняя предупредительная граница для 2σ , °С
38,9	25,6	52,2	30,0	47,8

В контексте контроля величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковом узле расчетная контрольная карта Шухарта позволяет:

1. Отслеживать динамику интенсивности изменения температуры в опорном подшипнике скольжения в режиме реального времени;
2. Выявлять тенденции к перегреву или переохлаждению подшипникового узла барабанной мельницы;
3. Определять моменты выхода температуры за установленные обоснованные предупредительные и предельные границы для своевременного принятия мер по стабилизации процесса и поддержания работоспособности подшипникового узла.

При обнаружении отклонений в температурном режиме опорного подшипникового узла скольжения от установленных расчетных границ контрольной карты Шухарта, подобная система мониторинга позволяет:

- Своевременно принять меры по стабилизации процесса и поддержания работоспособности подшипникового узла – поддержанию температуры в допустимых пределах;
- Предотвратить преждевременный износ деталей подшипникового узла барабанной мельницы, в частности пустотелых опорных цапф барабана;

- Избежать аварийного отказа и снижения межремонтного ресурса подшипникового узла;
- Оптимизировать график технического обслуживания опорных подшипников скольжения, как ресурсопределяющих узлов барабанной мельницы с учетом ее эксплуатации в условиях ограниченного рабочего пространства.



Рисунок 4.1 – Расчетная контрольная карта Шухарта средних значений для мониторинга температуры в опорном баббитовом гидростатическом подшипнике скольжения в процессе экспликации при удельной нагрузке на узел 3,3 МПа (составлено автором)

Особенно важным аспектом является возможность раннего выявления признаков нарушения геометрического профиля пустотелых опорных цапф корпуса барабанной мельницы, что может привести к повышению температуры в подшипниковых узлах до критических значений и существенному снижению их межремонтного ресурса. Полученная контрольная карта Шухарта средних значений температур опорного баббитового гидростатического подшипника позволяет оперативно реагировать на такие изменения еще до того, как они приведут к серьезным последствиям. Таким образом, контрольная карта Шухарта является незаменимым инструментом для обеспечения безотказной работы барабанной

мельницы путем отслеживания величины нагрева и интенсивности роста температуры в ее подшипниковых узлах в режиме реального времени, а также проведения анализа полученных данных для своевременного осуществления мероприятий в рамках корректирующего ТО по поддержанию величины температурного режима в допустимых пределах, тем самым выявляя и предотвращая потенциальные неисправности на ранних стадиях их проявления.

В процессе эксплуатации барабанной мельницы в условиях ограниченных рабочих пространств ГОКов и модульных комплексов горного оборудования в составе свинцово-цинковых месторождений предлагается производить мониторинг опорных баббитовых гидростатических подшипниковых узлов скольжения в режиме реального времени с нанесением полученных фиксируемых температурных данных на эмпирически полученную расчетную контрольную карту Шухарта с фиксированными значениями границ, как представлено на рисунке 4.2 [27].

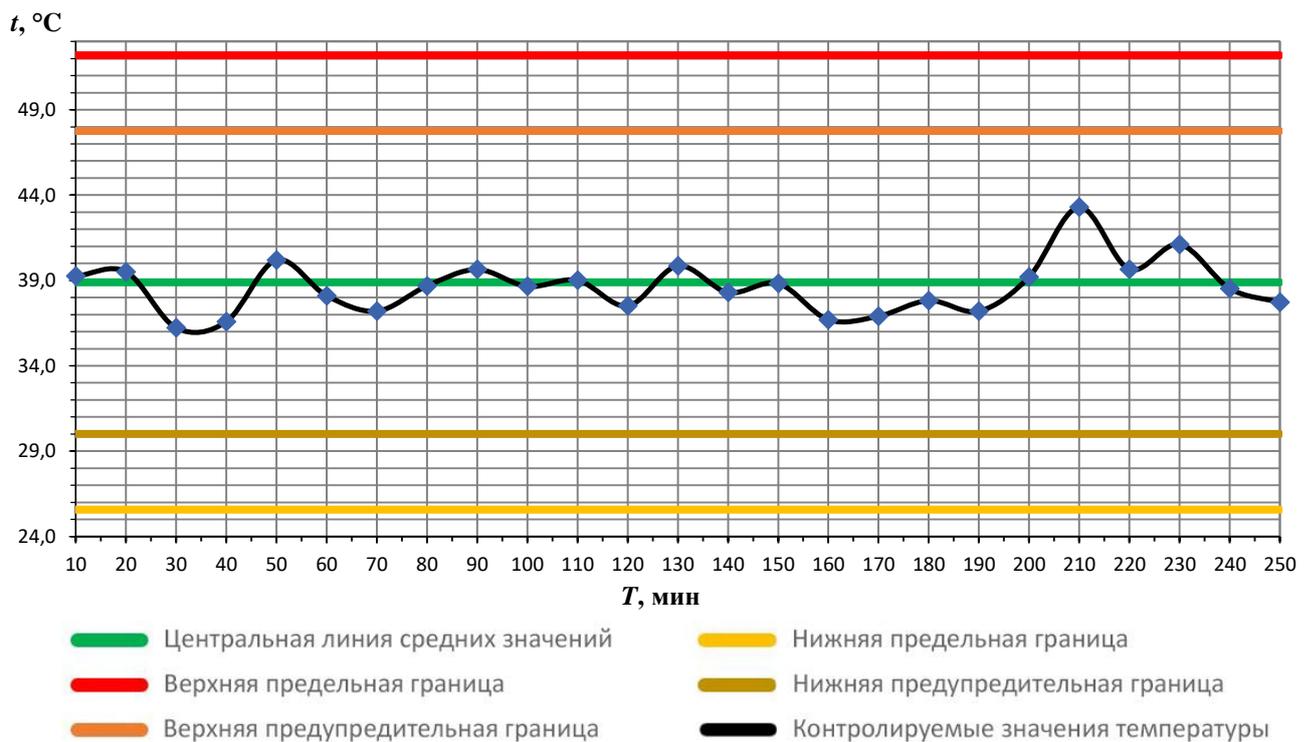


Рисунок 4.2 – Мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном баббитовом гидростатическом подшипнике скольжения с цапфой группы Ц_{1.НОМ} в режиме реального времени с нанесением полученных данных на расчетную контрольную карту Шухарта с фиксированными значениями границ (составлено автором)

4.2 Алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по обеспечению работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы

Для обеспечения работоспособности опорных подшипниковых узлов скольжения барабанной мельницы при ее эксплуатации в условиях ограниченных рабочих пространств необходим комплексный подход к техническому обслуживанию и ремонту опорных узлов. Ключевым моментом в данных условиях эксплуатации является регулярный мониторинг технического состояния ресурсопределяющих узлов – опорных подшипников, который включает в себя постоянный контроль величины нагрева и интенсивности роста температуры внутри узла. Также при классическом подходе производится в основном оценка уровня вибрации и шума при работе барабанной мельницы, однако она является менее эффективной при анализе процесса зарождения геометрических отклонений поверхностей формы подшипниковых цапф, а также требует уточнений в зависимости от режима дезинтеграции рудного сырья и корректировки с учетом другого применяемого оборудования дезинтеграции в условиях общих ограниченных рабочих пространств и входящего вместе с мельницей в единую потоковую технологическую цепочку получения концентратов. Особое внимание уделяется и анализу смазочной системы, так как именно она играет определяющую роль в работе опорных подшипников скольжения в условиях высоких удельных нагрузок.

Также для предотвращения возникновения абразивного изнашивания поверхностей деталей в опорном подшипниковом узле особое значение приобретает его защита от попадания пыли и посторонних частиц. Для чего в последнее время активно устанавливаются дополнительные фильтры, улучшаются уплотнительные элементы, обеспечивая герметичность узла, в том числе осуществляется и их плановая очистка вместе с проверкой состояния защитных устройств. Уделяется внимание и обучению персонала правильной эксплуатации, и обслуживанию подшипникового узла. Операторы должны быть обучены распознавать первые признаки неисправностей и правильно реагировать на отклонения от нормального режима работы. При обнаружении серьезных дефектов осуществляется немедленная

остановка оборудования для предотвращения аварийных ситуаций и избежание дорогостоящего ремонта. Все проведенные работы документируются, составляется график следующего обслуживания, разрабатываются рекомендации по эксплуатации. При этом важно отметить, что все работы должны выполняться квалифицированным персоналом с использованием оригинальных запчастей и материалов, строго соблюдая технологические регламенты.

Традиционный подход в рамках ТОиР при обнаружении первых признаков повышенной интенсивности изнашивания или перегрева опорных подшипников скольжения предполагает незамедлительное проведение диагностических мероприятий при осуществлении полного демонтажа подшипниковых узлов. В первую очередь производится тщательный осмотр опорных поверхностей подшипников на предмет наличия механических повреждений, следов абразивного износа или перегрева. Проверяется состояние смазочных каналов и их проходимость, оценивается качество и количество смазочного материала. В случае выявления отклонений от нормативных показателей проводится комплекс корректирующих мероприятий. Это может включать замену изношенных деталей, восстановление центровки (соосности) одной опорной цапфы относительно другой, регулировку зазоров в подшипниковом узле. Однако в специфических условиях эксплуатации барабанных мельниц в ограниченном пространстве в составе модульных комплексов горного оборудования, в частности применительно к мельницам плавучего комплекса, через который проходит объем сырья в размере 250 тыс. тонн цинкового и 70 тыс. тонн свинцового концентрата в год – корректирующие мероприятия по возвращению работоспособности опорных подшипниковых узлов скольжения барабанной мельницы в рамках традиционного подхода к ТОиР не представляются возможными к реализации в полном объеме, так как для проведения демонтажа подшипниковых узлов придется внепланово останавливать часть потокового производства и сопутствующего оборудования, задействовать ограниченный объем ремонтного персонала и подъемно-транспортных средств, что как итог скажется на увеличении вспомогательного времени при получении рудного сырья и приведет к экономическим потерям.

В связи с чем, необходимо уделять особое внимание корректированию и регулированию системы смазки подшипников, которая должна обеспечивать подачу смазочного материала во все рабочие зоны опорного подшипника скольжения так, чтобы обеспечивать поддержание его работоспособности до плановой остановки барабанной мельницы путем поддержания температуры в узлах в допустимых пределах согласно расчетной контрольной карте Шухарта представленной на рисунке 4.2. Для чего основываясь на полученных в ходе эксперимента данных согласно предлагаемой методике мониторинга работоспособности опорного подшипникового узла скольжения, в режиме реального времени по величине нагрева и интенсивности роста температуры в нем разработана блок-схема алгоритма мероприятий корректирующего технического обслуживания по обеспечению работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы (рисунок 4.3). Разработанный алгоритм также позволяет обоснованно принимать решение о необходимости в направлении подшипниковых цапф в ремонт до наступления их предельного состояния [27].

Важным элементом алгоритма является профилактика температурных перегрузок, для чего осуществляется корректировка температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения смазки и регулировка давления подачи масла в зону масляного слоя для обеспечения соблюдения допустимого диапазона температур в подшипниках скольжения барабанной мельницы. Изменяя в АСУ данные параметры в системе работы смазки – заблаговременно можно отладить процесс. При плавном изменении показателей температуры, ее изменение, в большинстве случаев, может быть вызвано изменением внешних условий среды.

На рисунке 4.4 представлен мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике с цапфой группы $\Pi_{2.мин}$ (см. таблицу 3.1) при корректирующих мероприятиях, направленных на работу системы смазки, в режиме реального времени с нанесением полученных данных на расчетную контрольную карту Шухарта с фиксированными значениями предупредительных границ. В случае с цапфой группы $\Pi_{2.мин}$, где только начинается зарождение процесса изменения температурного режима из-за геометрических отклонений

поверхностей формы цапфы – своевременно можно произвести корректировку работы системы смазки для поддержания межремонтного ресурса до момента плановой остановки, нивелируя тем самым риск возникновения отказа. При этом охлаждающая система должна обеспечивать эффективное охлаждение масла с температуры не более 85 °С на выходе до температуры не более 50 °С на входе при прокачке масла в подшипник под давлением 1,5-4 Мпа [27].

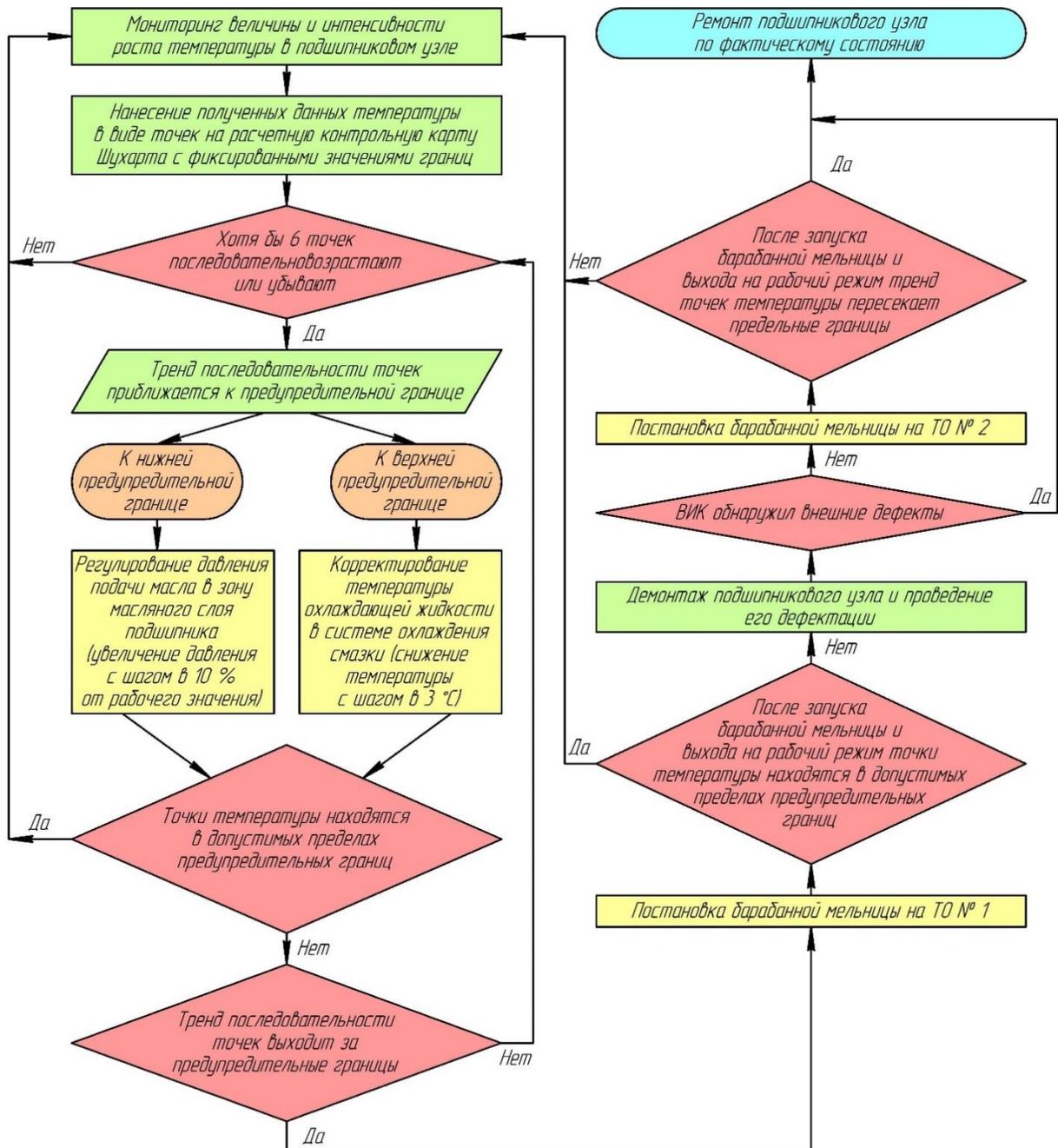


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма мероприятий корректирующего технического обслуживания по обеспечению работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы (составлено автором)

Согласно приведенному алгоритму мероприятий корректирующего технического обслуживания, при систематическом снижении температуры до нижней предупредительной границы контрольной карты производится регулирование давления масла путем ступенчатого увеличения с шагом 10 % от величины рабочего давления и временем стабилизации температуры в течение 300 секунд. Повышение давления масла в системе смазки увеличивает скорость его циркуляции, включая прохождение через контур охлаждения, что снижает температуру масляного слоя в подшипнике без необходимости уменьшения температуры охлаждающей жидкости. При приближении температуры к верхней предупредительной границе в качестве корректирующих мероприятий производится снижение температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения смазки.

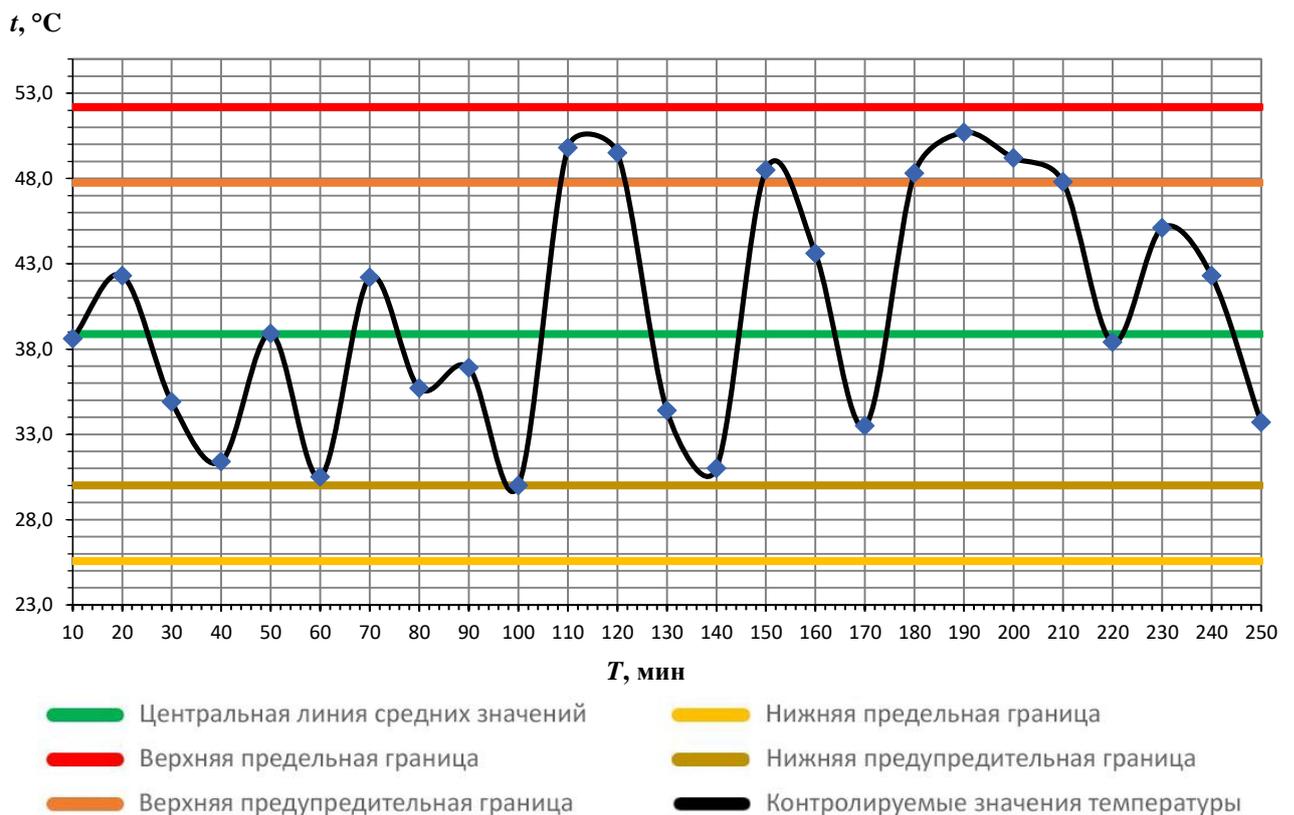


Рисунок 4.4 – Мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике с цапфой группы Ц_{2.мин} при корректирующих мероприятиях, направленных на работу системы смазки, в режиме реального времени с нанесением полученных данных на расчетную контрольную карту Шухарта с фиксированными значениями границ (составлено автором)

При этом эмпирически установлено, что температура охлаждающей жидкости в системе охлаждения смазки не должна превышать $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и опускаться ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также установлена зависимость изменения температуры в подшипнике скольжения барабанной мельницы, работающей в высокودинамичном режиме, от степени снижения температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения смазки в соотношении 1:3. Таким образом, при понижении температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина температуры в подшипнике снижается на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ при удельной нагрузке на него $3,3\text{ Мпа}$, обеспечиваемой создаваемой мощностью в системе по выражению (3.1). Рекомендуемая величина температуры воды в системе охлаждения составляет $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ при штатной работе барабанной мельницы в установившемся режиме.

Если же идет монотонный тренд изменения температуры с учетом более 6-ти последовательно возрастающих точек фиксации по направлению в сторону верхней предельной границы (при неизменной интенсивности процесса) и корректирующие мероприятия не позволяют осуществить поддержание температуры в допустимых пределах для обеспечения работоспособности подшипника, то это может свидетельствовать о скором возникновении отказа в системе работы подшипникового узла и необходимости остановки мельницы (в зависимости от интенсивности) для проведения ТО и возможной подготовки к проведению восстановительных работ [27].

На рисунке 4.5 представлены результаты мониторинга величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике с цапфой группы Ц_{3.пов} при корректирующих мероприятиях, направленных на работу системы смазки. Как видно из графика, корректировка температуры в данном подшипнике затруднена из-за высокой интенсивности ее изменения, приводящей к ее выходу за верхнюю предельную границу контрольной карты Шухарта и приближающейся к критическому значению в $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует о критических отклонениях формы поверхности цапфы, вызванной процессом изнашивания в ходе длительной эксплуатации барабанной мельницы в условиях высоких динамических нагрузок. Из чего следует, что мероприятия корректирующего технического обслуживания в

соответствии с разработанным алгоритмом исчерпали свою эффективность. Дальнейшее регулирование температуры в подшипнике скольжения для предотвращения разрушения баббитового вкладыша вследствие перегрева невозможно, что требует проведения внепланового ремонта цапфы с целью сохранения работоспособности подшипникового узла.

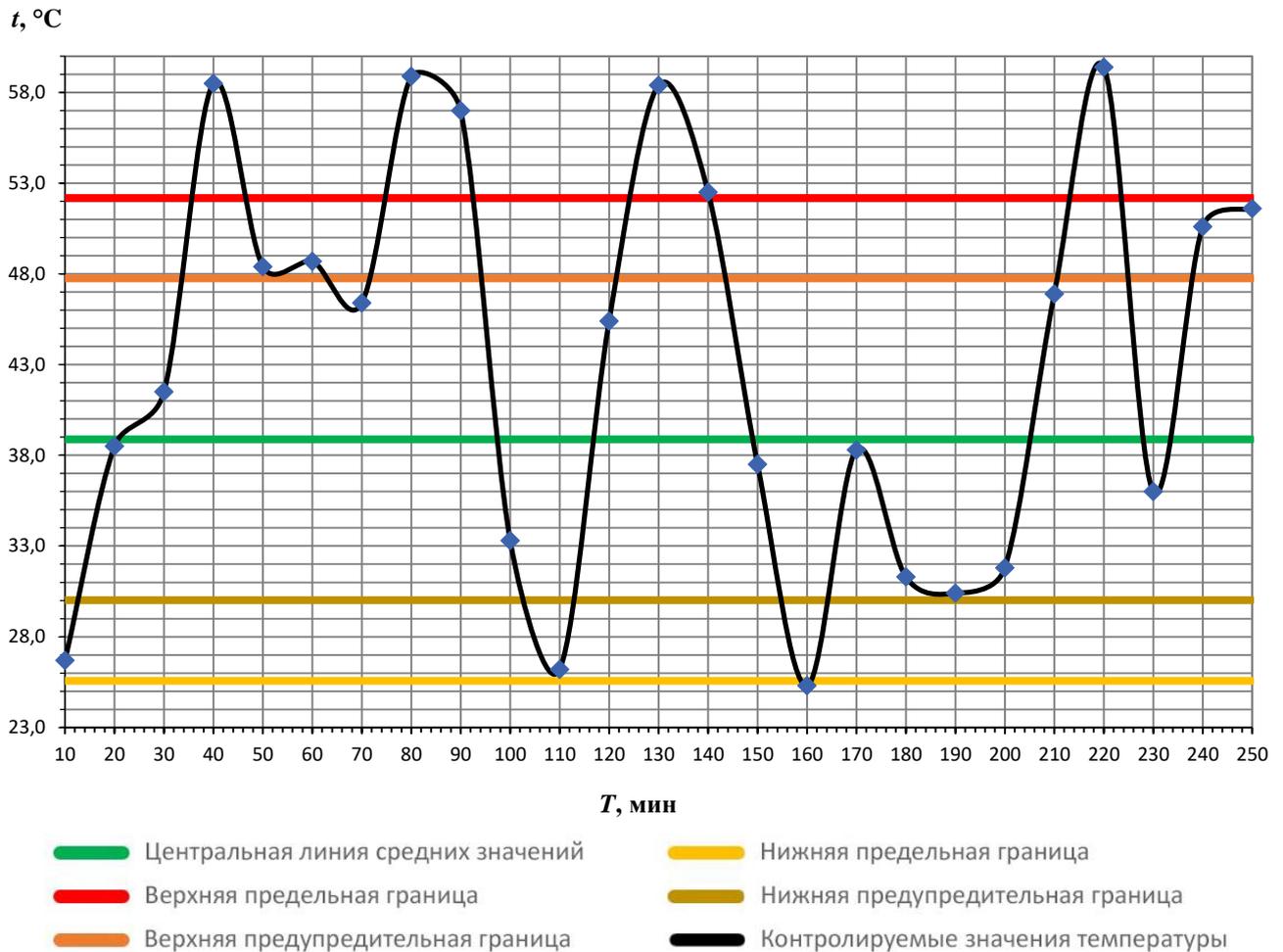


Рисунок 4.5 – Мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике с цапфой группы Ц_{3.пов} при корректирующих мероприятиях, направленных на работу системы смазки, в режиме реального времени с нанесением полученных данных на расчетную контрольную карту Шухарта с фиксированными значениями границ (составлено автором)

Таким образом, предлагаемые расчетные контрольные карты Шухарта, основываясь на диагностическом показателе величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорном баббитовом гидростатическом подшипниковом узле скольжения при номинальной нагрузке и скорости вращения относительно

соответствующей базовой величины, позволяют на основе анализа точек выхода температуры за установленные обоснованные предупредительные и предельные границы выявлять и предотвращать потенциальные неисправности на ранних стадиях их проявления, выполняя соответствующие корректирующие мероприятия ТО согласно разработанному алгоритму по поддержанию температуры в опорных подшипниках скольжения барабанной мельницы в допустимых пределах. Это также позволяет обоснованно принимать решения о необходимости своевременного проведения ремонта опорных цапф при исчерпании возможности удержания заданного уровня температуры подшипниковых опор работающей мельницы [27].

Разработанный алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения на основе непрерывной оценки их технического состояния по величине нагрева и интенсивности роста температуры внутри узлов, фиксируемой в контрольной карте Шухарта, планируется к внедрению в рамках проведения актуализации программы и методики аттестации стендов для проведения испытаний редукторных передач повышенной и большой мощности с баббитовыми подшипниками скольжения на ПАО «ЗВЕЗДА» (Приложение Б).

Принимая во внимание тот факт, что барабанные мельницы в составе ГОКов и комплексов горного оборудования жестко базируются в процессе эксплуатации на своих технологических местах в условиях ограниченного рабочего пространства и низкой технологической мобильности, необходимо разрабатывать адаптивный способ ремонтно-восстановительных работ цапф барабанных мельниц и комплект [32].

4.3 Повышение уровня ремонтной технологичности подшипниковых узлов барабанной мельницы

4.3.1 Ремонтный способ цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации

В ходе проведения диссертационного исследования был разработан и предложен способ ремонтно-восстановительных работ цапф барабанных мельниц

с помощью применения модульного комплекта вспомогательного оборудования (Приложение А). Предложенная технология ремонта предназначена для применения в сфере горно-обогатительных производств для проведения восстановительного ремонта пустотелых цапф опорных баббитовых гидростатических подшипниковых узлов скольжения барабанных мельниц. Отличительной особенностью метода является возможность выполнения комплекса ремонтно-восстановительных работ непосредственно на месте установки и эксплуатации барабанной мельницы, без необходимости демонтажа ее корпуса или демонтажа торцевых крышек с пустотелыми опорными подшипниковыми цапфами. Процесс восстановления опорных поверхностей цапф включает установку специальных консолей с разжимными оправками для базирования корпуса барабана мельницы в сборе через загрузочное и разгрузочное отверстия пустотелых опорных подшипниковых цапф. Реализация данной методики обеспечивает повышение качества обработки восстанавливаемых опорных поверхностей цапф, улучшение точности их механической обработки, а также существенное сокращение трудозатрат на проведение монтажных и демонтажных операций.

Для проведения ремонтных работ согласно разработанному способу в составе предприятия, эксплуатирующего барабанную мельницу, закладывается наличие модульного комплекта вспомогательного оборудования (Приложение В) [37]. Модульный комплект вспомогательного оборудования для проведения комплекса мероприятий ремонтно-восстановительных работ пустотелых опорных подшипниковых цапф барабанной мельницы может быть реализован как путем его совмещения с фундаментной площадкой в составе которой установлена барабанная мельница при ее эксплуатации (рисунок 4.6, а), так и иметь полностью мобильную конструкцию путем пристраивания комплекта вспомогательного оборудования к эксплуатируемой барабанной мельнице при проведении ремонтных работ ее опорных подшипниковых цапф (рисунок 4.6, б).

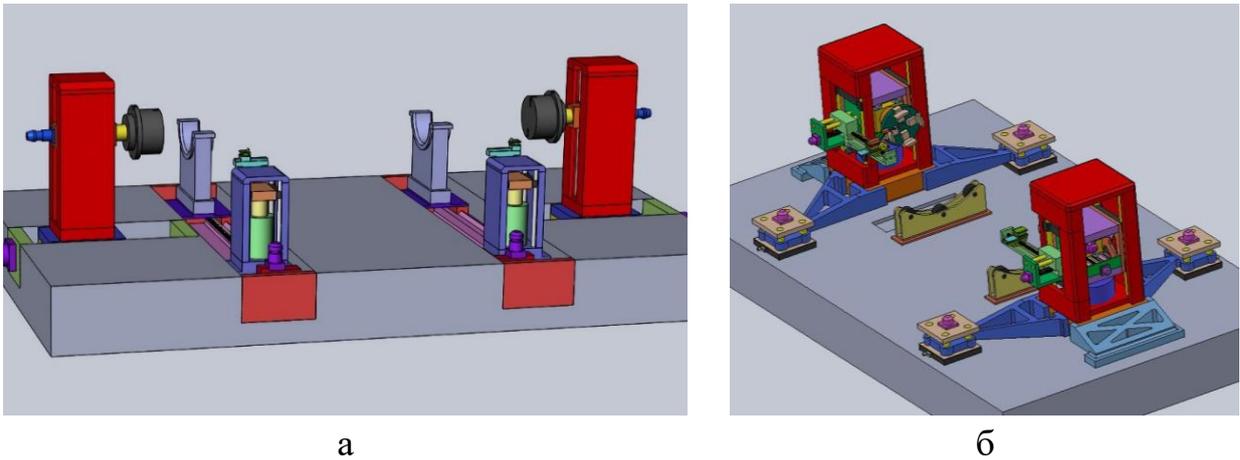


Рисунок 4.6 – Трехмерная модель модульных комплектов вспомогательного оборудования для реализации способа ремонтно-восстановительных работ цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации:

- а – общий вид конструкции комплектов вспомогательного оборудования при совмещении с рабочей фундаментной площадкой барабанной мельницы;
- б – общий вид конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования приставного типа (составлено автором)

4.3.2 Схема базирования корпуса барабанной мельницы при проведении ремонтных работ подшипниковых цапф

Корпус мельницы, включающий в себя барабан с торцевыми литыми крышками с цапфами вращается в процессе эксплуатации вокруг общей оси и условно может быть представлен как монолитное цилиндрическое пустотелое вращения. И исходя из этого, соосное расположение разгрузочной и загрузочной цапф относительно друг друга в процессе проведения ремонта является основополагающим критерием качества проведения восстановительных работ [53]. Это достигается с помощью базирования корпуса барабанной мельницы в процессе ее обработки по внутренним цилиндрическим поверхностям пустотелых опорных цапф [48].

Таким образом, предлагаемый способ ремонтного восстановления цапф осуществляется следующим образом (см. рисунок 4.7, 4.8, 4.9 и 4.10) [48].

Базирование корпуса мельницы при помощи модульного комплекта вспомогательного оборудования осуществляется следующим образом. Для

восстановления загрузочной 2 и разгрузочной 3 опорных подшипниковых цапф барабанной мельницы 1 без демонтажа ее корпуса на месте эксплуатации извлекают втулки 4 из отверстий загрузочной 2 и разгрузочной 3 опорных подшипниковых цапф путем отсоединения болтовых соединений внешних фланцев загрузочной 2 и разгрузочной 3 опорных подшипниковых цапф от фланцев втулок 4 барабанной мельницы 1 (рисунок 4.7 и 4.8) [48].

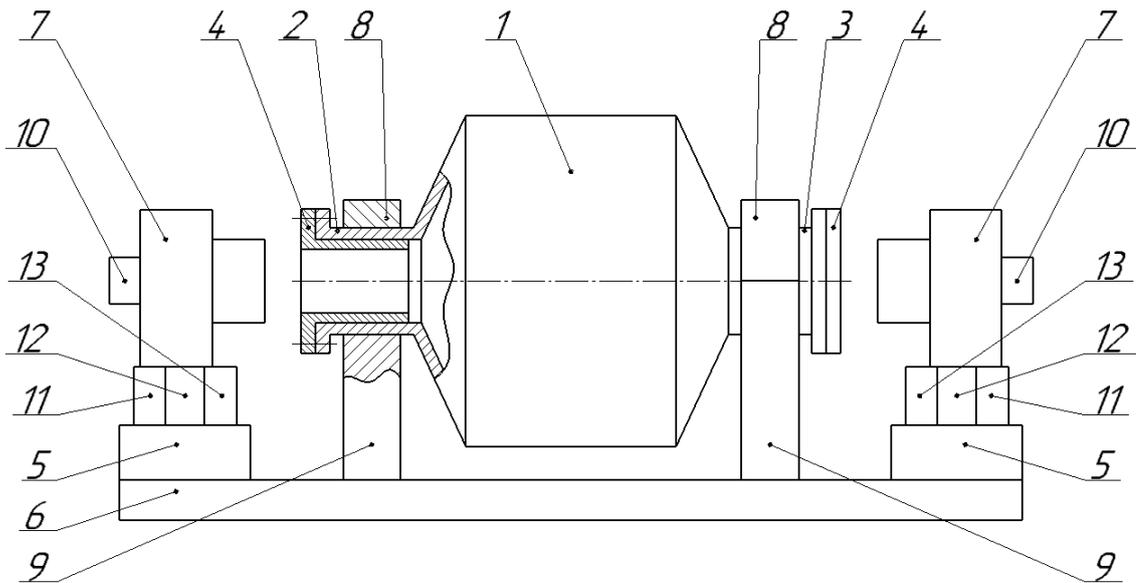


Рисунок 4.7 – Исходное положение модульного комплекта вспомогательного оборудования, вид сбоку: 1 – барабанная мельница; 2 – загрузочная опорная подшипниковая цапфа; 3 – разгрузочная опорная подшипниковая цапфа; 4 – втулки; 5 – комплекты оборудования подвижного инструментального модуля; 6 – опорная фундаментальная платформа; 7 – подвижные консоли временных опор; 8 – верхние крышки опорных подшипниковых узлов скольжения; 9 – нижние части опорных подшипниковых узлов скольжения (откатные подшипниковые опоры); 10 – двигатели разжимных оправок; 11 – сварочное модульное оборудование; 12 – токарное модульное оборудование для механической обработки; 13 – шлифовальное модульное оборудование (составлено автором)

Производят разбор опорных подшипниковых узлов, верхние крышки опорных подшипников скольжения 8 удаляются (рисунок 4.7 и 4.8), подкатывают подвижные консоли 7, вводят разжимные оправки консолей 7 во внутренние поверхности загрузочной

2 и разгрузочной 3 опорных подшипниковых цапф и поднимают барабанную мельницу 1 на подвижных консолях 7, выкатывают нижние части опорных подшипников скольжения 9, после чего центрируют относительно друг друга пустотелые загрузочную 2 и разгрузочную 3 цапфы барабанной мельницы 1 (рисунок 4.9 и 4.10). Соосное базирование цапф достигается за счет применения оптических или лазерных приборов при базировании [48].

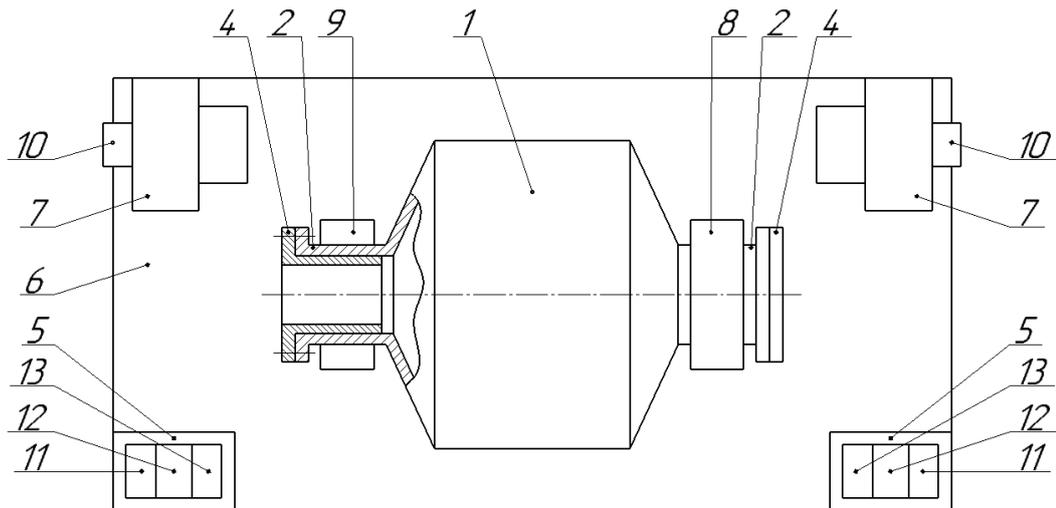


Рисунок 4.8 – Исходное положение модульного комплекта вспомогательного оборудования, вид сверху: 1-13 – см. рисунок 4.7 (составлено автором)

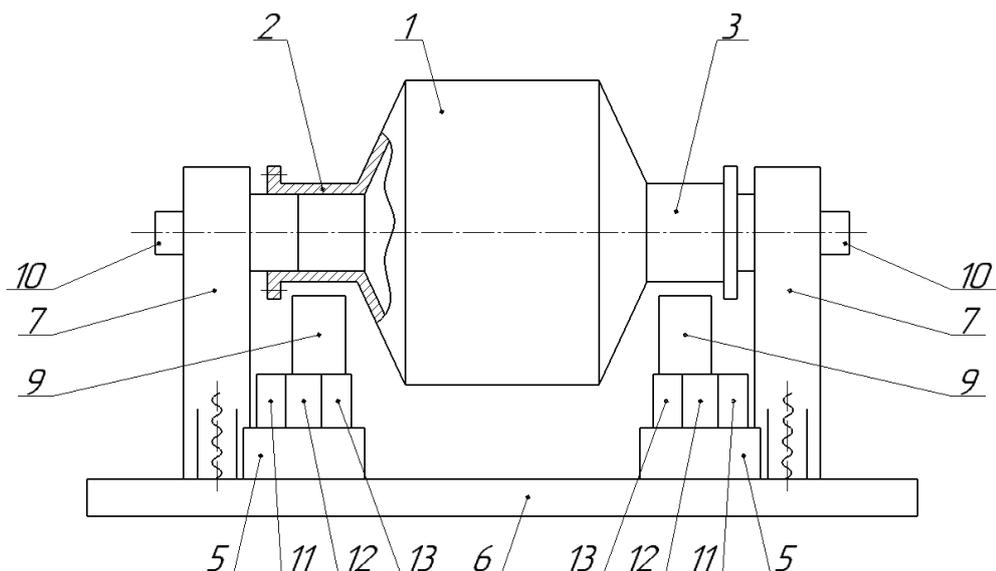


Рисунок 4.9 – Расположение модульного комплекта вспомогательного оборудования в процессе проведения ремонтно-восстановительных работ опорных поверхностей подшипниковых цапф, после базирования корпуса мельницы на временных опорах, вид сбоку: 1-13 – см. рисунок 4.7 (составлено автором)

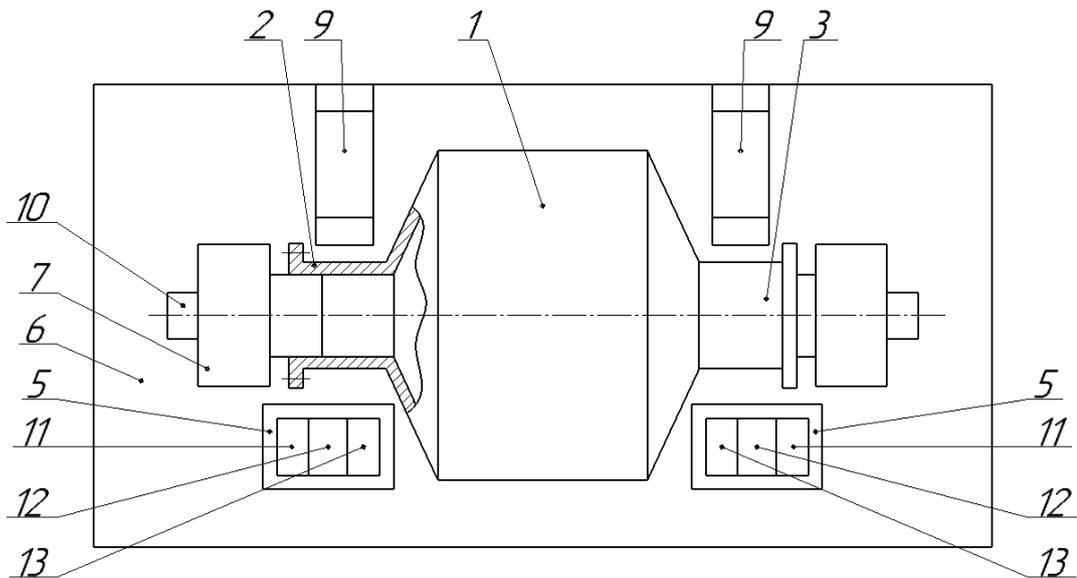


Рисунок 4.10 – Расположение модульного комплекта вспомогательного оборудования в процессе проведения ремонтно-восстановительных работ опорных поверхностей подшипниковых цапф, после базирования корпуса мельницы на временных опорах, вид сверху: 1-13 – см. рисунок 4.7 (составлено автором)

Следовательно, для возможности проведения ремонтных работ по восстановлению опорных поверхностей подшипниковых цапф необходимо забазировать корпус мельницы на предложенном модульном комплекте вспомогательного оборудования, как показано на рисунке 4.11 [37].

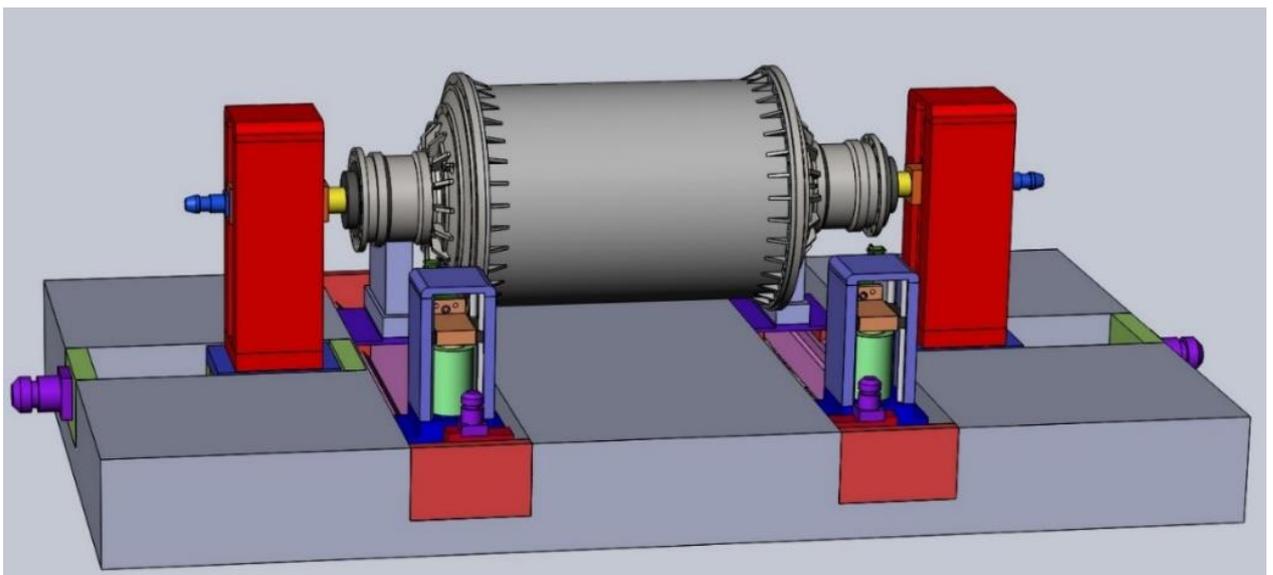


Рисунок 4.11 – Трехмерная модель базирования корпуса барабанной мельницы при помощи модульного комплекта вспомогательного оборудования (составлено автором)

После базирования корпуса мельницы при помощи модульного комплекта вспомогательного оборудования и выполнения всех необходимых подготовительных операций по установке инструментального оборудования, производят ряд технологических операций по проведению ремонтно-восстановительных работ согласно патенту № 2788040 (Приложение А).

4.3.3 Содержание основных работ и этапов, выполняемых при проведении ремонта опорных цапф барабанных мельниц с применением модульного комплекта вспомогательного оборудования

Каждый приставной модульный комплект вспомогательного оборудования оснащен инструментальным узлом с суппортом для размещения ремонтного инструмента [37]. Таким образом, в ходе проведения ремонтно-восстановительных мероприятий, ремонтные модули для наплавки и механической обработки устанавливаются поочередно, а подвижные инструментальные узлы подводятся в зону проведения ремонтно-восстановительных работ опорных цапф как показано на рисунке 4.12.

При проведении ремонтно-восстановительных работ необходимо выполнение четырех основных технологических циклов (операций) [7]:

- очистка поверхностного дефектного слоя с последующим его снятием посредством чернового точения, если необходимо;
- восстановление слоя металла на изношенных поверхностях и локализованных заделанных дефектов путем наплавки или напыления до необходимого уровня согласно ремонтной документации и КД;
- проведение чернового точения излишне нанесенного слоя металла с началом образования опорной цилиндрической поверхности цапф;
- осуществления получистового и чистового точения опорных поверхностей подшипниковых цапф;
- финишного шлифования для обеспечения заданной шероховатости опорных поверхностей (или алмазного выглаживания) и масляного зазора между цапфой и баббитовым вкладышем подшипника.

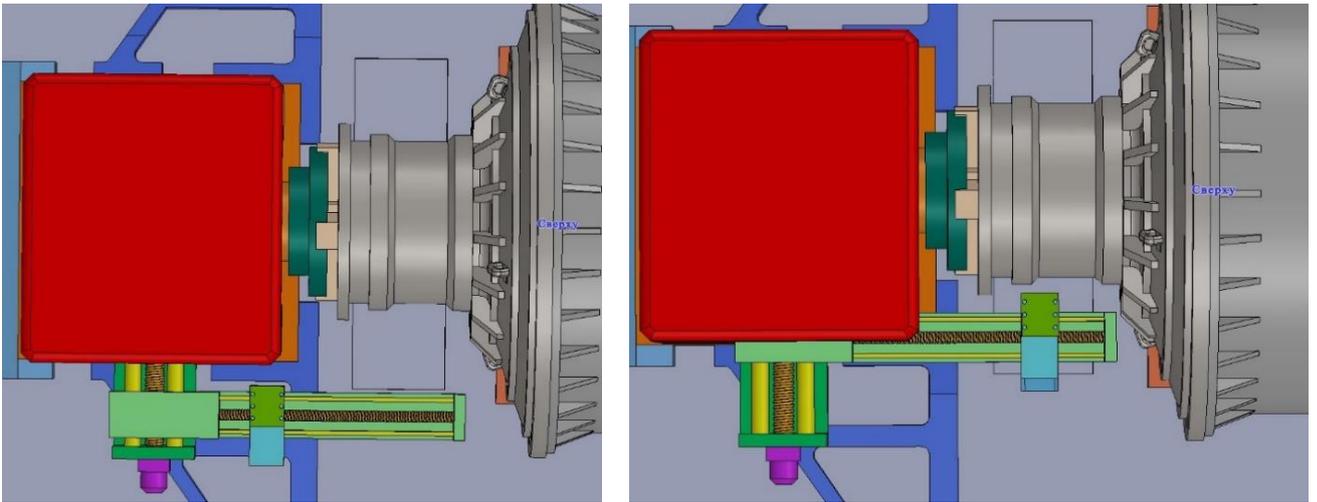


Рисунок 4.12 – Подвод суппорта инструментального узла в рабочую зону
(составлено автором)

Таким образом, после базирования корпуса мельницы при помощи модульного комплекта вспомогательного оборудования и выполнения всех необходимых для этого действий, производят сначала очистку цилиндрических опорных поверхностей подшипниковых цапф от поверхностных наслоений, возникших в результате износа узлов трения. Очистка может осуществляться как с помощью пескоструйного или же дробеструйного оборудования, так и с помощью черного точения поверхностей или механическим путем силой ремонтно-слесарного подразделения. Очистка с помощью оборудования (пескоструйного или же с помощью черного точения) осуществляется в процессе вращения барабанной мельницы, которое передается через разжимные оправки от двигателей, имеющих на приставных ремонтных модульных комплектах временных опор [37].

С помощью поперечного суппорта происходит врезание режущего инструмента в поверхность цапфы и в совокупности с поперечной подачей производится черновое точение их рабочих изношенных поверхностей – дефектного слоя (рисунок 4.13). Точность обработки наружной цилиндрической поверхности восстанавливаемых цапф под наплавку черновым точением с получением концентричных цилиндров по всей их высоте позволяет подготовить условия качественной наплавки [6].

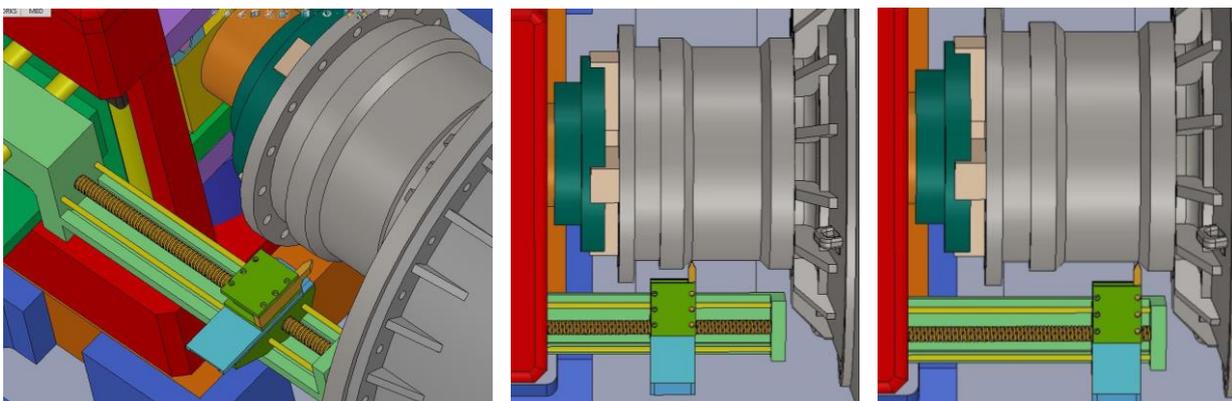


Рисунок 4.13 – Компьютерное моделирование процесса точения цилиндрических опорных поверхностей пустотелых цапф (составлено автором)

По окончании чернового точения цапф режущий инструмент выводится из зоны резания и оборудование для механической обработки сменяется на сварочное. Сварочным оборудованием выполняют наплавку и восстановление изношенных цилиндрических частей цапф до регламентируемого уровня (рисунок 4.14). Для достижения требуемых параметров применяются методы наплавки или газотермического напыления, позволяющие довести геометрические характеристики до значений, установленных в ремонтной и конструкторской документации. Нарастивание слоя металла осуществляется также в процессе кругового вращения барабанной мельницы от двигателей подвижных консолей. В ходе восстановительных работ осуществляется поэтапное устранение повреждений, при этом особое внимание уделяется достижению необходимых физико-механических свойств материала и обеспечению качественного сцепления наносимого слоя с базовой поверхностью. Перед наплавкой металла также имеет место предварительный нагрев поверхности цапф на участках перехода от металла наплавки к основному металлу детали до температур, обеспечивающих снятие остаточных сварочных напряжений в данных сечениях, а после наплавки осуществляют замедленное охлаждение поверхности цапф [37].

Металлообработка резанием после восстановления металлического слоя грузочной и разгрузочной опорных подшипниковых цапф осуществляется путем смены сварочного модульного оборудования. Таким образом, сварочное оборудование сменяется обратно на токарное модульное оборудование для

механической обработки, имеющее режущий инструмент, которым срезают лишний наплавленный слой металла. В ходе чего, последовательно выполняют черновую и чистовую обработку (получистовое, чистовое и тонкое точение) опорных поверхностей цапф для последующего доводочного шлифования [37].

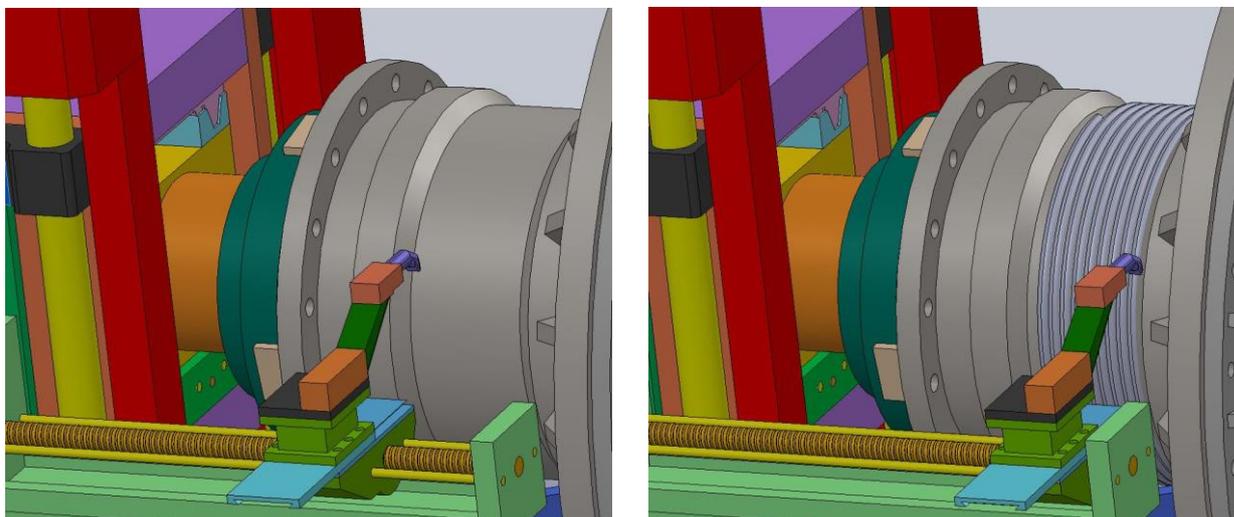


Рисунок 4.14 – Компьютерное моделирование процесса восстановления дефектного слоя металла опорных поверхностей цапф путем наплавки (составлено автором)

Доводочное шлифование выполняется повторной сменой инструментальных модулей с токарного на шлифовальное. Доводочное шлифование выполняется вводом шлифовального модульного оборудования в зону резания на смену токарного модульного оборудования для механической обработки до достижения необходимой степени чистоты посадочных поверхностей загрузочной и разгрузочной опорных подшипниковых цапф, в процессе вращения барабанной мельницы от двигателей временных опор (рисунок 4.15) [37].

При этом последовательно выполняемая наплавка, точение и шлифование наружных опорных поверхностей загрузочной и разгрузочной подшипниковых цапф проводятся одновременно для двух цапф. По завершению доводочного шлифования модульный комплект вспомогательного оборудования возвращают в исходное положение и демонтируют. Подкатывают нижние части опорных подшипников скольжения, опускают на них барабанную мельницу и устанавливают верхние крышки опорных подшипников скольжения, также

устанавливают обратно втулки во внутренние поверхности цапф и соединяют их фланцы с фланцами цапф болтовыми соединениями [37].

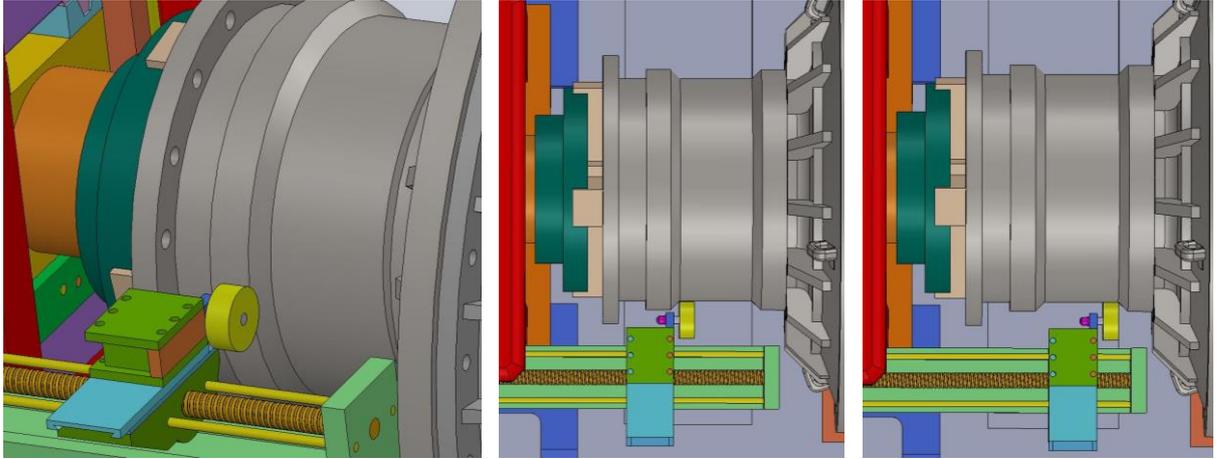


Рисунок 4.15 – Компьютерное моделирование процесса шлифования цилиндрических опорных поверхностей пустотелых цапф (составлено автором)

4.3.4 Расчет коэффициента времени нахождения в ремонте подшипниковых цапф согласно разработанному способу ремонта

При монтаже цапф в сборочную единицу с барабаном мельницы возникают систематические отклонения взаимного расположения их поверхностей, обусловленные погрешностями сборки и деформациями металлоконструкции корпуса. Для компенсации возникающих отклонений требуется повышение качества точности обработки при ремонте, что приводит к росту трудоемкости операций на 18-22 % и снижению уровня ремонтной технологичности на 12-15 %.

Проведенные исследования позволили установить предельные значения допусков формы и расположения поверхностей подшипниковых цапф в сборе с корпусом барабана: допуск полного радиального биения 0,05 мм; допуск профиля продольного сечения 0,03 мм; допуск круглости 0,019 мм. Установленные допуски рекомендованы к внесению в ремонтную документацию в виде технических условий.

Учитывая жесткое базирование барабанных мельниц на фундаментных плитах (допуск плоскостности 0,5/1000x1000 мм) и ограниченную технологическую мобильность в условиях рабочих пространств горно-

обогажительных комбинатов, разработан способ восстановления цапф без демонтажа цапф корпуса (Приложение А). Технология проведения ремонта, согласно патенту, также предусматривает разработку и использование модульных комплектов вспомогательного оборудования (Приложение В).

Результатом предлагаемой ремонтной технологии на основе применения модульных комплектов вспомогательного оборудования является повышение уровня ремонтной технологичности опорных подшипников скольжения барабанной мельницы за счет проведения набора ремонтных мероприятий непосредственно на месте ее эксплуатации без необходимости проведения демонтажа цапф барабана мельницы [32].

Данные теоретических расчетов, полученных при моделировании восстановления цапф мельницы МШЦ 2700×3600 с учетом апробации ремонтной технологии на крупногабаритных деталях вращения диаметром 2620 мм с опорными цапфами диаметром 650 мм, показали сокращение времени ремонта с 126 до 97 часов за счет оптимизации операций. Расчет ремонтной технологичности (K_T) производился по формуле (4.1):

$$K_T = \frac{T_{\Phi}}{T_B} = \frac{T_{ПЗ} + T_P + T_{ПО}}{T_{ПЗ} + T_P + T_{МН} + T_{ДМ} + T_{ТРС}}, \quad (4.1)$$

где T_{Φ} – время ремонта по предложенной технологии, ч;

T_B – время ремонта по базовой технологии, ч;

$T_{ПЗ}$ – подготовительно-заключительное время (выверка и установка), ч;

T_P – время проведения восстановительных операций поверхностей цапф, ч;

$T_{ДМ}$ – время на разборку цапф, ч; $T_{МН}$ – время на сборку цапф, ч;

$T_{ПО}$ – время подготовки ремонтного/станочного оборудования, ч;

$T_{ТРС}$ – время на транспортирование цапф до ремонтного предприятия и обратно, ч.

Ключевые факторы повышения ремонтной технологичности включают в себя:

- исключение операций по демонтажу цапф, что позволяет сократить время на разборку/сборку на 32 часа (25,4 % от общего цикла);

- снижение логистических затрат за счет исключения необходимости транспортировки цапф массой 8-12 т (до 19 % от общего цикла);
- использование модульных комплектов вспомогательного оборудования, что обеспечивает точность обработки цапф в сборе с корпусом до IT7, устраняя необходимость в стационарном оборудовании.

Комбинация применения модульных комплектов вспомогательного оборудования и бездемонтажного способа проведения восстановительных мероприятий обеспечивает обоснованное повышение ремонтной технологичности за счет сокращения времени нахождения подшипниковых узлов барабанной мельницы в ремонте. Ожидаемое сокращение времени нахождения в ремонте при реализации предлагаемого способа по сравнению с базовым вариантом обеспечивает снижение продолжительности ремонтных работ на 23 %.

4.4 Выводы по главе 4

1. В ходе стендовых испытаний 24 выборок подшипниковых узлов установлено, что при номинальных условиях эксплуатации температура находится в диапазоне от 29,5 до 43,9 °С. На основе полученных данных построена контрольная карта Шухарта со следующими ключевыми параметрами: средняя температура 38,9 °С, нижняя предельная граница 25,6 °С, верхняя предельная граница 52,2 °С, что позволяет эффективно контролировать состояние подшипников в режиме реального времени.

2. Разработан алгоритм корректирующего технического обслуживания, включающий мониторинг и поддержание температурного режима подшипниковых узлов в допустимых диапазонах. При отклонении температуры от установленных границ система позволяет своевременно принять меры по корректировке работы системы смазки, предотвратить преждевременный износ деталей и избежать аварийных ситуаций.

3. Предложенная ремонтная технология позволяет осуществлять восстановление опорных цапф без демонтажа корпуса барабанной мельницы, что особенно важно при эксплуатации оборудования в ограниченных

производственных пространствах. Внедрение такой системы обслуживания, основанной на применении карт Шухарта обеспечивает прогнозируемость ремонтных работ и повышение общей эффективности эксплуатации мельниц.

4. Разработан способ ремонта подшипниковых цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации, обеспечивающий повышение уровня ремонтной технологичности подшипниковых узлов до 24%, а также представлен концепт конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования для реализации данного способа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований в диссертации получено новое технико-технологическое решение, направленное на повышение межремонтного ресурса и уровня ремонтной технологичности подшипниковых узлов барабанных мельниц в условиях их эксплуатации.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

1. Обосновано, что величина нагрева и интенсивность роста температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения барабанной мельницы служат индикатором для оценки работоспособности узла при контроле данного параметра в режиме реального времени, позволяя определять текущее техническое состояние подшипника.

2. Установлено, что изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей цапф при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа описываются функциональной зависимостью полинома шестой степени с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$, при этом критичным является допуск полного радиального биения цапфы, превышающий 12 % толщины масляного слоя и сопровождающийся повышением температуры в подшипнике до предельно допустимого значения в 70 °С со снижением межремонтного ресурса на 30 %.

3. Разработан алгоритм мероприятий корректирующего технического обслуживания по поддержанию температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения барабанной мельницы в заданном диапазоне для обеспечения их работоспособности на основе непрерывного контроля величины нагрева и интенсивности роста температуры в режиме реального времени с фиксацией данных в контрольных картах Шухарта, содержащих расчетные предупредительные и предельные границы, реализация которого повышает межремонтный ресурс подшипников и позволяет на основе оценки их технического состояния обоснованно принимать решение о направлении узлов в ремонт до наступления предельного состояния.

4. Разработан способ ремонта подшипниковых цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации (Приложение А), обеспечивающий повышение уровня ремонтной технологичности подшипниковых узлов за счет снижения продолжительности ремонтных работ на 23 % по сравнению с базовым вариантом, а также представлен концепт конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования для реализации данного способа.

5. Результаты работы планируются к внедрению на предприятии ПАО «ЗВЕЗДА» в рамках проведения актуализации программы и методики аттестации стендов для проведения испытаний редукторов повышенной и большой мощности с баббитовыми подшипниками скольжения (Приложение Б).

6. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка комплекта вспомогательного оборудования для восстановления опорных цапф барабанных мельниц без их демонтажа, обеспечивающего проведение ремонтного цикла в условиях рабочих пространственных ограничений на месте эксплуатации оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтынников, Н. А. Машины и процессы дезинтеграции плавучего комплекса горного оборудования при разработке свинцово-цинковых руд Арктики / Н. А. Алтынников, А. С. Корогодин, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXI международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, 06-07 апреля 2023 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. – 2023. – С. 136-140.

2. Бабырь, Н. В. Особенности конструкции и технологии работы выемочного модуля для угольных месторождений Российской Арктики / Н. В. Бабырь, В. В. Габов, А. А. Носов, А. В. Никифоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 6. – С. 5-16. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_6_0_5.

3. Барковский, А. Н. Экономический потенциал Российской Арктики в области природных ресурсов и перевозок по СМП / А. Н. Барковский, С. С. Алабян, О. В. Морозенкова // Российский внешнеэкономический вестник. – 2015. – № 1. – С. 70-83.

4. Белов, С. В. Горно-геологическая и экономическая характеристика месторождений свинцово-цинковых руд в российской Арктике / С. В. Белов, В. А. Скрипниченко, В. А. Ушакова // Арктика и Север. – 2022. – № 48. – С. 5-28. – DOI 10.37482/issn2221-2698.2022.48.5.

5. Беневольский, Б. И. Минерально-сырьевой потенциал - базовый элемент экономического суверенитета и национальной безопасности России / Б. И. Беневольский // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2015. – № 5. – С. 50-59.

6. Бестужева, О. В. Исследование зависимости площади среза от технологических параметров и режимов ротационной обработки крупногабаритной

детали / О. В. Бестужева, М. А. Федоренко, Ю. А. Бондаренко, Т. М. Санина // Технология машиностроения. – 2016. – № 5. – С. 14-19.

7. Бестужева, О. В. Исследование ремонтного восстановления поверхностей вращения различной конфигурации большого диаметра / О. В. Бестужева, Ю. А. Бондаренко, Д. С. Баранов, А. А. Романович // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 12. – С. 116-124. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-116-124.

8. Бестужева, О. В. Экспериментальное исследование восстановления поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования / О. В. Бестужева, М. А. Федоренко, Ю. А. Бондаренко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 11. – С. 122-127. – DOI 10.12737/22353.

9. Бойко, П. Ф. Повышение долговечности и диагностика состояния броней конусных дробилок большой единичной мощности / П. Ф. Бойко, Е. М. Титиевский, В. А. Тимирязев, В. У. Мнацаканян // Горный журнал. – 2019. – № 4. – С. 65-69. – DOI 10.17580/gzh.2019.04.14.

10. Бондаренко, Ю. А. Прогнозирование остаточного ресурса шаровых трубных мельниц / Ю. А. Бондаренко, О. В. Бестужева, Д. С. Баранов, А. А. Романович // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 11. – С. 132-141. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-11-132-141.

11. Бочков, В. С. Современные и перспективные технологические методы по увеличению срока эксплуатации футеровок шаровых мельниц / В. С. Бочков // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2018. – № 1. – С. 398-401.

12. Бочкова, К. В. Исследование первичной рудоподготовки на труднодоступных месторождениях / К. В. Бочкова, В. С. Бочков // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 6(158). – С. 26-31. – DOI 10.26730/1816-4528-2021-6-26-31.

13. Бочкова, К. В. Повышение эффективности дробильного оборудования / К. В. Бочкова, В. Я. Потапов, А. П. Комиссаров, В. С. Бочков, В. В. Потапов // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 6(176). – С. 15-25. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25.

14. Великанов, В. С. Исследование напряженно-деформированного состояния рабочего органа карьерного экскаватора при динамических нагрузках от грансостава пород / В. С. Великанов, И. А. Гришин, О. А. Лукашук, Е. Ю. Дегодя, Н. С. Тельминов // Уголь. – 2024. – № 12(1188). – С. 103-107. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-12-103-107.

15. Великанов, В. С. Оценка технического состояния футеровочной брони конусных дробилок на основе цифровой диагностики их поверхностей / В. С. Великанов, В. С. Бочков, Н. В. Дерина, К. В. Бочкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 11-2. – С. 159-168. – DOI 10.25018/0236_1493_2022_112_0_159.

16. Великанов, В. С. Перспективные технические решения в повышении эффективности выпуска минерального сырья из бункерных емкостей / В. С. Великанов, И. А. Гришин, О. А. Лукашук, В. В. Давыдова, А. Д. Лукашук // Горная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 102-107. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-102-107.

17. Гетьман, Ю. А. Анализ контактного взаимодействия печи с роликовыми опорами в процессе эксплуатации в системе конечно-элементного анализа ANSYS / Ю. А. Гетьман, А. А. Погонин, Ю. А. Бондаренко // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2021. – № 11. – С. 25-30. – DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-11-25-30.

18. Гончаров, А. Б. Стратегия технического обслуживания и ремонта горного оборудования с целью обеспечения его надежности / А. Б. Гончаров, А. Б. Тулинов, Б. А. Перепечай // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 11. – С. 70-79.

19. Гришин, И. А. Непрерывный контроль как инструмент управления процессом обогащения магнетитов / И. А. Гришин, А. В. Масалимов, О. С. Андреева // Вестник Магнитогорского государственного технического

университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 4-11. – DOI 10.18503/1995-2732-2020-18-4-4-11.

20. Гришин, И. А. О возможности использования метода локальной аппроксимации для прогноза нерегулярных временных рядов отказов горнотранспортных машин / И. А. Гришин, В. С. Великанов, О. В. Назаров, Н. В. Дерина // Уголь. – 2022. – № 3(1152). – С. 84-89. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-3-84-89.

21. Гусев, Е. Л. Оптимальное управление уменьшением интенсивности теплового поля на основе выбора структуры неоднородных конструкций в вариационной постановке / Е. Л. Гусев, В. Н. Бакулин // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 480, № 3. – С. 287-292. – DOI 10.7868/S0869565218150069.

22. Евдокимов, А. Н. Полезные ископаемые арктических островов России / А. Н. Евдокимов, А. Н. Смирнов, В. И. Фокин // Записки Горного института. – 2015. – Т. 216. – С. 5-12.

23. Ибраева, Н. Р. К вопросу диагностики технического состояния привода конусной дробилки на основе нейронных сетей / Н. Р. Ибраева, Ю. А. Лагунова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 162-170. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_111_0_162.

24. Исмагилов, Р. И. Проектирование современных российских дробильно-перегрузочных установок для комплексов циклично-поточной технологии / Р. И. Исмагилов, А. Г. Журавлев, В. О. Фурин // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 48-55. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-3-48-55.

25. **Корогодин, А. С.** Геотехнология и горно-обогащительный плавучий комплекс для освоения месторождения «Павловское» / **А. С. Корогодин**, С. Л. Иванов, В. И. Князькина, А. Р. Газизуллина // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 124-135. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-124-135.

26. **Корогодин, А. С.** К вопросу эффективности функционирования горного оборудования плавучего комплекса в условиях Арктики / **А. С. Корогодин**, А. Р. Газизуллина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования:

тезисы докладов 80-й международной научно-технической конференции, 18-22 апреля 2022 г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2022. – Том 1. – С. 77.

27. **Корогодин, А. С.** Оценка технического состояния опорных подшипников скольжения барабанной мельницы при эксплуатации в составе арктического комплекса горного оборудования / **А. С. Корогодин**, С. Л. Иванов // Горная промышленность. – 2024. – № 6 – С. 144-151. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

28. **Корогодин, А. С.** Плавающий комплекс горного оборудования для разработки месторождений арктической зоны / **А. С. Корогодин**, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, 07-08 апреля 2022 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. – 2022. – С. 122-125.

29. **Корогодин, А. С.** Прогнозирование остаточного ресурса опорных подшипниковых узлов барабанной мельницы для оценки долговечности работы на основе изменения поля температур / **А. С. Корогодин**, С. Л. Иванов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 17-1. – С. 186-195. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-186-195.

30. **Корогодин, А. С.** Прогнозирования остаточного ресурса подшипниковых опор барабанной мельницы плавучего комплекса горного оборудования / **А. С. Корогодин**, Н. А. Алтынников, С. Л. Иванов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXI международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, 06-07 апреля 2023 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. – 2023. – С. 289-292.

31. **Корогодин, А. С.** Рационализация процесса оценки технического состояния опорных подшипников барабанной мельницы в составе плавучего комплекса горного оборудования / **А. С. Корогодин, С. Л. Иванов** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции 21-25 апреля 2025 г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2025. – Том 1. – С. 49.

32. **Корогодин, А. С.** Совершенствование технического обслуживания и ремонта при эксплуатации барабанной мельницы в условиях ограниченных пространств и отсутствия ремонтных баз / **А. С. Корогодин, С. Л. Иванов** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXIII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, 03-04 апреля 2025 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. – 2025. – С. 418-422.

33. **Корогодин, А. С.** Теротехнология динамического горного оборудования дезинтеграции при освоении месторождений в природно-климатических условиях Арктики / **А. С. Корогодин, С. Л. Иванов, В. И. Князькина** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2021. – № 13. – С. 42-47. – DOI 10.26160/2658-3305-2021-13-42-47.

34. **Корогодин, А. С.** Техническое обслуживание и ремонт горного оборудования плавучего комплекса с учетом специфики его эксплуатации в арктических условиях / **А. С. Корогодин, С. Л. Иванов** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, 04-05 апреля 2024 г. / Под общ. ред. Лагуновой Ю.А. / Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. – 2024. – С. 367-370.

35. **Корогодин, А. С.** Техническое обслуживание и ремонт горного оборудования плавучего комплекса с учетом специфики его эксплуатации в арктических условиях / **А. С. Корогодин** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции, 22-26 апреля 2024 г. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2024. – Том 1. – С. 73.

36. **Корогодин, А. С.** Техническое обслуживание и ремонт горного оборудования плавучего комплекса в условиях Арктики / **А. С. Корогодин, С. Л. Иванов** // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, 30 ноября – 01 декабря 2022 г. Кемерово: Изд-во Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – 2022. – С. 644-648.

37. **Корогодин, А. С.** Техническое обслуживание и ремонт цапф барабанной мельницы плавучего комплекса горного оборудования / **С. Л. Иванов, А. С. Корогодин** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 760-770. – DOI 10.21177/1998-4502-2023-15-3-760-770.

38. **Корогодин, А. С.** Технология ремонта цапф барабанной мельницы на примере плавучего комплекса горного оборудования / **А. С. Корогодин** // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, 21-27 мая 2023 г. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургский горный университет. – 2023. – Том 2. – С. 85-88.

39. Кузнецов, П. В. Построение модели отказа системы с потерей живучести для целей управления безопасностью технологического процесса измельчения / **П. В. Кузнецов, В. Н. Богатилов, А. Э. Кириченко** // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 3(3). – С. 137-140.

40. Лагунова, Ю. А. Исследование влияния повышения шаровой загрузки на металлоконструкции мельницы / **Ю. А. Лагунова, В. С. Шестаков, Н. В. Савинова,**

А. Р. Мукатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 171-178. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_111_0_171.

41. Лагунова, Ю. А. Предложения по повышению эффективности эксплуатации конусных дробилок на щебеночных карьерах / Ю. А. Лагунова, А. Е. Калянов, А. А. Жилинков, С. Л. Разбитнов, Г. Д. Буялич // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 6 (176). – С. 54-64. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-6-54-64.

42. Лагунова, Ю. А. Статистический анализ напряженно-деформированного состояния подшипника щековой дробилки / Ю. А. Лагунова, С. А. Майоров, Г. А. Боярских // Известия УГГУ. – 2020. – № 2(58). – С. 159-171. – DOI 10.21440/2307-2091-2020-2-159-171.

43. Леванов, И. Г. Методика расчета ресурса подшипников скольжения на ранних этапах проектирования поршневых и роторных машин / И. Г. Леванов, Е. А. Задорожная, Д. Н. Никитин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 5-21. – DOI 10.14529/engin210301.

44. Леванов, И. Г. Моделирование гидродинамических подшипников скольжения с учетом индивидуальных противоизносных свойств смазочных материалов / И. Г. Леванов, Е. А. Задорожная, И. В. Мухортов, Д. Н. Никитин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 14-28. – DOI 10.14529/engin210102.

45. Липатов, А. Г. Актуальные вопросы регламентации технического обслуживания и ремонта при внедрении высокопроизводительных дробилок производства ПАО «Уралмашзавод» / А. Г. Липатов, Я. Б. Турьянский, В. О. Фурин, А. Г. Журавлев, В. А. Черепанов // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 73-82. – DOI 10.30686/1609-9192-2020-3-73-82.

46. Майоров, С. А. Анализ напряженно-деформированного состояния подшипника / С. А. Майоров, Ю. А. Лагунова // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 3. – С. 107-117. – DOI 10.21440/0536 1028-2020-3-107-117.

47. Никитин, Д. Н. Расчетно-экспериментальная методика определения предотказного состояния сложнагруженных подшипников скольжения / Д. Н.

Никитин, Е. А. Задорожная, И. Г. Леванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 5-23. – DOI 10.14529/engin220101.

48. Патент № 2788040 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00 (2006.01); СПК В23Р 6/00 (2022.08). Способ ремонтно-восстановительных работ цапф мельниц. Заявка № 2022125231: заявл. 27.09.2022: опубл. 16.01.2023 / С. Л. Иванов, **А. С. Корогодин**, В. И. Князькина; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 13 с.

49. Ракипов, А. С. Инжиниринговые решения для развития труднодоступных регионов России / А. С. Ракипов // Горная промышленность. – 2024. – № 3. – С. 22-24. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-3-22-24.

50. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017612831 Российская Федерация. Программа оценки ресурса подшипников скольжения тепловых двигателей с учетом неустановившихся режимов работы. Заявка № 2016661917: заявл. 08.11.2016: опубл. 03.03.2017 / Е. А. Задорожная, И. Г. Леванов, А. Л. Дудников, В. И. Еркин; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». – 1 с.

51. Федоренко, М. А. Смещение оси крупногабаритного вала в процессе его ремонта при использовании подшипников скольжения / М. А. Федоренко, Ю. А. Бондаренко, А. А. Погонин // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 8. – С. 164-167. – DOI 10.12737/article_5968b452949f45.55248715.

52. Федоренко, М. А. Технологические методы компенсации отклонений корпуса цементной печи на опорных элементах / М. А. Федоренко, Ю. А. Бондаренко, А. А. Погонин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 1. – С. 89-93. – DOI 10.12737/article_5a5dbf097daa83.55055808.

53. Федоренко, М. А. Исследование обеспечения необходимой шероховатости поверхности крупногабаритных вращающихся деталей

приставными станочными модулями / М. А. Федоренко, Ю. А. Бондаренко, Т. М. Федоренко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2008. – № 2. – С. 35-38.

54. Федоренко, М. А. Восстановление цилиндрической формы при различных видах износа крупногабаритных вращающихся деталей / М. А. Федоренко, А. А. Погонин, Ю. А. Бондаренко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 9. – С. 130-136. – DOI 10.12737/article_59a93b0ac85999.41172542.

55. Фурин, В. О. Интеллектуальные конусные дробилки ПАО «Уралмашзавод» / В. О. Фурин, К. А. Федулов, Б. В. Турьянский // Горная промышленность. – 2016. – № 6(130). – С. 15.

56. Addepalli, P. Automation of knowledge extraction for degradation analysis / P. Addepalli, T. Weyde, B. Namooano, O. A. Oyedeji, T. Wang, J. A. Erkoynucu, R. Roy // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 72, No. 1. – P. 33-36. – DOI 10.1016/j.cirp.2023.03.013.

57. Adhikari, N. Identification of Semi-Autogenous Grinding Mill Operating States Using Clustering / N. Adhikari, G. Forbes, M. Hilden, M. Yahyaei // SAG Conference. – 2023. – P. 1-15.

58. Ahmadzadeh, F. Application of multi regressive linear model and neural network for wear prediction of grinding mill liners / F. Ahmadzadeh // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 4, No. 5. – P. 55-58. – DOI 10.14569/IJACSA.2013.040509.

59. Ahmadzadeh, F. Change point detection with multivariate control charts by artificial neural network International / F. Ahmadzadeh // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – No. 97(9). – P. 1-12. – DOI 10.1007/s00170-009-2193-6.

60. Ahmadzadeh, F. Remaining useful life prediction of grinding mill liners using an artificial neural network / F. Ahmadzadeh, J. Lundberg // Minerals Engineering. – 2013. – No. 53. – P. 1-8. – DOI 10.1016/j.mineng.2013.05.026.

61. Aleksandrova, T. N. Gold–sulphide deposits of the Russian Arctic zone: Mineralogical features and prospects of ore beneficiation / T. N. Aleksandrova, I. V. Talovina, A. M. Duryagina // *Chemie der Erde - Geochemistry*. – 2019. – No. 6/II. – DOI 10.1016/j.chemer.2019.04.006.

62. Barabady, J. Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran / J. Barabady, U. Kumar // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2008. – No. 93(4). – P. 647-653. – DOI 10.1016/j.ress.2007.10.006.

63. Bardyshev, O. Study on the aspects of organizing the repair of construction machinery in the Arctic / O. Bardyshev, S. Repin, A. Zazykin, S. Evtyukov, J. Rajczyk, I. Ruchkina, A. Maksimova, M. Korotkevich // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, 02-04 June 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 49-55. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.024.

64. Blyankinshtein, I. Improving availability of the mechanisms under harsh conditions of Arctic based on the monitoring their energy load / I. Blyankinshtein, I. Kolesnikov, S. Malchikov // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, 02-04 June 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 70-76. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.027.

65. Bochnerova, A. Placer mineral deposits of Russian Arctic zone: Genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources / A. Bochnerova, A. Lalomov, W. Lebarge // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – Vol. 138. – P. 104349. – DOI 10.1016/j.oregeorev.2021.104349.

66. Bondarenko, J. A. Investigation of stresses and deformations of ball mill support axles taking into account the temperature field by numerical method / J. A. Bondarenko, T. A. Duyun, O. V. Bestuzheva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: BUILDINTECH BIT 2020. INNOVATIONS AND TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION*, Belgorod, 08-09 October 2020. Vol. 945. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012018. – DOI 10.1088/1757-899X/945/1/012018.

67. Chen, Y. Optimal maintenance strategy for multi-state systems with single maintenance capacity and arbitrarily distributed maintenance time / Y. Chen, Yu. Liu, T.

Jiang // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 211. – P. 107576. – DOI 10.1016/j.ress.2021.107576.

68. Condori, P. V. Improvements in the Operation and Control of SAG mills in PT Amman Mineral's Batu Hijau Operation Using Mill Load Soft Sensor / P. V. Condori, M. Hilden, M. Yahyaei // SAG Conference. – 2023. – P. 1-17.

69. Cunha, P.F.F. Development of a Productive Service Module Based on a Life Cycle Perspective of Maintenance Issues / P.F.F. Cunha, J.A.C. Duarte, L. Altung // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2004. – Vol. 53. – P. 13-16. – DOI 10.1016/S0007-8506(07)60634-9.

70. Curry, J. A. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding / J. A. Curry, M. J. L. Ismay, G. J. Jameson // In Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 56. – P. 70-80. – DOI 10.1016/j.mineng.2013.10.020.

71. Dalzochio, J. Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges / J. Dalzochio, R. Kunst, E. Pignaton, A. Binotto, S. Sanyal, J. Favilla, J. Barbosa // In Computers in Industry. – 2020. – Vol. 123. – DOI 10.1016/j.compind.2020.103298.

72. Datta, P. P. Cost Modelling Techniques for Availability Type Service Support Contracts: A Literature Review and Empirical Study / P. P. Datta, R. Roy // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2010. – Vol. 3. – P. 142-157.

73. De Pater, I. Predictive maintenance for multi-component systems of repairables with Remaining-Useful-Life prognostics and a limited stock of spare components / I. De Pater, M. Mitici // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 214. – P. 107761. – DOI 10.1016/j.ress.2021.107761.

74. Evtyukov, S. Solutions to the main transportation problems in the Arctic zone of the Russian Federation / S. Evtyukov, A. Marusin, A. Novikov, A. Shevtsova // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, 02-04 June 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 154-162. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.037.

75. Fedorenko, M. A. Impact of oscillations of shafts on machining accuracy using non-stationary machines / M. A. Fedorenko, J. A. Bondarenko, A. A. Pogonin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment,

Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk, 04-06 December 2017. Vol. 327, 4. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042030. – DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042030.

76. Finogeev, A. Methods and tools for secure sensor data transmission and data mining in energy SCADA system / A. Finogeev, L. Fionova, I. Nefedova, E. Finogeev, An. Finogeev, T.Q. Vinh, V. Kamaev // *Communications in Computer and Information Science*. – 2015. – Vol. 535. – P. 474-487. – DOI 10.1007/978-3-319-23766-4_38.

77. Galarza-Urigoitia, N. Predictive maintenance of wind turbine low-speed shafts based on an autonomous ultrasonic system / N. Galarza-Urigoitia, B. R. García, J. G. Álvarez, J. O. Biurrun, A. L. Germán, J. R. Botía, G. Aznar // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – Vol. 103. – P. 481-504. – DOI 10.1016/j.engfailanal.2019.04.048.

78. Ghaleb, M. Real-time integrated production-scheduling and maintenance-planning in a flexible job shop with machine deterioration and condition-based maintenance / M. Ghaleb, Sh. Taghipour, H. Zolfagharinia // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 61. – P. 423-449. – DOI 10.1016/j.jmsy.2021.09.018.

79. Gölbaşı, O. A cost-effective simulation algorithm for inspection interval optimization: An application to mining equipment / O. Gölbaşı, N. Demirel // *Computers and Industrial Engineering*. – 2017. – Vol. 113. – P. 525-540. – DOI 10.1016/j.cie.2017.09.002.

80. Grishin, I. A. Implementing a Dis charge Slot Width Control System in Cone Crushers / I. A. Grishin, V. S. Bochkov, V. S. Velikanov, N. V. Dyorina, M. M. Surovtsov, Yu. A. Moreva // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. – 2022. – Vol. 20, No. 2. – P. 13-22. – DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22.

81. Groves, W. A. Analysis of fatalities and injuries involving mining equipment / W. A. Groves, V. J. Kecojevic, D. Komljenovic // *Journal of Safety Research*. – 2007. – Vol. 38(4). – P. 461-470. – DOI 10.1016/j.jsr.2007.03.011.

82. Grushetsky, S. Ensuring high-quality performance of the required scope of works by road-building machines in the Arctic zone / S. Grushetsky, S. Evtyukov, I. Vorontsov, S. Maksimov, J. Rajczyk // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg,

02-04 June 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 256-264. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.049.

83. Gusev, E. L. The development and application of generalized models long-term forecasting of the residual resource composite materials and structures at the impact of extreme climate factors of the Arctic zone / E. L. Gusev, M. A. Ivanova, V. D. Chernykh // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 20. – P. 294-299. – DOI 10.1016/j.prostr.2019.12.154.

84. Hao, S. Condition-based maintenance with imperfect inspections for continuous degradation processes / S. Hao, J. Yang, C. Berenguer // *Applied Mathematical Modelling*. – 2020. – Vol. 86. – P. 1-24. – DOI 10.1016/j.apm.2020.05.013.

85. Hao, S. Joint optimization of condition-based operation and maintenance strategy for load-sharing systems subject to hybrid continuous and discrete loads / S. Hao, W. Chen, J. Wang // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2025. – Vol. 262(2). – P. 111166. – DOI 10.1016/j.ress.2025.111166.

86. Hilden, M. Detection of ball mill overloading using dynamic time warping / M. Hilden, F. Reyes, Z. Ye, V. Jokovic // *IMPC Assia Pacific Conference*. – 2022. – P. 1236-1250.

87. Hilden, M. M. An improved method for grinding mill filling measurement and the estimation of load volume and mass / M. M. Hilden, M. S. Powell, M. Yahyaei // *Minerals Engineering*. – 2021. – Vol. 160. – P. 106638. – DOI 10.1016/j.mineng.2020.106638.

88. Huynh, K. T. An adaptive predictive maintenance model for repairable deteriorating systems using inverse Gaussian degradation process / K. T. Huynh // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2021. – Vol. 213. – P. 107695. – DOI 10.1016/j.ress.2021.107695.

89. Ivanov, S. L. Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation / S. L. Ivanov, P. V. Shishkin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering - Mining Machines, Saint-Petersburg, 23-24 March 2017*. Vol.

87, 2. – Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2017. – P. 022009. – DOI 10.1088/1755-1315/87/2/022009.

90. 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 // Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019», Krasnoyarsk, 25-27 September 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. Vol. 1399. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 44070. – DOI 10.1088/1742-6596/1399/4/044070.

91. Jiang, S. Discrete element simulation of particle motion in ball mills based on similarity / S. Jiang, Y. Ye, Y. Tan, S. Liu, J. Liu, H. Zhang, D. Yang // Powder Technology. – 2018. – Vol. 335. – P. 91-102. – DOI 10.1016/j.powtec.2018.05.012.

92. Kang, K. Integrated Disassembly and Assembly Model for Heavy Duty Equipment Maintenance / K. Kang, R. Y. Zhong, A. Nassehi // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 93. – P. 995-1000. – DOI 10.1016/j.procir.2020.04.086.

93. Kim, Y. H. Application of partially diabatic divided wall column to floating liquefied natural gas plant / Y. H. Kim // Energy. – 2014. – Vol. 70. – P. 435-443. – DOI 10.1016/j.energy.2014.04.020.

94. Kizim, A. V. A Conceptual Agent-Based Model to Supporting the Production Equipment Technical Service and Repair Organization / A. V. Kizim, M. V. Denisov, S. V. Davydova, V. A. Kamaev // Procedia Technology. – 2014. – Vol. 16. – P. 1176-1182.

95. Kurta, I. Preconditions for Technological Development of the Construction Industry of the North for the Arrangement of the Mineral Complex of the Russian Arctic / I. Kurta, V. Zemlyansky // Procedia Engineering: Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development, St.Petersburg, 12-15 September 2016. Vol. 165. – Amsterdam: Elsevier Ltd, 2016. – P. 1542-1546. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.11.891.

96. Laggoune, R. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units / R. Laggoune, A. Chateauneuf,

D. Aissani // *Computers and Chemical Engineering*. – 2009. – Vol. 33(9). – P. 1499-1510. – DOI 10.1016/j.compchemeng.2009.03.003.

97. Lepov, V. V. A system approach to research development and creation of the complex engineering systems for arctic and subarctic / V. V. Lepov, K. D. Pantelev, E. G. Rahmilevich, E. S. Yrcev // *Procedia Structural Integrity*: 9, Yakutsk, 14-17 September 2020. – Yakutsk, 2020. – P. 82-86. – DOI 10.1016/j.prostr.2020.12.014.

98. Li, H. Geology and Geochemistry of the giant Huoshaoyun zinc-lead deposit, Karakorum Range, northwestern Tibet / H. Li, G. Borg, L.-H. Dong, G. Zhou, H. Tao, W. Chu, H. Li, X.-W. Xu, H. A. Gilg, T.-B. Fan, R.-L. Liu, Q. Ke, G. Zhang // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 106. – P. 251-272. – DOI 10.1016/j.oregeorev.2019.02.002.

99. Litvinenko, V. S. Elaboration of a conceptual solution for the development of the Arctic shelf from seasonally flooded coastal areas / V. S. Litvinenko, M. V. Dvoynikov, V. L. Trushko // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2021. – DOI 10.1016/j.ijmst.2021.09.010.

100. Liu, B. A value-based preventive maintenance policy for multi-component system with continuously degrading components / B. Liu, Z. Xu, M. Xie, W. Kuo // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2014. – Vol. 132. – P. 83-89. – DOI 10.1016/j.ress.2014.06.012.

101. Ma, Y. Performance analysis of PRHRS in primary and secondary circuit for offshore floating nuclear plant / Y. Ma, J. Zhang, M. Wang, X. W. Tian, R. Chen, Y. Wu, G. Su, S. Z. Qiu // *Annals of Nuclear Energy*. – 2021. – Vol. 164. – P. 108580. – DOI 10.1016/j.anucene.2021.108580.

102. Mendagaliyev, R. Microstructure and mechanical properties of laser metal deposited cold-resistant steel for arctic application / R. Mendagaliyev, O. G. Klimova-Korsmik, O. G. Zotov, A. D. Eremeev, G. A. Turichin // *Procedia Manufacturing*: 17, Trondheim, 27-29 August 2019. – Trondheim, 2019. – P. 249-255. – DOI 10.1016/j.promfg.2019.08.032.

103. Moraes, C. A. Floating photovoltaic plants as an electricity supply option in the Tocantins-Araguaia basin / C. A. Moraes, G. F. Valadão, N. S. Renato, D. F. Botelho,

A. C. L. de Oliveira, C. C. Aleman, F. F. Cunha // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 193. – P. 264-277. – DOI 10.1016/j.renene.2022.04.142.

104. Naseri, M. Availability assessment of oil and gas processing plants operating under dynamic Arctic weather conditions / M. Naseri, P. Baraldi, M. Compare, E. Zio // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2016. – Vol. 152. – P. 66-82. – DOI 10.1016/j.ress.2016.03.004.

105. Ndimande, C. B. Evaluating throughput benefits and Safety Aspects of Mill Liner Design for Performance / C. B. Ndimande, M. Hilden, M. Yahyaei // *SAG Conference*. – 2023.

106. Neves, M. D. M. Analysis of the criticality of flaws found in trunnion of grinding ball mills used in mining plants / M. D. M. Neves, A. H. P. Andrade, D. N. Silva // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 61. – P. 28-36. – DOI 10.1016/j.engfailanal.2015.07.037.

107. Novoselov, A. Selection of priority investment projects for the development of the Russian Arctic / A. Novoselov, I. Potravny, I. Novoselova, V. Gassiy // *Polar Science*. – 2017. – Vol. 14. – P. 68-77. – DOI 10.1016/j.polar.2017.10.003.

108. Ossai, C. I. Remaining useful life estimation for repairable multi-state components subjected to multiple maintenance actions / C. I. Ossai // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2019. – Vol. 182. – P. 142-151. – DOI 10.1016/j.ress.2018.10.014.

109. Panteleev, V. V. Using of multi-agent system to model a process of maintenance service and repair of equipment of a service company / V. V. Panteleev, V. A. Kamaev, A. V. Kizim, A. V. Matokhina // *10th IEEE international conference on application of information and communication technologies - aict2016*, Baku, Azerbaijan, 12-14 October 2016. – Baku, Azerbaijan: Qafqaz University, 2016. – P. 7991718.

110. Repin, S. Improving the movement smoothness of a mobile repair shop for machinery servicing in the Arctic / S. Repin, R. Bukirov, I. Vorontsov, V. Gordienko, P. Rajczyk // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, 02-04 June 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 553-561. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.084.

111. Roy, R. Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges / R. Roy, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, M. Mori // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 65, No. 2. – P. 667-688. – DOI 10.1016/j.cirp.2016.06.006.

112. Safronchuk, K. A. Mobile lubrication and filling units to reduce mining machines and equipment downtime when providing maintenance / K. A. Safronchuk, V. I. Knyazkina, S. L. Ivanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Novosibirsk, 12-14 December 2018. Vol. 560. – Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012088. – DOI 10.1088/1757-899X/560/1/012088.

113. Semykina, A. Main directions of improving the maintenance and repair of vehicle units in the Far North / A. Semykina, N. Zagorodnii, I. Novikov, A. Novikov // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, 02-04 June 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 611-616. – DOI 10.1016/j.trpro.2021.09.090.

114. Semykina, A. Study of the effectiveness of the organization of the system of maintenance and repair of quarry transport of mining and processing plants / A. Semykina, N. Zagorodnii, A. Novikov // *Transportation Research Procedia*. – 2022. – Vol. 63. – P. 983-989. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.097.

115. Shi, Ya. Center-based Transfer Feature Learning With Classifier Adaptation for surface defect recognition / Ya. Shi, L. Li, Ju. Yang, Y. Wang, S. Hao // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2023. – Vol. 188. – P. 110001. – DOI 10.1016/j.ymssp.2022.110001.

116. Shulga, R. N. The Arctic: Ecology and hydrogen energy / R. N. Shulga, A. Y. Petrov, I. V. Putilova // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45, No. 11. – P. 7185-7198. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2019.12.122.

117. Sirikham, A. Estimation of Damage Thickness in Fiber-Reinforced Composites using Pulsed Thermography / A. Sirikham, Y. Zhao, H. Y. Nezhad, W. Du, R. Roy // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15, No. 1. – P. 445-453. – DOI 10.1109/TII.2018.2878758.

118. Standring, W. J. F. Floating nuclear power plants: Potential implications for radioactive pollution of the northern marine environment / W. J. F. Standring, M.

Dowdall, I. Amundsen, P. Strand // *Marine Pollution Bulletin*. – 2009. – Vol. 58, No. 2. – P. 174-178. – DOI 10.1016/j.marpolbul.2008.11.025.

119. Taşgın, Ya. Crack failure in hydrodynamically lubricated bearings: A case study hydraulic turbine / Ya. Taşgın, G. Kahraman // *Engineering Failure Analysis*. – 2021. – Vol. 121. – P. 105123. – DOI 10.1016/j.engfailanal.2020.105123.

120. Wakiru, J. Maintenance Optimization: Application of Remanufacturing and Repair Strategies / J. Wakiru, L. Pintelon, P. N. Muchiri, P. Chemweno // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 69. – P. 899–904. – DOI 10.1016/j.procir.2017.11.008.

121. Xu, L. Reliability Measurement for Multistate Manufacturing Systems with Failure Interaction / L. Xu, Y. Chen, F. Briand, F. Zhou, G. Moroni // *Procedia CIRP*. – 2017. – No. 63. – P. 242-247. – DOI 10.1016/j.procir.2017.03.124.

122. Zhang, B. Remaining Useful Life Based Maintenance Policy for Deteriorating Systems Subject to Continuous Degradation and Shock / B. Zhang, L. Xu, A. Li, Y. Chen // *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems: 51, Smart Manufacturing, Stockholm, 16-18 May 2018*. – Stockholm, 2018. – P. 1311-1315. – DOI 10.1016/j.procir.2018.03.207.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2788040

СПОСОБ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ ЦАПФ МЕЛЬНИЦ

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

Авторы: *Иванов Сергей Леонидович (RU), Корогодин Артур Сергеевич (RU), Князькина Валерия Ивановна (RU)*

Заявка № 2022125231

Приоритет изобретения 27 сентября 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 16 января 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 27 сентября 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов исследования



Публичное акционерное общество «ЗВЕЗДА»
(ПАО «ЗВЕЗДА»)

ул. Бабушкина, д. 123, Санкт-Петербург, 192012
тел.: (812) 3620774, факс: (812) 3673776
e-mail: office@zvezda.spb.ru, www.zvezda.spb.ru
ОКПО 05756754, ОГРН 1037825005085
ИНН 7811038760, КПП 781101001



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ПАО «ЗВЕЗДА»

П.П. Скворцов

«28» 01 2025 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации
Корогодина Артура Сергеевича
по научной специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Специальная комиссия в составе: председатель – Салихов Д.Д.; члены комиссии – Соляник А.Р., Джунковский А.А., Полевой Е.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение межремонтного ресурса и ремонтной технологичности подшипниковых узлов барабанной мельницы без демонтажа цапф на месте эксплуатации», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности машиностроительного предприятия ПАО «ЗВЕЗДА» при проведении испытаний редукторных передач повышенной и большой мощности.

Материалы и результаты диссертационной работы приняты во внимание и планируются к использованию в рамках проведения актуализации программы и методики аттестации стендов испытательных СИК Л9955-974 ПМА №3, 4 и 5.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить уровень качества при проведении испытаний редукторных передач;
- повысить работоспособность опорных подшипников скольжения;
- основываясь на диагностическом показателе интенсивности изменения температуры в опорном баббитовом подшипнике скольжения при номинальной нагрузке и скорости вращения, относительно базовой величины, определять их техническое состояние в режиме реального времени.

Председатель комиссии:

Главный технолог
(должность)


(подпись)

Салихов Д.Д.
(ФИО)

Члены комиссии:

Зам. главного технолога
(должность)


(подпись)

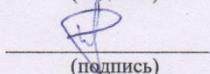
Соляник А.Р.
(ФИО)

Зам. технического директора
(должность)


(подпись)

Джунковский А.А.
(ФИО)

Инженер АСУ ТП
(должность)


(подпись)

Полевой Е.А.
(ФИО)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Концепт конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования

1 Принцип формирования конструкции модульного комплекта вспомогательного оборудования для реализации запатентованного способа ремонтно-восстановительных работ цапф барабанной мельницы

Модульный комплект вспомогательного оборудования для проведения разработанного и защищенного патентом РФ № 2788040 способа ремонта подшипниковых цапф барабанной мельницы без их демонтажа на месте эксплуатации может быть реализован как путем его совмещения с фундаментной площадкой, в составе которой установлена барабанная мельница при ее эксплуатации, так и в виде полностью мобильной конструкции путем пристраивания комплекта вспомогательного оборудования к эксплуатируемой мельнице при проведении ремонтных работ

В случае модульных комплектов вспомогательного оборудования при совмещении с рабочей фундаментной площадкой барабанной мельницы (рисунок В.1) конструкция представляет собой специализированное оборудование для горнодобывающей промышленности, предназначенное для проведения восстановительного ремонта барабанных мельниц.

Конструктивное исполнение комплекта вспомогательного оборудования характеризуется универсальностью и модульностью его компоновки, что позволяет производить обработку цапф различных типоразмеров и массы с восстановлением их первоначальных характеристик. Применение разработанного способа и модульного комплекта вспомогательного оборудования обеспечивает возможность проведения оперативного ремонта полых опорных цапф непосредственно на месте эксплуатации оборудования, исключая необходимость выполнения трудоемких подготовительных работ по демонтажу торцевых крышек с пустотелыми подшипниковыми цапфами и корпуса мельницы.

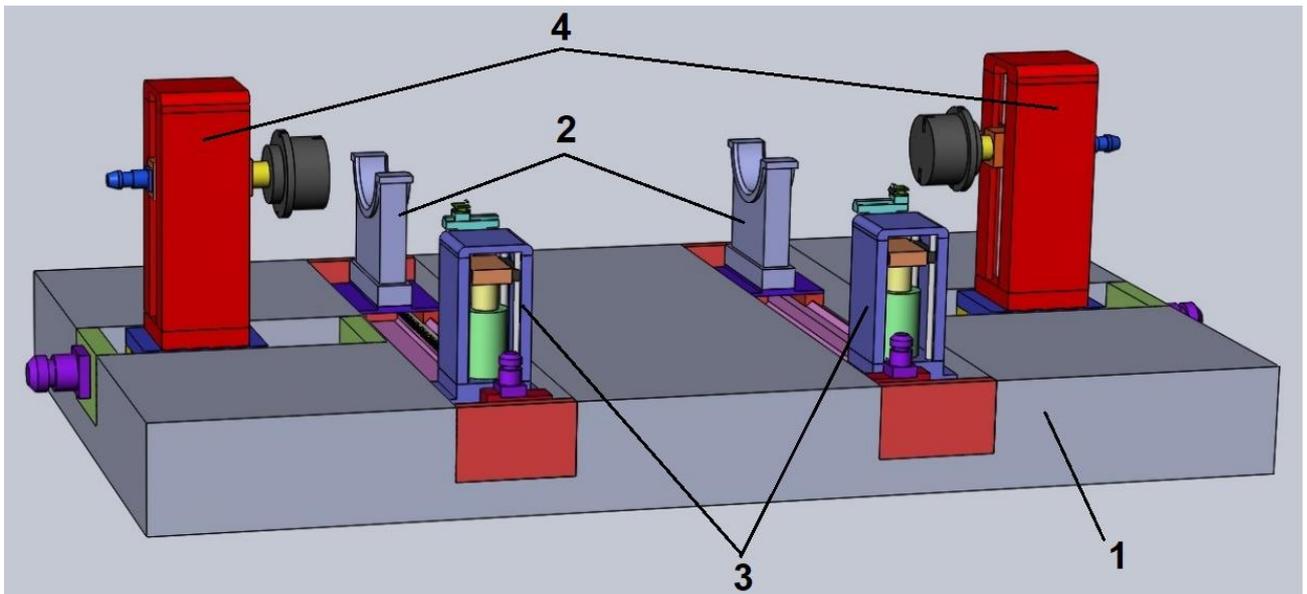


Рисунок В.1 – Трехмерная модель модульного комплекта вспомогательного оборудования для проведения ремонтно-восстановительных работ цапф барабанной мельницы: 1 – монтажно-демонтажная рабочая фундаментная площадка; 2 – откатные подшипниковые опоры; 3 – подвижные инструментальные модули; 4 – подвижные консоли временных опор (составлено автором)

Технический результат способа (Приложение А) достигается тем, что промышленная площадка совмещена с площадкой установки барабанной мельницы, на которой установлены опорные подшипники скольжения, вначале отсоединяют и извлекают из загрузочной и разгрузочной цапф втулки, во внутренние отверстия которых вводят подвижные консольные направляющие, далее вскрывают и удаляют верхние крышки опорных подшипников скольжения, после этого поднимают барабанную мельницу на подвижных консолях и выкатывают нижние части опорных подшипников скольжения, центрируют наружные поверхности загрузочной и разгрузочной цапф, а затем очищают поверхности, при этом устанавливают на опорной платформе оборудование, которое сформировано в комплекты сварочного и наплавочного оборудования, оборудования для механической обработки, при этом последовательно производят наплавку, точение и шлифование проводят одновременно для опорных поверхностей загрузочной и разгрузочной цапф, затем подкатывают нижние части опорных подшипников скольжения и опускают на

них барабанную мельницу, подвижные консольные направляющие выводят из внутренних поверхностей загрузочной и разгрузочной опорных подшипниковых цапф и приводят в исходное положение, устанавливают верхние крышки опорных подшипников скольжения, устанавливают втулки и соединяют фланцы.

В связи с чем, для достижения поставленной цели, создается монтажно-демонтажная рабочая фундаментная площадка, на которой располагается шаровая барабанная мельница. Для проведения нового технологического процесса ремонта цапф мельницы на этой же площадке собирается и располагается модульное оборудование механизированного станочного комплекса. В период эксплуатации мельницы она располагается на монтажно-демонтажной рабочей фундаментной площадке и когда наступает время проведения капитального ремонта цапф по показаниям мониторинга или согласно технологической документации, производится демонтаж опорных подшипниковых узлов мельницы и установка модульного механизированного станочного комплекса на этой же фундаментной площадке. После чего производится ремонтно-восстановительные работы, по окончании которых модульное оборудование демонтируется и опорные подшипниковые узлы собирают обратно для последующей работы мельницы.

Таким образом, предлагаемый модульный комплект вспомогательного оборудования состоит из следующих элементов: монтажно-демонтажной рабочей фундаментной площадки, на которой на направляющих установлены подвижные консоли временных опор с установленными на них разжимными оправками и двигателями, а также откатных подшипниковых опор и подвижных инструментальных модулей со сменными комплектами оборудования для проведения ремонтно-восстановленных работ опорных поверхностей цапф (рисунок В.1). Монтажно-демонтажная рабочая фундаментная площадка снабжена комплектом направляющих с каретками для установки на них подвижных консолей временных опор, подвижных инструментальных модулей и установки, и вывода откатных подшипниковых опор из ремонтной зоны, верхние крышки которых демонтируются перед проведением ремонтно-восстановительных работ (рисунок В.2).

Перед использованием модульного комплекта вспомогательного оборудования, бункерные крышки снимаются со всех направляющих, после чего подвижные консоли временных опор и подвижные инструментальные модули устанавливаются непосредственно на базовую поверхность кареток, находящихся на соответствующих продольных направляющих, приводимых в движение от имеющихся электродвигателей (рисунок В.1).

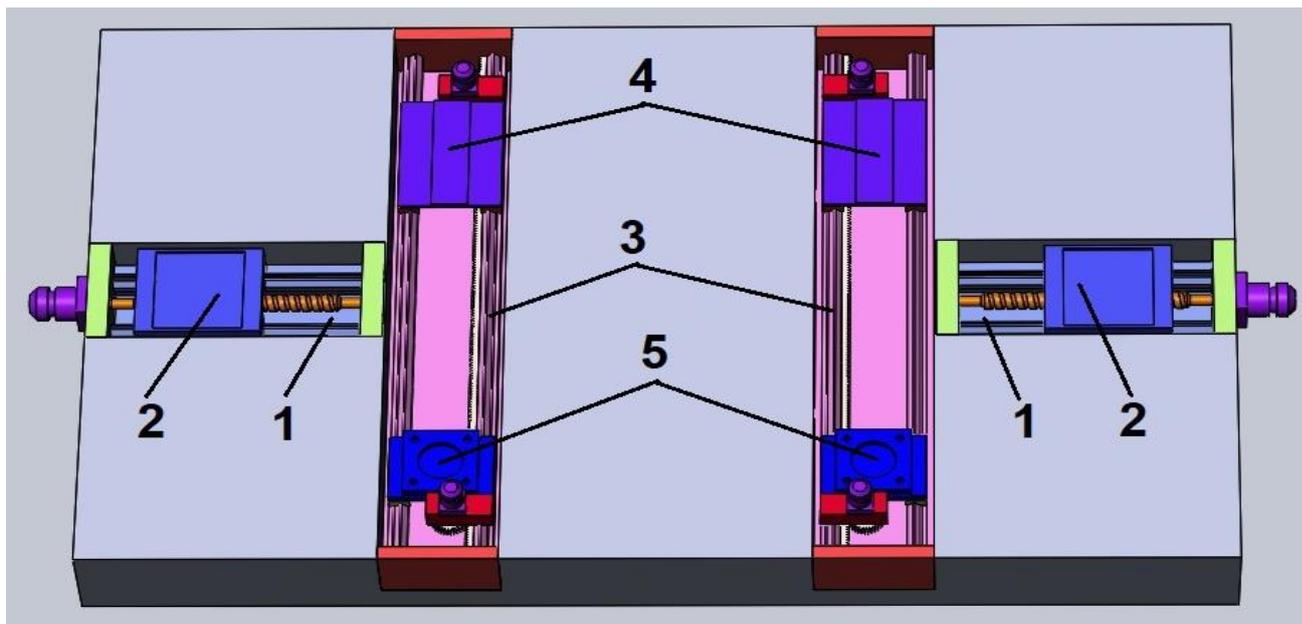
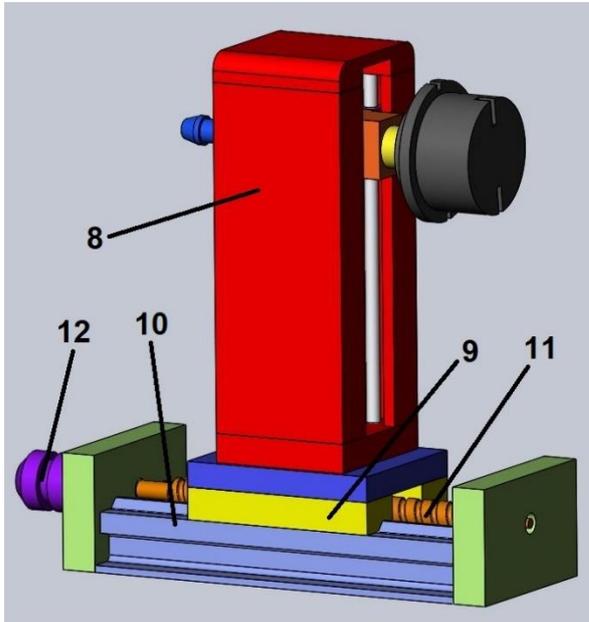


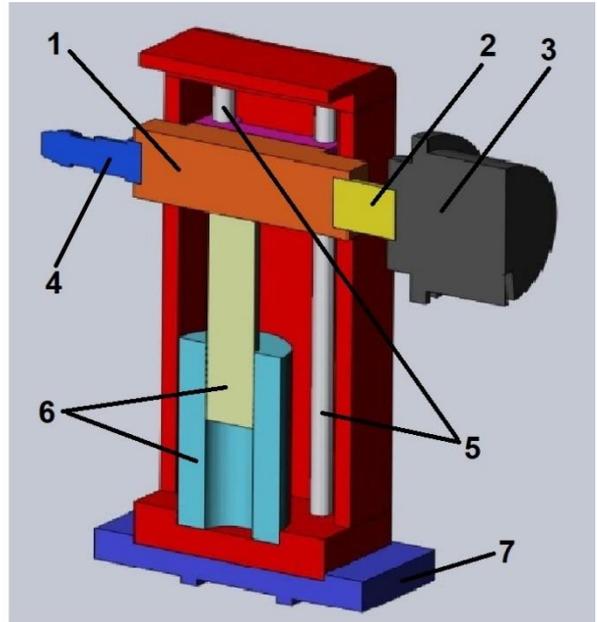
Рисунок В.2 – Монтажно-демонтажная опорная фундаментная площадка:
 1 – направляющие для перемещения кареток подвижных консолей временных опор; 2 – каретки для установки подвижных консолей временных опор;
 3 – направляющие для перемещения кареток подвижных инструментальных модулей и кареток откатных подшипниковых опор; 4 – каретки для установки откатных подшипниковых опор; 5 – каретки для установки подвижных инструментальных модулей (составлено автором)

В подвижные консоли временных опор входит коробка скоростей со шпиндельной головкой на подшипниках, жестко связанной с разжимными оправками для базирования мельницы в процессе проведения ремонта полых опорных цапф скольжения. Шпиндельная головка приводится во вращения через коробку скоростей от электродвигателя, установленного на подвижной консоли. С

помощью коробки скоростей осуществляется регулировка оборотов вращения разжимных оправок через шпиндельные головки (рисунок В.3, а).



а) общий вид подвижной консоли временных опор



б) механизм вертикального перемещения консоли временных опор с разжимной оправкой

Рисунок В.3 – Подвижная консоль временных опор: 1 – коробка скоростей; 2 – шпиндельная головка на подшипниках; 3 – разжимная оправка; 4 – электродвигатель разжимной оправки; 5 – вертикальные цилиндрические направляющие перемещения верхней части подвижной консоли временных опор; 6 – гидродомкрат; 7 – базовая поверхность каретки для установки подвижной консоли временных опор; 8 – корпус подвижной консоли временных опор; 9 – профильные направляющие каретки для установки подвижных консолей временных опор; 10 – направляющие для перемещения каретки подвижной консоли временных опор; 11 – червячная передача для перемещения каретки по направляющим; 12 – электродвигатель червячной передачи для перемещения каретки (составлено автором)

Для проведения одновременной обработки рабочих наружных цилиндрических поверхностей полых цапф производят центрирование поверхностей загрузочной и разгрузочной подшипниковых цапф мельницы относительно друг друга и корпуса. Для этого во внутренние отверстия загрузочной и разгрузочной опорных подшипниковых цапф мельницы вводят разжимные

оправки подвижных консолей временных опор. Для поднятия корпуса мельницы и последующей обработки полых цапф, подвижные консоли снабжены вертикальными направляющими, по которым посредством масляного гидродомкрата осуществляется вертикальное перемещение верхних частей консолей, включающих в себя шпиндельный узел с коробкой скоростей, электродвигателями и разжимными оправками (рисунок В.3).

В непосредственной близости от направляющих подвижных консолей временных опор на опорной фундаментной платформе располагаются общие направляющие для перемещения кареток откатных подшипниковых опор (рисунок В.4) и подвижных инструментальных модулей (рисунок В.5) посредством электродвигателей.

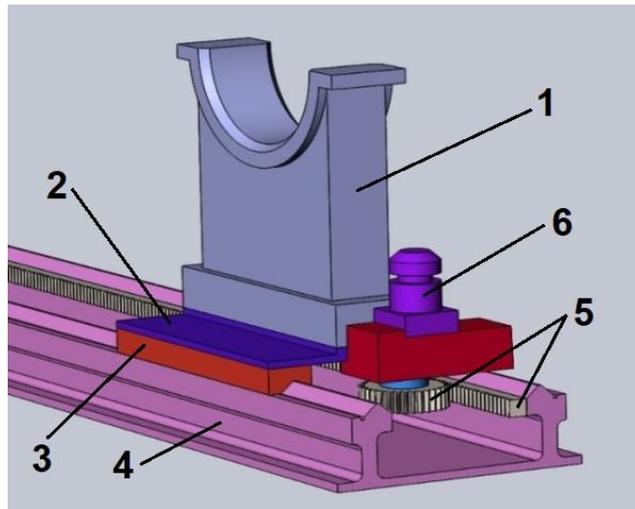


Рисунок В.4 – Механизм горизонтального перемещения откатных подшипниковых опор: 1 – нижняя опора подшипникового узла скольжения; 2 – базовая поверхность каретки для установки нижней опоры подшипникового узла скольжения; 3 – профильные направляющие каретки; 4 – направляющие для перемещения каретки откатной подшипниковой опоры; 5 – реечная передача для перемещения каретки по направляющим; 6 – электродвигатель реечной передачи для перемещения каретки (составлено автором)

Инструментальный подвижный модуль имеет вертикальные направляющие и посредством гидродомкрата осуществляется линейное перемещение базовой верхней плоскости с направляющими и суппортом для базирования сменного

модульного ремонтного комплекта и его подвода в рабочую ремонтную зону (рисунок В.4, б).

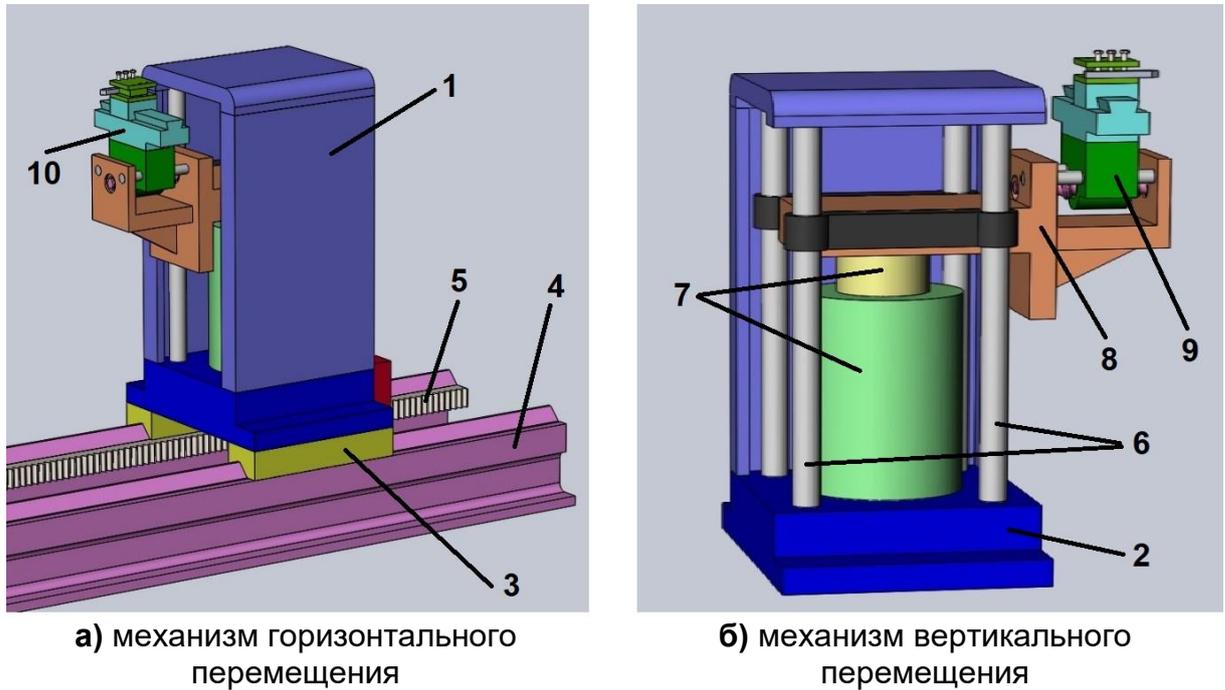


Рисунок В.5 – Подвижный инструментальный модуль: 1 – корпус подвижного инструментального модуля; 2 – базовая поверхность каретки для установки подвижного инструментального модуля; 3 – профильные направляющие каретки; 4 – направляющие для перемещения каретки подвижного инструментального модуля; 5 – реечная передача для перемещения каретки по направляющим; 6 – вертикальные цилиндрические направляющие перемещения базовой верхней плоскости подвижного инструментального модуля; 7 – гидродомкрат; 8 – базовая верхняя плоскость; 9 – суппорт с направляющими для базирования модульного ремонтного комплекта; 10 – сменный модульный ремонтный комплект
(составлено автором)

На суппорте подвижного инструментального модуля с направляющими для базирования модульного ремонтного комплекта в свою очередь располагаются прямоугольные направляющие для линейного перемещения подачи суппорта в зону резания, на который поочередно устанавливаются ремонтные модули для механической обработки, представляющие собой: токарный модуль с резцедержателем и различными типами резцов; модуль с оборудованием для

проведения наплавки металла на поверхность цапф; модуль для шлифования наружных поверхностей цапф. С помощью имеющихся продольных направляющих и шарико-винтовой передачи, суппорт с установленным на нем ремонтным модулем, например, токарным, подводится в зону резания.

2 Принцип подготовки модульного комплекта вспомогательного оборудования для проведения ремонта цапф по запатентованной технологии

Модульный комплект вспомогательного оборудования для реализации ремонтного способа может иметь и полностью мобильную конструкцию приставного типа (рисунок В.6). Данный комплект оборудования позволяет производить ремонтно-восстановительные работы опорных цапф барабанных мельниц без необходимости в проведении работ по демонтажу ее корпуса и торцевых крышек с опорными цапфами согласно патенту № 2788040 непосредственно на месте эксплуатации мельницы в условиях ограниченного рабочего пространства модульных комплексов горного оборудования, как в случае с плавучим ГОКом при разработке месторождения «Павловское».

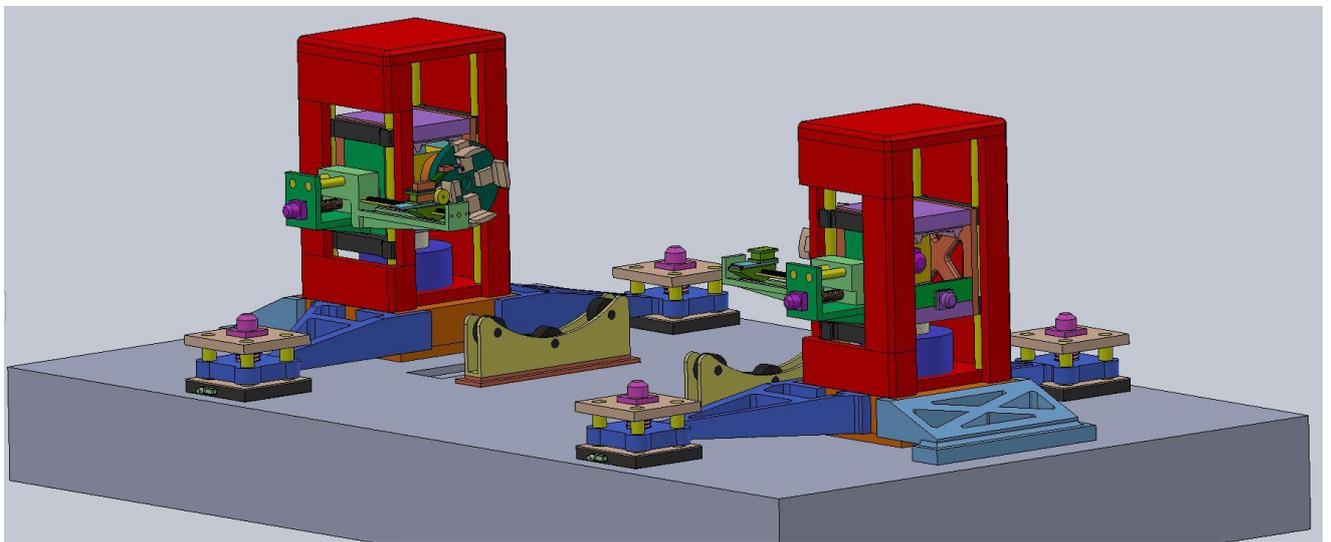


Рисунок В.6 – Трехмерная модель общего вида конструкции модульных комплектов вспомогательного оборудования приставного типа
(составлено автором)

Разработанная конструкция модульного комплекта вспомогательного оборудования обеспечивает возможность проведения восстановительных работ

цапф барабанных мельницах различных типоразмеров, эксплуатируемых в составе горно-обогатительных комбинатов и комплексов горного оборудования для разработки свинцово-цинковых месторождений. Применение унифицированной модульной системы вспомогательного оборудования позволяет существенно оптимизировать парк ремонтного оборудования, что приводит к сокращению количества необходимых технических средств и повышению эффективности использования имеющихся ресурсов. Благодаря стандартизации компонентов и гибкости конфигурации вспомогательных комплектов достигается их максимальная готовность к проведению ремонтно-восстановительных работ при минимальных затратах на его содержание и обслуживание. Также позволяя осуществлять ремонт цапф барабанной мельницы по фактическому состоянию до первоначального состояния в соответствии с конструкторской документацией, обеспечивая качество поверхности цапф, их цилиндричность, полное радиальное биение опорной поверхности разгрузочной цапфы относительно загрузочной и стабильное размерообразование стенок пустотелых цапф, позволяя проводить весь необходимый набор операций по восстановлению поверхностей цапф на месте технологической установки мельниц в общей цепи горно-обогатительного оборудования.

Таким образом, последовательность монтажа модульного комплекта вспомогательного оборудования и спектр ремонта цапф барабанной мельницы выглядит следующим образом. В процессе проведения ремонта модульный комплект вспомогательного оборудования монтируется в непосредственной близости от эксплуатируемой барабанной мельницы, исключая необходимость демонтажа барабана и транспортирования мельницы в целом. Для этого, прежде всего, проводятся вспомогательные работы по подготовки мельницы к ремонту. Мельница отключается от привода, после чего производят демонтаж секторного ведомого зубчатого венца от барабана. Далее извлекают втулки из загрузочной и разгрузочной пустотелых опорных цапф, путем демонтажа болтовых соединений фланцев. Демонтируют верхние крышки опор скольжения с дальнейшим снятием и полуцилиндров баббитовых вкладышей скольжения.

С помощью имеющегося кранового оборудования, а именно, установленных в пролетах предприятия мостовых кранов, согласно разработанным при монтаже мельниц схемам строповки производят строповку барабана мельницы цепным пауком и поднимают корпус с нижних частей подшипниковых опор, параллельно устанавливая под места соединений фланцев барабана с крышками цапф подкатные опорные катки (см. рис В.7).

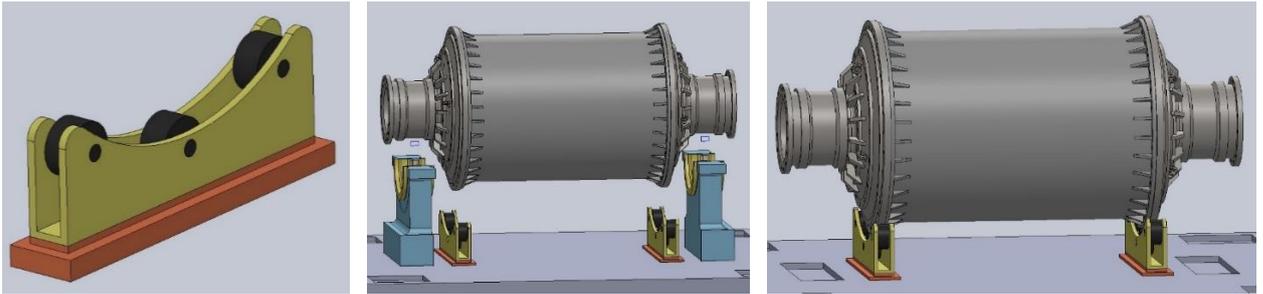


Рисунок В.7 – Установка подкатных опорных катков под фланцы барабана
(составлено автором)

Подкатные опорные катки позволят в дальнейшем при проведении ремонта цапф мельницы снизить нагрузку на приставные ремонтные модульные комплекты временных опор и нивелировать момент прогиба оси вращения барабана при непосредственном процессе ремонта. В свою очередь нижние опоры подшипников скольжения полностью демонтируются и удаляются из зоны проведения ремонтных работ. Таким образом корпус мельницы, а именно ее барабан в сборе с цапфами готов для проведения ремонтно-восстановительных работ опорных цапф.

Следующий шаг заключается в монтаже и подготовки приставных ремонтных комплектов оборудования временных опор. Аналогично, с помощью имеющегося в рабочем пространстве мостового крана устанавливают два мобильных опорных модуля в непосредственной близости от пустотелой загрузочной и разгрузочной опорных цапф мельницы, как показано на рисунке В.8. При размещении модульных ремонтных комплектов временных опор, сначала производят их грубый монтаж относительно друг друга. По возможности стараются выставить их как можно более соосно относительно разжимных оправок каждого из временных опор относительно друг друга с помощью применения лазерной

центровки. Для дальнейшего более точного монтажа оборудования на фундаменте рабочего пространства мельницы к каждой опоре устанавливаются специальные опорные лапы как представлено на рисунке В.9.

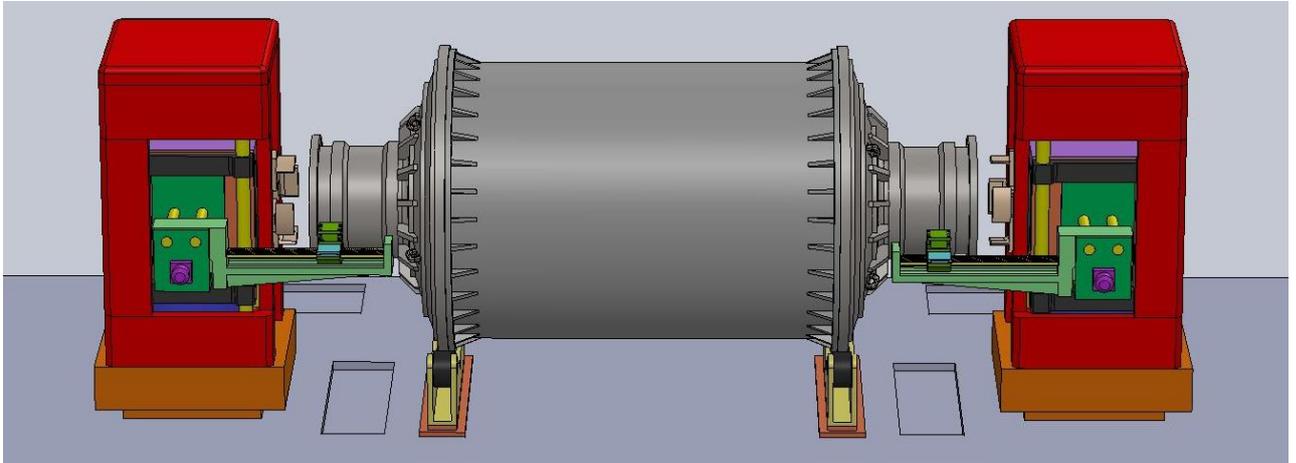


Рисунок В.8 – Размещение приставных ремонтных модульных комплектов временных опор (составлено автором)

Задняя опорная лапа является неподвижной, а две другие боковые лапы служат для дальнейшего точного позиционирования осей разжимных оправок друг относительно друга по вертикале (по оси Z). Это осуществляется благодаря имеющейся на каждой пятке боковой лапы подвижных вертикальных устройств, которые позволяют приподнимать уровень одной лапы относительно другой по вертикале независимо, а также изменять наклон оси Z каждого из модулей временных опор.

Также данные боковые опорные лапы служат стабилизаторами обеспечивая жесткость стояния приставных консолей временных опор на фундаментном рабочем пространстве предотвращая их переворачивание и возникающие вибрации.

После всех вышеперечисленных подготовительных монтажных работ модульного комплекта вспомогательного оборудования производится их точная выверка относительно друг друга, а именно относительно осей цилиндров разжимных кулачковых оправок. Для этого каждый модуль оснащен рядом подвижных узлов. В первую очередь, как было сказано ранее – пятки боковых опорных лап, которые позволяют выставлять каждый модуль по оси Z , тем самым

добиваясь того, чтобы оси Z каждого из двух ремонтных модулей были параллельны друг другу. Затем, благодаря имеющемуся поворотному узлу в станине каждого ремонтного модуля возможно осуществлять общий угловой сдвиг верхнего опорного узла. Таким образом можно избежать несовпадения осей разжимных кулачковых оправок по оси X . Все перечисленные манипуляции сопровождаются с помощью применения лазерных центровок, установленных на разжимных оправках. Также благодаря установленным гидроцилиндрам под головным узлом разжимных кулачковых оправок имеется возможность их передвижения вверх и вниз по оси Z .

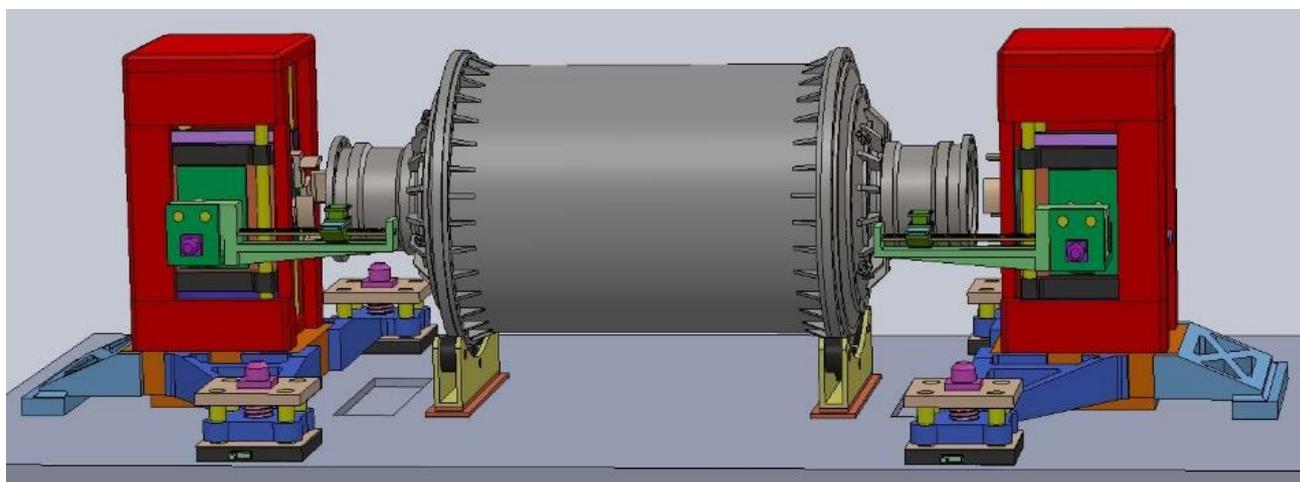


Рисунок В.9 – Размещение и установка опорных лап для каждого из модулей временных опор (составлено автором)

По итогам монтажа и центрирования двух ремонтных модулей относительно друг друга производится непосредственное базирование корпуса мельницы на приставных ремонтных модулях. Для этого с помощью имеющихся в головных узлах разжимных кулачковых оправках производится их ввод в пустое пространство загрузочной и разгрузочной опорной цапфы (рисунок В.10). Таким образом проводится базирование по внутренним поверхностям отверстий путем разжима каждого из кулачков. Все это проводится с помощью индикаторных головок, установленных на поверхности каждой из цапф. Следовательно, сначала проводится приблизительная центровка с проверкой биения одной цапфы относительно другой. После мельница выкатывается, проводится повторная выверка и так далее пока не будет достигнут желаемый результат биения примерно в

0,1-0,2 мм. Параллельно с этим регулируется и высота подкатных модульных катков под фланцами барабана.

Вращение придается корпусу через разжимные кулачковые оправки от имеющихся в головных узлах электродвигателей у каждой из консоли временных опор. Окончательный вид базирования корпуса мельницы на ремонтных мобильных приставных модулях представлен на рисунке В.11.

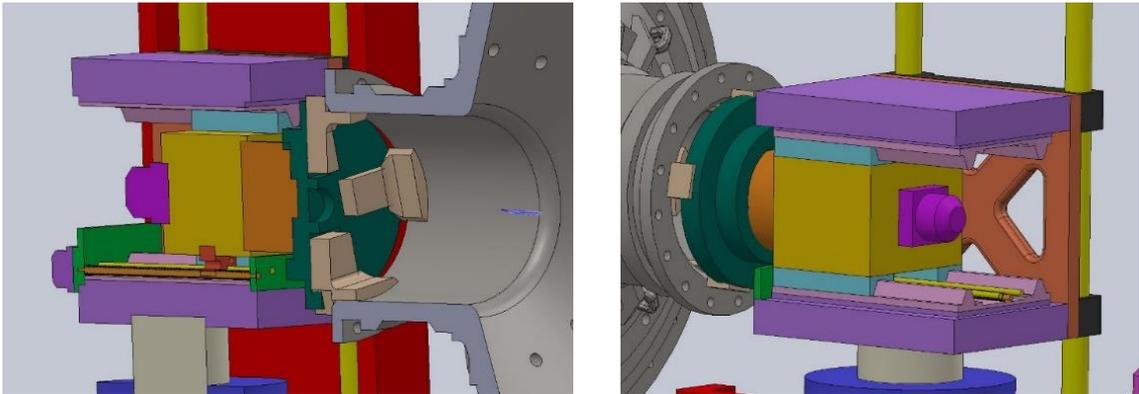


Рисунок В.10 – Ввод разжимных кулачковых оправок в отверстия загрузочной и разгрузочной цапфы для базирования корпуса на приставных ремонтных модульных комплектах временных опор (составлено автором)

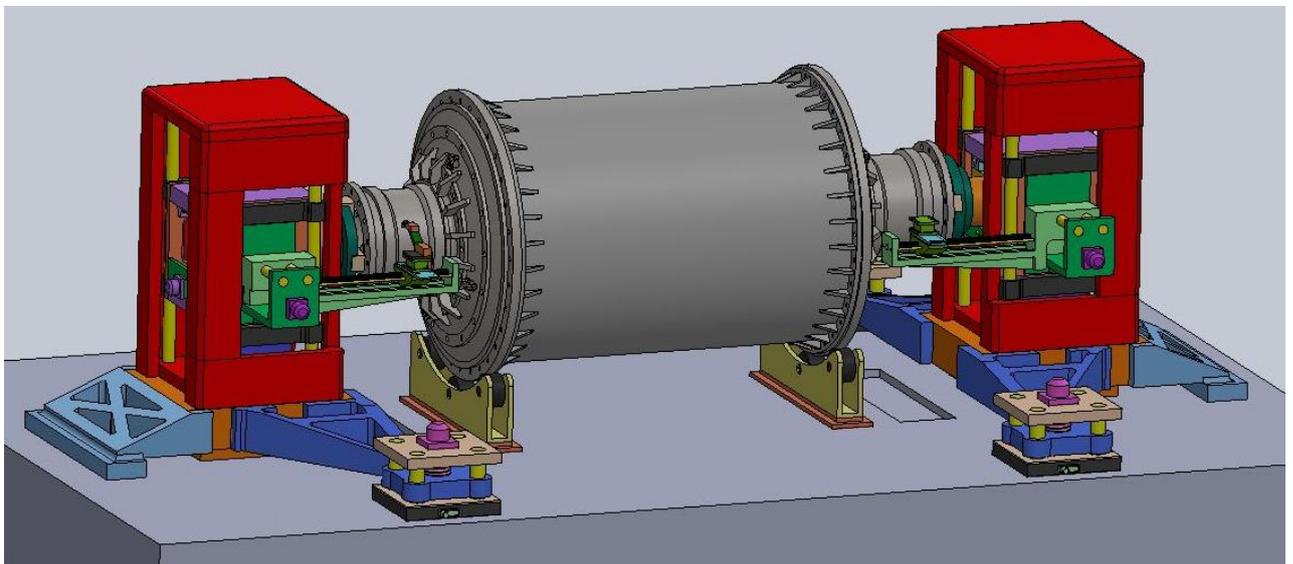


Рисунок В.11 – Базирование корпуса барабана мельницы при помощи модульных комплектов вспомогательного оборудования приставного типа (составлено автором)