

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

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Иванов Сергей Леонидович

Официальные оппоненты:

Лагунова Юлия Андреевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра горных машин и комплексов, заведующий кафедрой;

Гришин Игорь Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

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

Автореферат разослан 29 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 «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.

Задачи исследования:

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 технико-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 (патент РФ № 2788040), 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 г.).

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

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, 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертации, обозначены объект и предмет, сформулирована цель и идея, поставлены задачи, описана научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных источников и передового опыта по теме исследования. Проведен анализ горного оборудования для дезинтеграции свинцово-цинковой руды с позиции надежности, в частности выделены барабанные мельницы, отказ которых влечет за собой наибольшие затраты и временные потери. Рассмотрены опорные подшипники барабанной мельницы как критические ресурсопределяющие узлы, напрямую влияющие на параметр потока отказов цапф. Показано, что ремонт подшипниковых цапф является наиболее трудозатратным, в частности в условиях ограниченного рабочего пространства на месте эксплуатации барабанной мельницы.

Во второй главе представлены подходы по реализации адаптивной технологии проведения технического обслуживания и ремонта подшипниковых узлов для поддержания работоспособного состояния барабанных мельниц. Обоснован контроль величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниковом узле в качестве диагностического параметра оценки технического состояния последнего. Представлен анализ необходимости проведения мероприятий корректирующего технического обслуживания для повышения межремонтного ресурса подшипниковых узлов мель-

ницы. Предложена концепция повышения уровня ремонтной технологичности цапф барабанной мельницы.

В третьей главе представлен план проведения экспериментов, описаны условия и результаты оценки экспериментальной зависимости величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике скольжения от отклонения формы поверхностей цапф. Установлены причины изнашивания поверхностей подшипниковых цапф мельниц. Проведен анализ интенсивности процесса изнашивания опорной поверхности цапфы при предельно допустимой температуре в подшипнике. Даны подходы к оценке межремонтного ресурса подшипниковых узлов барабанной мельницы.

В четвертой главе на основе экспериментально полученных данных рассчитана и построена контрольная карта Шухарта средних значений температур для оценки технического состояния опорных подшипников барабанной мельницы в режиме реального времени. Дано описание алгоритма мероприятий корректирующего технического обслуживания опорных подшипников барабанной мельницы, обеспечивающего повышение межремонтного ресурса. Представлен разработанный способ ремонта опорных подшипниковых цапф барабанной мельницы без их демонтажа с указанием перечня основных работ и этапов, а также предложена конструкция модульного комплекта вспомогательного оборудования для реализации данной ремонтной технологии. Приведена оценка повышения уровня ремонтной технологичности цапф барабанной мельницы по времени нахождения в ремонте.

В заключении изложены выводы и рекомендации на основании результатов проведенных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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 %.

Опорные подшипники барабанных мельниц являются ее критическими ресурсопределяющими узлами, напрямую влияющими

как на работоспособность барабанных мельниц, так и на величину межремонтного ресурса. На основе анализа различных методов контроля технического состояния подшипников скольжения было установлено, что термометрия является наименее затратным методом и обладает быстрой реакцией на зарождение процесса изнашивания подшипникового узла, однако требует дополнительных исследований в рамках уточнения возможностей применения для крупногабаритных подшипников скольжения. Учитывая это, проведены экспериментальные исследования, позволившие установить зависимость величины нагрева и интенсивности роста температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей цапф при режиме работы барабанной мельницы, характеризующемуся удельными нагрузками на подшипники 3,3 МПа, и влияния этих отклонений на их межремонтный ресурс.

Испытания опорных подшипников в составе передаточных узлов проводились на специально оборудованном стенде с поэтапно задаваемой нагрузкой в системе с выходом на рабочий режим, сопровождающийся мощностью 20 МВт, что обеспечивало удельную нагрузку на подшипники 3,3 МПа, эквивалентную режиму работы барабанной мельницы в процессе измельчения свинцово-цинковой руды в течение времени « T » по выражению (1):

$$P = (2000T^6 - 3000T^5 + 1000T^4 - 200T^3 + 20T^2 - 0,26T + 23 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^6, \quad (1)$$

где P – мощность в силовом контуре системы испытаний, кВт; T – время испытаний, мин.

Регистрация величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниках производилась с помощью автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) в режиме реального времени с автоматизированного рабочего места.

Габаритные размеры пустотелых цапф в составе испытываемых подшипников составляют 300 мм в диаметре и 228 мм в длину. Материал цапф – сталь 18Х2Н4МА, материал вкладышей скольжения – баббит Б83, для создания масляной пленки в опорном подшипнике использовалось минеральное масло Тп-46.

Перед проведением стендовых исследований цапфы в составе испытываемых подшипников были поделены на четыре соответствующие группы: номинальную $\text{Ц}_{1.\text{ном}}$, минимальную $\text{Ц}_{2.\text{мин}}$, повышенную $\text{Ц}_{3.\text{пов}}$, аварийную $\text{Ц}_{4.\text{авр}}$, в зависимости от фактических геометрических параметров, как представлено в таблице 1. В состав

отобранных групп входят четыре выборки, каждая из которых представлена телом вращения с двумя опорными цапфами.

В ходе проведенных испытаний 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 (1) в течение времени « T », описываются функциональной зависимостью полинома шестой степени для каждой группы цапф в составе испытываемых подшипников с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98 - 0,99$ (2-5):

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

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

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

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

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.

Функциональные зависимости для каждой из групп представлены графически на рисунке 1. Изменение температуры в подшипнике скольжения для групп цапф в составе узла не превышало: для Ц_{1.ном} – 45 °С; для Ц_{2.мин} – 60 °С; для Ц_{3.пов} – 84 °С.

Группа цапф Ц_{4.авр} в составе испытываемого подшипникового узла характеризуется неравномерным отклонением формы поверхностей с полным радиальным биением 0,191 мм (43 % от толщины масляного слоя 0,41 мм), вызывающим аварийный режим работы, при котором температура в подшипнике достигает 113 °С. При таком отклонении формы поверхностей цапф возникала разбалансировка узла вращения, сопровождающаяся началом резкого возрастания интенсивности изнашивания как баббитовых вкладышей, так и поверхностей цапф из-за неравномерного распределения масляного слоя в подшипниковых узлах. При отсутствии корректирующих мероприятий по снижению температуры в данном подшипниковом узле через 6 часов работы наблюдалось частичное выкрашивание баббитового слоя вкладышей с локальным контактом

металл-металл, что сопровождалось ростом температуры в узле до 120-130 °С.

При температурах, сопровождающих выкрашивание баббитового слоя вкладышей, опорные подшипники сохраняли работоспособность до 3 часов, вызывая ускоренный износ поверхностей цапф. Оценка степени выкрашивания баббитового слоя (вкладыши показаны на рисунке 2) проводилась после демонтажа подшипника при его аварийной остановке методом визуально-измерительного контроля.

Для анализа интенсивности изнашивания поверхностей цапф в составе испытываемых подшипниковых узлов выбрана группа Ц_{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 в составе испытываемых подшипниковых узлов.

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 (1). В результате проведенных испытаний средняя интенсивность износа поверхностей цапф данной группы составила 0,054 мм за 2463 км пути трения (таблица 2).

Износ поверхностей цапф подтверждался засорением фильтрующих элементов масляной системы с номинальной толщиной фильтрации 50 мкм металлической пылью, что свидетельствует о наличии продуктов абразивного износа (рисунок 3, 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, б). Износ цапф имел неравномерный характер с образованием конусообразности поверхностей в продольном сечении, что привело к увеличению полного радиального биения.

Установлено, что величина нагрева и интенсивность роста температуры в подшипниковых узлах являются индикатором их межремонтного ресурса 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 $\text{Ц}_{1.\text{ном}}$ и $\text{Ц}_{2.\text{мин}}$, 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 $\text{Ц}_{3.\text{пов}}$, имеющими допуск полного радиального биения 0,083 мм (20 % от толщины масляного слоя 0,41 мм) наблюдался предотказный режим работы, который характеризовался повышением нагрева узла 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.

Таким образом, эксплуатация опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы при удельной нагрузке 3,3 МПа и температуре 84 °С в узлах сопровождается сокращением их межремонтного ресурса с 10000 до 4000 часов. Это 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 ресурс сокращается на 30 % и составляет 7000 часов.

Полученная функциональная зависимость изменения межремонтного ресурса подшипника скольжения, выраженного во временном эквиваленте «Т», от величины нагрева узла «t», характеризуемой отклонением формы поверхностей цапфы, представлена на рисунке 4.

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.

Величина нагрева и интенсивность роста температуры в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения барабанной мельницы, фиксируемые в контрольных картах Шухарта, служат критерием качественной идентификации работоспособности подшипников. Структура контрольной карты Шухарта позволяет отслеживать изменение параметров процесса во времени и определять границы системной вариативности, внутри которой должны находиться значения при стабильном установившемся состоянии процесса. Для составления температурной контрольной карты Шухарта средних значений проводилось исследование 12 передаточных узлов с двумя опорными подшипниками, геометрические параметры цапф которых относятся к группе Ц_{1.ном} (в сумме 24 выборки опорных подшипниковых узлов скольжения), на аттестованном испытательном стенде с задаваемой нагрузкой по выражению (1). Продолжительность испытаний под рабочей нагрузкой составляло 144 ч, из которых 12 ч приходилось на каждый исследуемый передаточный узел с двумя опорными подшипниками скольжения. Снятие показаний величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниках осуществлялось в режиме реального времени с периодичностью фиксации данных через каждые 10 минут при выходе испытываемого передаточного узла на установившийся режим работы, характеризующийся мощностью 20 МВт. Для расчета контрольной карты Шухарта в ходе проведения испытаний принимался временной промежуток в 250 минут для каждой из 24 выборок подшипниковых узлов. Материал цапф и вкладышей, их размеры, тип масла для создания масляной пленки в испытываемых подшипниках были аналогичны представленным ранее.

Нижние и верхние предупредительные и предельные границы контрольной карты Шухарта определялись путем проведения расчетов на основе эмпирически полученных температурных данных 24 выборок с 25 измерениями в каждой и составили: центральная линия средних значений – 38,9 °С; нижняя предельная граница – 25,6 °С; верхняя предельная граница – 52,2 °С; нижняя предупредительная граница – 30,0 °С; верхняя предупредительная граница – 47,8 °С.

Построенная температурная контрольная карта Шухарта средних значений является ключевым инструментом для мониторинга работоспособности подшипников барабанной мельницы с целью выявления на ранней стадии отклонений формы поверхностей подшипниковых цапф, что позволяет снизить риск возникновения отказа опорных узлов. Таким образом, при эксплуатации барабанной мельницы необходимо производить мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипниках скольжения в режиме реального времени с нанесением полученных данных на карту Шухарта с фиксированными значениями границ, как показано на рисунке 5.

Целью разработанного алгоритма мероприятий корректирующего технического обслуживания, представленного на рисунке 6, является профилактика температурных перегрузок, для чего осуществляется корректирование температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения смазки и регулирование давления подачи масла в зону масляного слоя для обеспечения соблюдения допустимого диапазона температур в подшипниках скольжения барабанной мельницы.

При достижении температуры в подшипнике предупредительных границ контрольной карты своевременно может быть произведено корректирование работы системы смазки. На рисунке 7 представлен 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. 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.

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.

Эмпирически установлено, что температура охлаждающей жидкости в системе охлаждения смазки не должна превышать 50 °С и опускаться ниже 10 °С. 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 °С величина температуры в подшипнике снижается на 1 °С при удельной нагрузке на него 3,3 Мпа, обеспечиваемой создаваемой мощностью в системе по выражению (1).

На рисунке 8 представлены результаты мониторинга величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике с цапфой группы Ц_{з.пов} при корректирующих мероприятиях, направленных на работу системы смазки. Как видно из графика, корректировка величины нагрева в данном подшипнике затруднена из-за высокой интенсивности роста температуры, приводящей к ее выходу за верхнюю предельную границу контрольной карты Шухарта и приближающейся к аварийному значению 84 °С. Это свидетельствует о критических отклонениях формы поверхности цапфы, вызванной процессом изнашивания в ходе длительной эксплуатации барабанной мельницы в условиях высоких динамических нагрузок. Из этого следует, что мероприятия корректирующего технического обслуживания в соответствии с разработанным алгоритмом исчерпали свою эффективность. Дальнейшее регулирование температуры в под-

шипнике скольжения для предотвращения разрушения баббитового вкладыша вследствие перегрева невозможно, что требует проведения внепланового ремонта цапфы с целью сохранения работоспособности подшипникового узла.

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-обогатительных комбинатов, разработан способ восстановления цапф без демонтажа цапф корпуса (патент РФ № 2788040). Технология проведения ремонта, согласно патенту, также предусматривает разработку и использование модульных комплектов вспомогательного оборудования, представленных на рисунке 9.

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.

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_r) производился по формуле (6):

$$K_r = \frac{T_{\Phi}}{T_B} = \frac{T_{ПЗ} + T_P + T_{ПО}}{T_{ПЗ} + T_P + T_{МН} + T_{ДМ} + T_{ТРС}}, \quad (6)$$

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 %.

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 (патент РФ № 2788040), 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 (акт внедрения от 28.01.2025 г.).

б. 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Корогодин, А. С.** Геотехнология и горно-обогажительный 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.

2. **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.

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

3. **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.

4. **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.

Патент:

5. 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.

Таблица 1 – Геометрические параметры цапф подшипниковых узлов

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



Рисунок 2 – 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

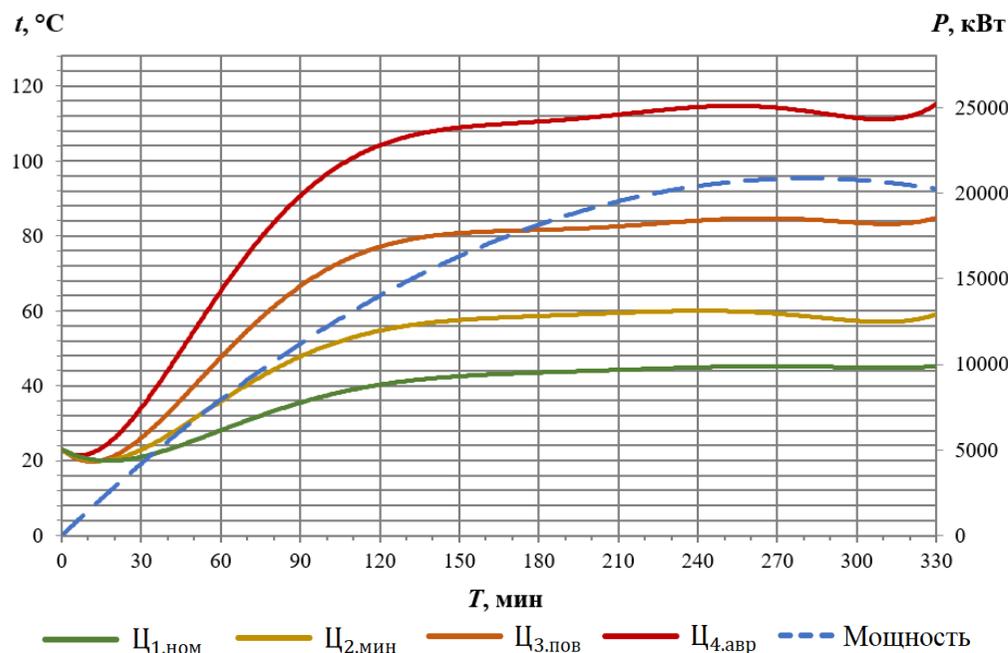


Рисунок 1 – Изменение величины нагрева и интенсивности роста температуры «*t*» в опорных баббитовых гидростатических подшипниках скольжения от отклонения формы поверхностей подшипниковых цапф для каждой группы (Ц_{1.ном}, Ц_{2.мин}, Ц_{3.пов}, Ц_{4.авр}) при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа и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

Таблица 2 – Геометрические параметры цапф группы Ц_{3.пов} до и после 62 часов испытаний при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа, обеспечиваемой создаваемой мощностью 20000 кВт в системе, согласно выражению (1)

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

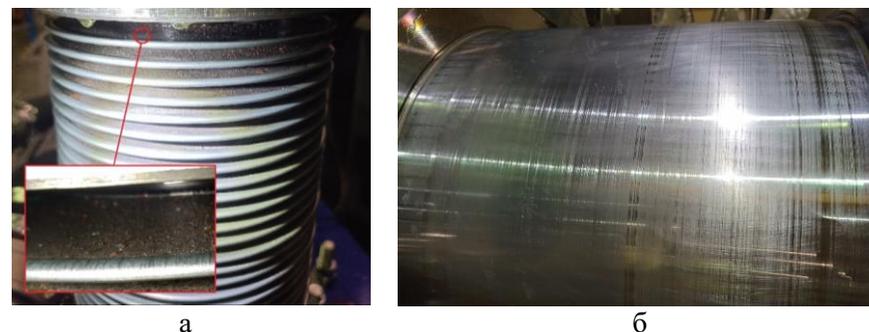


Рисунок 3 – Визуальное проявление износа поверхностей цапф группы Ц_{3.пов}: а – засорение фильтрующего элемента маслофильтра металлической пылью; б – кольцевые риски, точечные вмятины, задиры

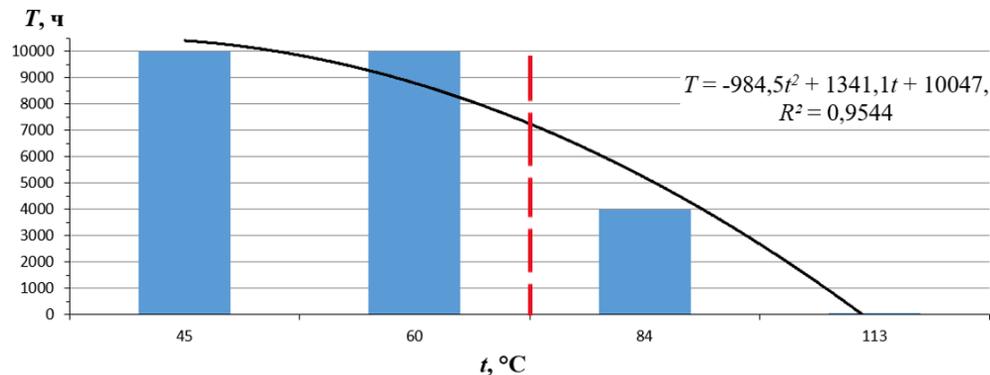
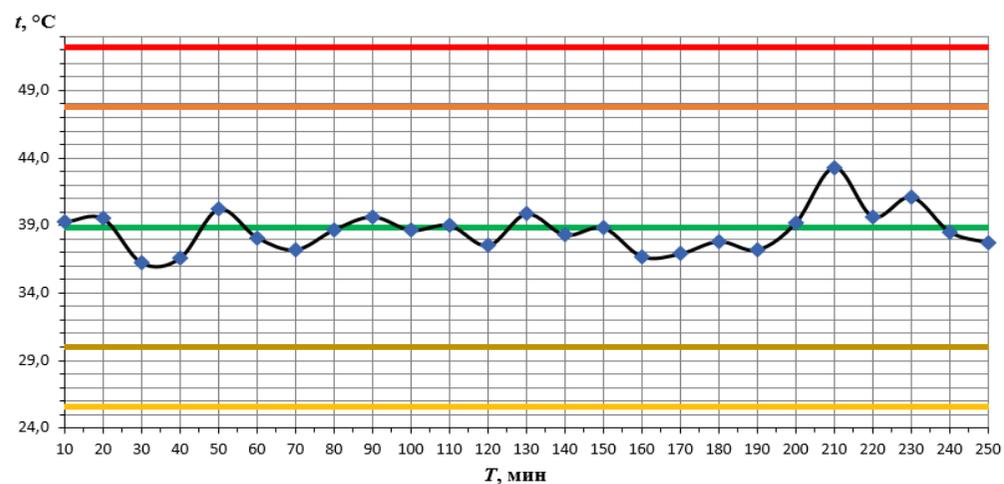


Рисунок 4 – Изменение межремонтного ресурса «Т» опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения от величины нагрева узла «t» при удельной нагрузке на подшипники 3,3 МПа



- Центральная линия средних значений
- Верхняя предельная граница
- Верхняя предупредительная граница
- Нижняя предельная граница
- Нижняя предупредительная граница
- Контролируемые значения температуры

Рисунок 5 – 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

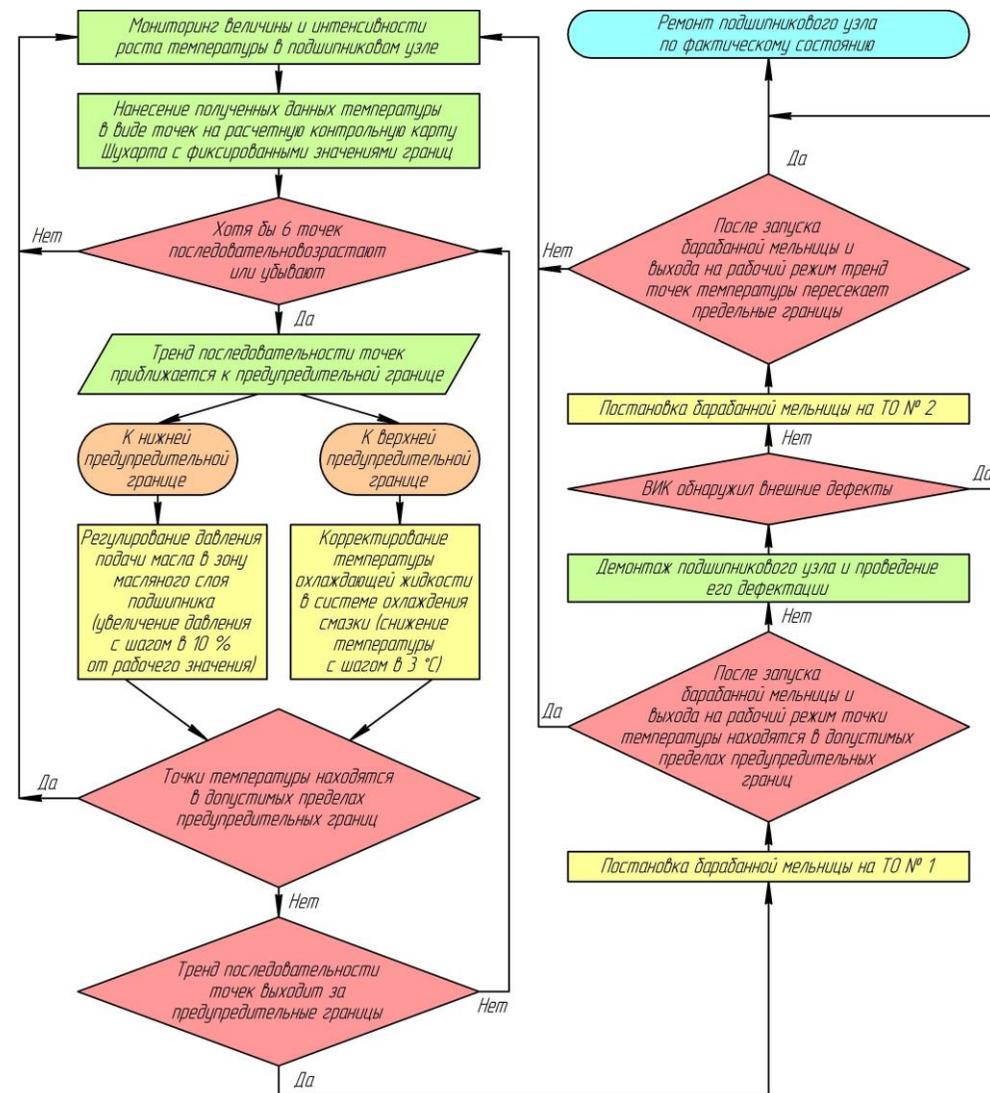


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма мероприятий корректирующего технического обслуживания по обеспечению работоспособности опорных баббитовых гидростатических подшипников скольжения барабанной мельницы

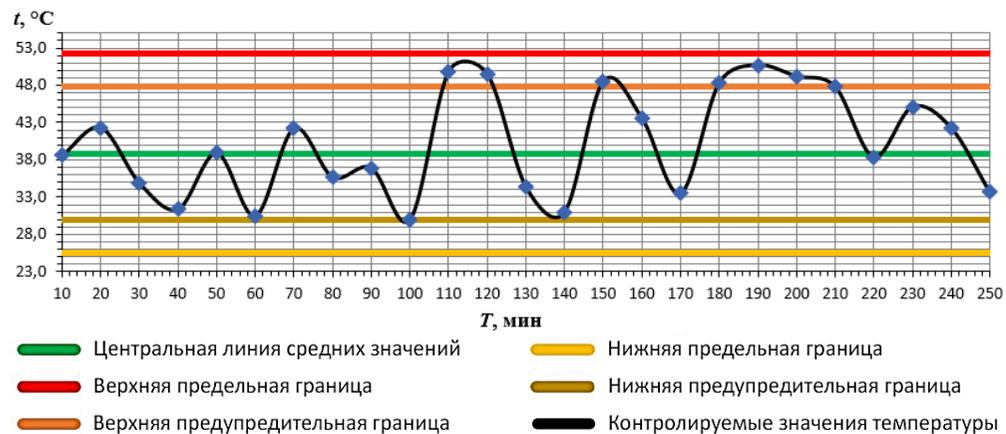
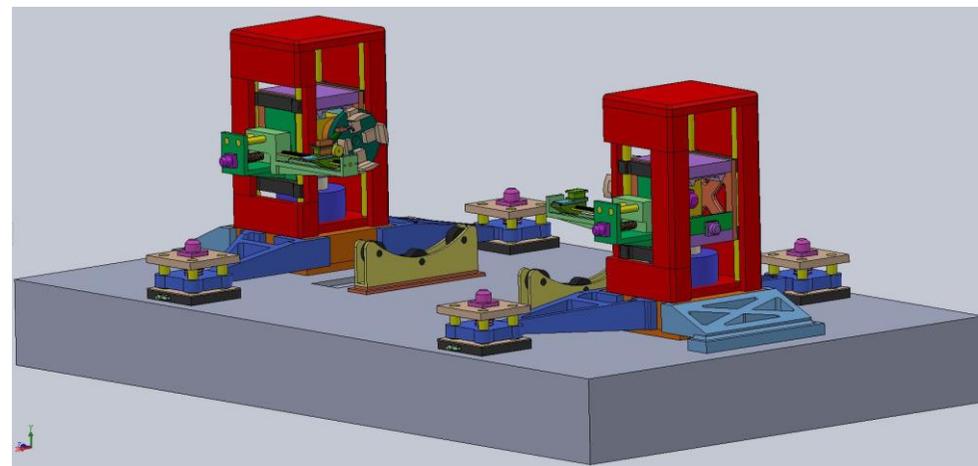


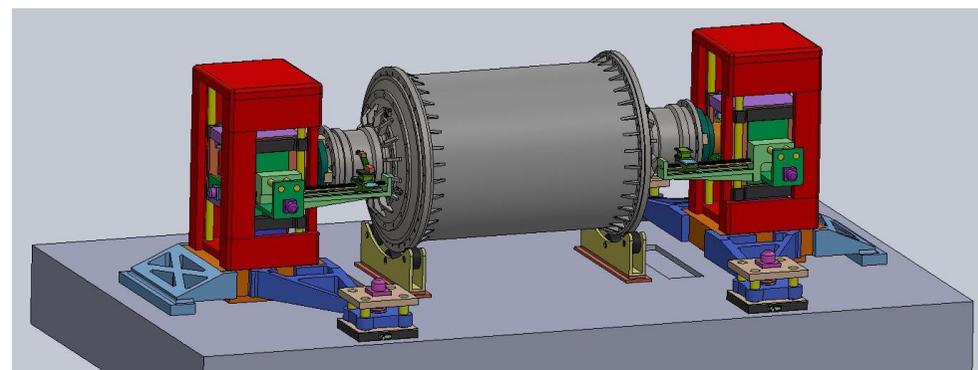
Рисунок 7 – Мониторинг величины нагрева и интенсивности роста температуры в подшипнике с цапфой группы Ц_{2.мин} при корректирующих мероприятиях, направленных на работу системы смазки, в режиме реального времени с нанесением полученных данных на расчетную контрольную карту Шухарта с фиксированными значениями границ



Рисунок 8 – 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



а



б

Рисунок 9 – 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 модульных комплектов вспомогательного оборудования приставного типа; б – базирование корпуса барабана мельницы при помощи модульных комплектов вспомогательного оборудования приставного типа