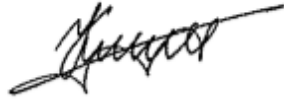


На правах рукописи

Князькина Валерия Ивановна



**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТРАНСМИССИЙ ГОРНЫХ МАШИН УЛУЧШЕНИЕМ
ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕЖИМА СМАЗКИ
ИХ РЕСУРСООПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

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

Санкт-Петербург – 2022

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Иванов Сергей Леонидович

Официальные оппоненты:

Великанов Владимир Семенович

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

Зверев Валерий Юрьевич

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

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

Защита диссертации состоится 8 сентября 2022 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на веб-сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 8 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Качественное и своевременное проведение мероприятий по техническому обслуживанию является важнейшим фактором поддержания эксплуатационной надежности горной машины. На надежность горного оборудования в значительной степени влияет принятая стратегия его технического обслуживания и ремонта (ТОиР). В существующих условиях целесообразен переход к системе ТОиР, обеспечивающей самокупаемость, что невозможно без точной настройки инструментов управления техобслуживанием и ремонтами горного оборудования.

Тяжелые условия эксплуатации – значительные динамические и статические нагрузки, запыленность атмосферы, продукты изнашивания, высокая влажность и изменение температуры окружающей среды приводят к интенсивному загрязнению масел и смазок, превращая их в агрессивный и абразивный материал. Как следствие, возрастает интенсивность деграционных процессов и, в первую очередь деталей и узлов определяющих ресурс трансмиссий, что ведет к увеличению простоев агрегатов, времени на их техническое обслуживание и текущий ремонт, росту эксплуатационных затрат. Поэтому необходим постоянный контроль за техническим состоянием ресурсопределяющих элементов и узлов горных машин, своевременная замена или пополнение лубриката, формирование, таким образом, комфортной искусственной среды функционирования таких элементов.

Однако, на сегодняшний день не решены вопросы эффективной оценки технического состояния узлов и деталей приводов горных машин в целом без разборки редуктора. Существующие методы, включая вибродиагностику, не в достаточной мере решают проблему достоверной оценки состояния ресурсопределяющих узлов трансмиссий горных машин в зависимости от состояния и качества смазки, хотя анализ акустического сигнала ультразвукового диапазона позволяет получать искомую информацию, но на сегодняшний день не имеет широкого применения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами надежности и долговечности горных машин и оборудования, трения и изнашивания их элементов, диагностикой технического состояния, совершенствованием технического обслуживания и ремонта занимались исследователи: А.Ю. Болотнев, П.В. Буянкин, Н.Г. Валиев, В.С. Великанов, Б.М. Габбасов, Б.Л. Герике, В.Н. Гетопанов,

А.В. Докукин, М.Ю. Дрыгин, А.Г. Журавлев, Г.Н. Иванов, Л.И. Кантович, С.В. Корнеев, Б.И. Костецкий, П.И. Кох, Ю.Д. Красников, А.В. Кудреватых, В.Р. Кубачек, В.В. Курчаткин, Ю.А. Лагунова, Л.А. Молдавский, И.Г. Носовский, Р.Ю. Подэрни, В.М. Рачек, А.М. Мажитов, Н.А. Маслов, Д.И. Симисинов, В.И. Солод, Л.И. Сосновский, М.Л. Хазин, А.А. Хорешок, Ю.Н. Тимошенко, О.А. Чооду, Д.А. Шибанов, Д.И. Шишлянников и др.

Широкий класс задач технической диагностики успешно решался методами акустического неразрушающего контроля такими учеными, как: Н.П. Алешин, Н.А. Баркова, Е.А. Воробьев, И.Н. Ермолов, А.И. Потапов, В.В. Носов и др.

Однако не решены вопросы оценки состояния узлов трения горной машины в частности по величине акустического сигнала в ультразвуковой полосе частот, излучаемого парой трения, изменения эксплуатационного режима их смазки для повышения работоспособности трансмиссий горных машин и их ресурсопределяющих элементов, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью исследования является выявление закономерностей изменения акустического сигнала трения ультразвукового диапазона частот ресурсопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин для научно-обоснованного технического решения, по повышению работоспособности горного оборудования путем ранней диагностики повреждений в элементах его трансмиссии и улучшением эксплуатационного режима смазки, в рамках осуществления стратегии технического обслуживания и ремонта, планирования регламентных работ горного оборудования.

Идея исследования заключается в формировании искусственной среды функционирования элементов трансмиссий горных машин путем детерминированной подачи ограниченного объема лубриканта в зоны контактного взаимодействия ресурсопределяющих элементов трансмиссий, а при переходе элементов в предотказное состояние – планировании ремонтных воздействий, на основе анализа акустического сигнала в ультразвуковой полосе частот от ресурсопределяющих элементов трансмиссии по специальному алгоритму оценки технического состояния.

Задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических и экспериментальных исследований по статистике отказов горного оборудования и оценке технического состояния элементов трансмиссии горных машин при

проведении мероприятий в рамках стратегий технического обслуживания и ремонта их технического состояния.

2. Провести обзор и анализ существующих систем и режимов смазки рабочих поверхностей ресурсопределяющих сопряжений в элементах трансмиссий горных машин.

3. Провести экспериментальные исследования по выявлению закономерностей изменения акустического сигнала ультразвукового диапазона внешнего трения от величины и характера параметров искусственной среды функционирования ресурсопределяющих узлов трения горных машин и изменений эксплуатационного режима смазки рабочих поверхностей ресурсопределяющих сопряжений.

4. Предложить алгоритм оценки технического состояния ресурсопределяющих сопряжений трансмиссий по данным акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин.

5. Провести корректировку структуры ремонтного цикла трансмиссий карьерных экскаваторов с учетом реализации предложенного алгоритма оценки технического состояния ресурсопределяющих элементов трансмиссий.

6. Предложить новое техническое решение, позволяющее повысить работоспособность трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки, осуществляя раннюю диагностику повреждений ресурсопределяющих сопряжений и своевременной реновации лубриката на основании оценки состояния элементов трансмиссий в рамках осуществления технологий по техническому обслуживанию и ремонту горных машин.

Научная новизна исследования:

- установлена возможность фиксировать на ранней стадии появление дефектов и повреждений, а также протекание деградиационных процессов ресурсопределяющих элементов трансмиссий горных машин в контролируемых узлах трения, посредством выявления показателя изменения величины акустического сигнала в ультразвуковой полосе частот от удельной нагрузки и скорости в паре трения, что предоставляет возможность оценивать условия функционирования узлов трансмиссий в измененных искусственных средах.

- разработан алгоритм управления централизованной системой смазки ресурсопределяющих элементов трансмиссий горных машин, путем контроля подвижных соединений, который ориентирован на применение акустического сигнала ультразвукового диапазона частот для проведения работ, как по оценке состояния подвижных соединений и узлов динамического

оборудования, так и своевременной реновации лубриката в рамках реализации стратегии технического обслуживания и ремонта карьерной техники.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Обоснована возможность повышения работоспособности и износостойкости ресурсоопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин формированием искусственных сред их функционирования и реновации лубриката на основании оценки изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона в паре трения, генерируемого ресурсоопределяющими сопряжениями.

Разработаны предложения по повышению работоспособности трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки рабочих поверхностей ресурсоопределяющих сопряжений. Выявлено, что в рамках стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию возможно осуществлять и планировать регламентные работы по техническому обслуживанию горной техники и ее ремонту, на основе оценочных данных акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин, для выявления дефектов их ресурсоопределяющих сопряжений.

Предложен алгоритм управления системой смазки в масштабах реализации стратегии технического обслуживания и ремонта. Предложены новые научно-обоснованные технические решения, позволяющие повысить работоспособность трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки, осуществляя раннюю диагностику повреждений ресурсоопределяющих сопряжений и своевременной реновации лубриката на основании оценки состояния элементов трансмиссий в рамках осуществления технологий по техническому обслуживанию и ремонту горных машин.

Результаты исследований использованы ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова», г. Санкт-Петербург на стадии разработки эксплуатационной и ремонтной документации, в частности «Руководство по эксплуатации карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К»; «Регламент технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К».

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач используется комплексный подход, включающий научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, обработку и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований в области горных машин и оценки технического состояния элементов трансмиссии при проведении мероприятий в

рамках стратегий технического обслуживания и ремонта, результатов производственных наблюдений, экспериментальных исследований по выявлению закономерностей изменения акустического сигнала ультразвукового диапазона внешнего трения от величины и характера параметров искусственной среды функционирования ресурсоопределяющих узлов трения горных машин и изменений эксплуатационного режима смазки рабочих поверхностей ресурсоопределяющих сопряжений и компьютерное моделирование.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует следующей области исследования паспорта научной специальности 05.05.06 – Горные машины: п.6 «Разработка и совершенствование технологических процессов с целью обеспечения высокого качества горных машин на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации с учетом специфики работы на горных предприятиях».

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм оценки технического состояния ресурсоопределяющих сопряжений элементов и узлов трансмиссий горных машин позволяет определять состояние подвижного соединения ресурсоопределяющего узла по интенсивности изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона от удельной нагрузки и скорости в контакте относительно соответствующей базовой величины, характеризующих условия смазывания ресурсоопределяющих сопряжений, скорректировать уровень смазки последних или необходимость проведения профилактических ремонтов в рамках реализации стратегии технического обслуживания и ремонта по техническому состоянию сопряжений трансмиссии горной машины, при этом решение о ремонте или замене принимается после исчерпания возможностей изменения технического состояния соединения заменой или пополнением соответствующего лубриката в сопряжении совместно с контролем изменения относительной величины акустического сигнала ультразвукового диапазона в соединении с исходным его значением, сопровождаемого кратным возрастанием среднеквадратичного отклонения контролируемого параметра D .

2. Экспериментально подтверждена, возможность фиксации посредством показателя D уровня деграционных процессов в подвижных соединениях по величине и характеру изменения акустического сигнала ультразвукового диапазона от удельной нагрузки и скорости в контакте, определяющих протекание процессов трения (жидкостного, граничного и сухого) в контролируемых ресурсооп-

ределяющих подвижных соединениях во взаимодействии их элементов между собой в искусственной среде лубриката, при этом, интенсивность протекания трибологических процессов при увеличении скорости скольжения для базового трансмиссионного масла описывается экспоненциальной функцией и при изменении давления квадратичной функцией, вместе с тем применение смазочных масел с моющими присадками, диспергаторами, антиокислителями, модификаторами трения и вязкости позволяют обеспечивать нормальную работу сопряжений, снизив значение акустического сигнала ультразвукового диапазона частот, характеризуемого показателем D , в 3-5 раз по сравнению с базовым маслом, а для консистентных смазок, функции изменения показателя D возможно описывать экспоненциальной функцией при детерминированном изменении скорости скольжения и квадратичной функцией – для изменяемого давления в соединении.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов работы подтверждается корректностью постановки цели и задач исследований; представительным объемом достоверной статистической информации; теория построена на известных, проверяемых фактах и хорошо согласуется с данными производственных наблюдений; экспериментальные исследования процесса изнашивания элементов трансмиссии горной машины проводились на специально созданном и модернизированном для этой цели стенде, оснащенном аттестованными и поверенными приборами.

Апробация результатов диссертационной работы проводилась на заседаниях кафедры машиностроения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», основные положения и результаты работы сообщались, обсуждались и получили одобрение и положительную оценку на всероссийских и международных конференциях, в которых соискательница принимала активное участие: V Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2018; проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования и нефтепромыслового оборудования» (г. Пермь, 2018 г.); 14-ая Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2018 г.); 59-ая Международная научная конференция студентов и молодых ученых по горному делу в Краковской

горно-металлургической академии, секция «Механизация и обеспечение горного производства» (Польша, г. Краков, 2018 г.); XVII Международная научно-практическая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург; 2019, 2020, 2021 гг.); XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов в Санкт-Петербургском горном университете (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); Международный семинар «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME» (г. Санкт-Петербург; 2019, 2020 гг.); 70th Berg- und Huttenmannischer Tag 2019 (Германия, г. Фрайберг, ТУ «Фрайбергская горная академия», 2019 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Горная и нефтяная электромеханика – 2019; проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования и нефтепромыслового оборудования» (г. Пермь, 2019 г.); VIII Всероссийский молодежный форум «Нефтегазовое и Горное дело» (г. Пермь, 2019 г.); Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск; 2020 и 2021 гг.); XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов в Санкт-Петербургском горном университете (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); XVI Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); Международная научно-техническая конференция НТИ (филиала) УрФУ и АО «ЕВРАЗ НТМК» «Промышленное производство и металлургия» (г. Нижний Тагил, 2020 г.); XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (г. Пермь, 2020 г.); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Личный вклад автора

Включенное участие на всех этапах процесса, непосредственное участие в получении исходных данных и научных экспериментах, личное участие в апробации результатов исследования, разработка экспериментальных стендов и установок, выполненных лично автором, подготовка основных публикаций по выполненной работе.

Публикации результатов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 24 печатных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в том числе в 3-х статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4-х 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 по каждой из них, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста, в том числе содержит 62 рисунка, 6 таблиц, 18 формул. Список цитируемой литературы включает в себя 94 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен обзор горных машин, комплексов и оборудования открытых горных работ.

Представлены анализ и систематизация причин потоков отказов горных машин, интенсивность деградиционных процессов, протекающих в горных машинах. Как показал анализ опыта эксплуатации основной причиной отказа карьерных экскаваторов является повышенный износ ресурсопределяющих трибосопряжений трансмиссий. Своевременная и качественная смазка элементов трансмиссии горной машины снижает риски интенсификации естественных деградиционных процессов проведением профилактических мероприятий ТОиР горных машин.

При этом для карьерной техники прежде всего, необходима эффективная диагностика машин, горного оборудования и их элементов. Дефекты и повреждения необходимо обнаруживать задолго до перехода в предельное состояние, чтобы гарантировано планировать и в удобное для предприятия время осуществить корректирующие

действия (обслуживание) для продления безаварийной эксплуатации горного оборудования.

Применяемые в настоящее время в горной промышленности методы технической диагностики, с одной стороны, инерционны, а в ряде случаев, сложны и трудоемки. Недостаточно изучен вопрос изменения технического состояния ресурсопределяющих сопряжений элементов и узлов трансмиссий горных машин по интенсивности изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона от удельной нагрузки и скорости в контакте.

Во второй главе показано, что выбор соответствующего типа смазки системы ее осуществления для карьерного экскаватора во многом определяет его рабочее состояние. Автоматическая система смазки ресурсопределяющих элементов и сопряжений машин способна значительно сократить трудоемкость смазочно-заправочных работ. Инновационным решением в этом вопросе является решение задачи своевременной смазки сопряжения, по его состоянию, а не через наперед заданный интервал времени. Так, применение АЦСС (автоматическая централизованная система смазки) на экскаваторе с объёмом ковша 10-15 м³ в среднем: снижает продолжительность проведения регламентных работ по обслуживанию минимум на час; как следствие, позволяет увеличить время его рабочего состояния до 250 часов в год, что эквивалентно наработке последнего в $75 \cdot 10^3$ т.

Рассмотрен вопрос совершенствования эксплуатационного режима смазки в контакте ресурсопределяющих элементов трансмиссий карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К с целью продления срока службы их рабочих жидкостей путем оценки величины акустического сигнала в ультразвуковом диапазоне частот в паре трения для своевременной замены, либо утилизации отработанного трансмиссионного масла, при реализации технологии регламентных работ в рамках стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию.

Идея оценки заключается в том, что техническое состояние ресурсопределяющих элементов и узлов трансмиссий карьерных экскаваторов с достаточной для практики точностью определяется по интенсивности изменения параметра величины акустического сигнала ультразвукового диапазона в зависимости от удельной нагрузки в ковше для лебедки подъема экскаваторов ЭКГ-18Р/20К и скорости в контакте относительно соответствующей базовой величины, которая характеризует условия смазывания между элементами трансмиссии горной машины, в рамках реализации комбинирован-

ной стратегии ТОиР, основанной на системе *CM&R (Conscientious Maintenance and Repair)*.

Предложен модернизированный алгоритм оценки величины остаточного ресурса трансмиссий горных машин (рисунок 1).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований, позволившие выявить закономерности изменения величины акустического сигнала в ультразвуковом диапазоне частот от угловой скорости и давления во вращательной паре трения для ряда масел и смазок применительно к ресурсоопределяющим сопряжениям.

Для выявления закономерностей изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона от угловой скорости вращения применительно к ресурсоопределяющим сопряжениям трансмиссий горных машин создан стенд, посредством которого возможно физическое моделирование процессов в сопряжениях.

Изменения величины акустического сигнала внешнего трения в ультразвуковом диапазоне частот в паре трения ресурсоопределяющих сопряжений проводились анализатором ресурса подшипниковых узлов АРП-11. В процессе эксперимента замерялась величина показателя D , соответствующего величине акустического сигнала, формируемого в контакте. Показатель D интегрально оценивает три вида сигналов, составляющие которых фиксируются в ультразвуковом диапазоне частот: автоколебания, вызванные изменениями условий сопряжения твердых тел; эмиссионные сигналы, формируемые пластическим деформированием, структурно-фазовой перестройкой и разрушением поверхностей трения; поверхностные волны. Фиксируемый показатель D представляет собой математическое ожидание амплитуды акустического сигнала генерируемого в подвижном соединении при силовом взаимодействии его элементов с учетом качества и количества лубрикатора в соединении.

Фиксировались изменения показаний величины акустического сигнала трения, оцененной через показатель D , при возрастании дискретных значений угловых скоростей (в ходе эксперимента были определены 6 режимов угловой скорости) при постоянстве давления в паре трения (5 режимов оказываемого давления). Результаты эксперимента представлены на рисунках 2 (а) и 2 (б). Исследования проводились с использованием *Индустриального масла И-20* в качестве базового.

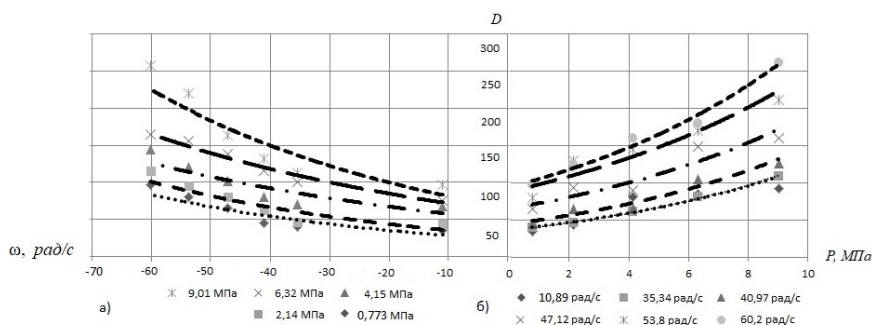


Рисунок 2 - Изменение величины показателя акустического сигнала в паре трения D для базового масла И-20 от угловой скорости (а) и давления (б) в паре трения

Функциональная зависимость изменения величины D от угловой скорости при $P = 6,32$ МПа описывается выражением $D = 39,32e^{0,03\omega}$ при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,92$, а соответствующее выражение при фиксированной угловой скорости в $47,12$ рад/с: $D = -0,15p^2 + 13,22p + 56,62$ при $R^2 = 0,9$.

Анализ полученных результатов показывает устойчивую тенденцию возрастания показателя акустико-эмиссионного сигнала трения при увеличении угловой скорости. При этом налицо зависимость увеличения акустико-эмиссионного показателя D при повышении давления в паре трения. Данное явление свидетельствует и подтверждает факт ухудшения условий трения в паре, тем самым указывая на выжимание смазки из контакта, и, как следствие, переход от жидкостного трения к сухому.

Далее в качестве искусственной среды функционирования были выбраны смазки: «ТМ-5-18», «Mobil ATF 3309», «NCS-ECF Let-lub», «Графитная ОлРайт», «РУС-1», «Индустриальное масло И-20» с протеканием процесса омеднения. Затем было принято решение провести эксперимент по наблюдению и зафиксировать показатели по выявлению зависимости акустического сигнала от изменения давления и угловой скорости в паре трения без смазки и уже после протекания процесса изнашивания. Давление в контакте изменялось от $0,8$ МПа до 9 МПа при угловой скорости вращения в пределах от 31 рад/с до 60 рад/с.

На рисунке 3 показано изменение величины акустического сигнала в ультразвуковом диапазоне частот, выраженном через показатель D , для различных угловых скоростей вращения

индентора при постоянных величинах давления во время протекания процесса трения в контактируемых ресурсопределяющих сопряжениях для рассматриваемых в диссертационной работе смазок. После проведения статистической обработки результаты были аппроксимированы экспоненциальной функцией. Коэффициенты детерминации составили $R^2 = 0,9-0,98$. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что увеличение угловой скорости влечет за собой степенное возрастание показателя D , и свидетельствует о переходе при малых угловых скоростях от режима жидкостного трения в режим полусухого или сухого трения при увеличении скорости, сопровождающийся кратным увеличением среднеквадратичного отклонения измеряемой величины D . Уровень давления в паре трения в значительной степени влияет на изменение характера трения и интенсивность деградационных процессов.

Получены зависимости изменения акустического сигнала D от удельной нагрузки с теми же маслами и консистентными смазками.

Аналогично предыдущим опытам были зафиксированы резкие изменения сигнала при переходе от границы жидкостного трения к полужидкостному и в конечном итоге к сухому трению, сопровождаемого кратным увеличением среднеквадратического отклонения показателя D .

На рисунке 4 представлены диаграммы изменения вида трения от давления и скорости в контактируемых ресурсопределяющих элементах трансмиссий горных машин с рассматриваемыми в эксперименте условиями. Прослеживается тенденция изменения величины и характера акустического сигнала ультразвукового диапазона частот в паре трения с увеличением давления и угловой скорости. Кроме того наблюдаются ярко выраженные переходы от одного вида трения в смазочной среде к другому.

Следует отметить, что при возрастании давления в контакте и увеличения угловой скорости в эксперименте с консистентными смазками смена границы трения более резкая, что подчеркивает важность адекватной оценки состояния работы трансмиссии горной машины и ее элементов, при высоких воспринимаемых технологических нагрузках.

При фиксации повышенного сигнала, а следовательно резкого перехода к сухому трению, необходимо срочно принимать меры в рамках технического обслуживания. Таким образом изменения акустического сигнала ультразвукового диапазона от давления в паре

трения и угловой скорости для масел и смазок имеют подобные тенденции, что подтверждено экспериментально.

В четвертой главе представлено предложение по совершенствованию мероприятий ТОиР трансмиссий горных машин, путем улучшения эксплуатационного режима смазки ресурсопределяющих элементов, что подразумевает развитие системы стационарного мониторинга с применением теротехнологий и процесса управления жизненным циклом карьерных экскаваторов типа ЭКГ-18Р/20К, которая сможет обеспечивать непрерывный контроль технического состояния основных узлов, исключая аварийный вывод объекта из технологического процесса.

Предложение по совершенствованию и развитию системы стационарного мониторинга с применением теротехнологий и процесса управления жизненным циклом карьерных экскаваторов типа ЭКГ-18Р/20К предполагает тестовые включения экскаватора при заданной нагрузке в процесс и контроль ресурсопределяющих узлов и элементов посредством акустического сигнала ультразвукового диапазона частот. Данный подход позволяет осуществлять и планировать регламентные работы по техническому обслуживанию горной техники и ее ремонту, на оценочных данных акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин, для выявления дефектов их ресурсопределяющих сопряжений.

Выбор типа лубриката подшипниковых узлов, имеет определяющее значение. Указанный подход позволяет автоматизировать процессы автоматической смазки по оценке величины акустического сигнала в ультразвуковом диапазоне частот в паре трения ресурсопределяющих элементов трансмиссии горной машины.

Предложения по совершенствованию мероприятий ТОиР горных машин внесены в карту управления бэклогами (рисунок 5), данные изменения позволяют осуществлять и планировать регламентные работы по техническому обслуживанию горной техники и ее ремонту, на оценочных данных акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин, для выявления дефектов их ресурсопределяющих сопряжений.

Таким образом, на основании применения метода контроля технического состояния посредством акустического сигнала ультразвукового диапазона частот в работе трибосопряжений трансмиссий предлагается совершенствовать эксплуатационный режим смазки карьерных экскаваторов типа ЭКГ-18Р/20К и автоматизировать систему подачи смазки в узлы трения. Разработано устройство для

оценки загрязненности жидкости трансмиссий, позволяющее совершенствовать эксплуатационный режим смазки карьерных экскаваторов типа ЭКГ-18Р/20К и автоматизировать систему подачи смазки в узлы трения (патент № 2739147).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой представлено новое научно-обоснованное технико-технологическое решение повышения работоспособности трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки, при ранней диагностике повреждений ресурсоопределяющих сопряжений элементов трансмиссий по изменению величины показателя акустического сигнала ультразвукового диапазона в рамках осуществления мероприятий технического обслуживания и ремонта горных машин.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основании анализа и обобщения теоретических и экспериментальных исследований установлено, что основной причиной отказа карьерных экскаваторов является повышенный износ ресурсоопределяющих трибосопряжений трансмиссий. Показано, что своевременная и качественная смазка, осуществляемая в рамках ТОиР, элементов трансмиссии горной машины снижает риски деградиационных процессов.

2. На основе анализа существующих систем и режимов смазки рабочих поверхностей элементов ресурсоопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин разработан и теоретически обоснован способ обеспечения работоспособности ресурсоопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин формированием искусственных сред функционирования и реновации лубриката на основании оценки изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона в парах трения.

3. Проведены лабораторные исследования процессов трения элементов трансмиссии горной машины. Выявлено, что в рамках стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию возможно осуществлять и планировать регламентные работы по техническому обслуживанию горной техники и ее ремонту, на основе оценочных данных акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин, для выявления дефектов их ресурсоопределяющих сопряжений по относительному изменению величины показателя акустического

сигнала D и кратного увеличения среднеквадратичного отклонения его текущего значения в заданных нагрузочных режимах.

4. Экспериментально установлено, что интенсивность протекания трибологических процессов, оцениваемых показателем D , при увеличении скорости скольжения для базового трансмиссионного масла описывается экспоненциальной функцией и при изменении давления квадратичной функцией, вместе с тем применение смазочных масел с соответствующими присадками и модификаторами трения с учетом вязкости позволяют обеспечивать нормальную работу сопряжений, снизив значение акустического сигнала D ультразвукового диапазона частот в 3-5 раз по сравнению с базовым маслом. Что касается консистентных смазок, то функции изменения показателя D возможно описывать экспоненциальной функцией при детерминированном изменении скорости скольжения и квадратичной функцией – для изменяемого давления в соединении. Коэффициенты детерминации составили $R^2 = 0,9-0,98$.

5. Разработан алгоритм оценки технического состояния ресурсоопределяющих элементов трансмиссий горных машин по интенсивности изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона от удельной нагрузки и скорости в контакте относительно соответствующей базовой величины, характеризующих условия их смазывания, корректировки уровня смазки по изменению относительной величины D в сравнении с исходным его значением и учетом изменения величины среднего квадратичного отклонения при заданных условиях нагружения, реализуемый в скорректированной структуре ремонтного цикла. Предложена карта управления бэклогами в рамках разработанного алгоритма для структуры ремонтного цикла.

6. Предложено новое научно-обоснованное техническое решение, направленное на повышение работоспособности трансмиссий горных машин путем корректировки эксплуатационного режима смазки, осуществляя раннюю диагностику повреждений ресурсоопределяющих сопряжений и своевременной реновации лубрикатора на основании оценки состояния элементов трансмиссий в рамках осуществления технологий по техническому обслуживанию и ремонту горных машин, (патент РФ № 2739147 «Устройство для оценки загрязненности жидкости трансмиссий»).

7. Результаты исследований использованы ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова», г. Санкт-Петербург на стадии разработки эксплуатационной и ремонтной документации, в частности «Руководство по эксплуатации карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К»;

«Регламент технического обслуживания и ремонтов карьерных экскаваторов ЭКГ-18Р/20К».

Развитие системы технического обслуживания по фактическому состоянию горных машин с мониторингом ресурсоопределяющих элементов по величине уровня сигнала ультразвукового диапазона частот является перспективным направлением в развитии теротехнологий горного оборудования и позволяет снизить затраты на его техническое обслуживание с одновременным повышением эффективности последнего.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Пумпур, Е.В. Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов / Е.В. Пумпур, **В.И. Князькина**, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2019. - №12 (специальный выпуск 41). – С. 3-16.

2. Сафрончук, К.А. Оценка параметров механизма масляного насоса с зубчато-эксцентриковым преобразователем движения / К.А. Сафрончук, **В.И. Князькина**, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №10 (специальный выпуск 33). – С. 3 – 11. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-33-3-11

3. **Князькина В.И.** К вопросу оценки технического состояния и качества обслуживания трансмиссии горной машины по параметрам акустического сигнала с учетом смазки его элементов / **В.И. Князькина**, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов, А.А. Мякотных // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2021. - №2 (специальный выпуск 2). – С. 3-15.

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

4. **Knyazkina, V.I.** About possibility of immediate evaluation of technical condition of mining equipment using signal value of acoustic emission friction / **V.I. Knyazkina**, K.A. Safronchuk, S.L. Ivanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Volume № 560. – pp. 1-4.

5. 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. – 2019. – Volume № 560. – pp. 1-5.

6. **Knyazkina, V.I.** Assessment of the state of a lubricator by the size of the acoustic signal in a loaded pair of friction of a mining machine transmission /

V.I. Knyazkina, K.A. Safronchuk, S.L. Ivanov, E.V. Pumpur // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume № 1515. – pp. 1-5.

7. Shibarov, D.A. Adapting standard maintenance approaches for mining excavators to actual operating condition / D.A. Shibarov, S.L. Ivanov, K.A. Safronchuk, **V.I. Knyazkina** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Volume № 966. – pp. 1-6.

Публикации в прочих изданиях:

8. **Князькина, В.И.** О возможности оперативной оценки технологического состояния горно-шахтного оборудования по величине акустико-эмиссионного сигнала трения / **В.И. Князькина**, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов // Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика – 2018; Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования и нефтепромыслового оборудования». – 2018. – Т. 1. – С. 39-43.

9. **Князькина, В.И.** Изменения акустико-эмиссионного сигнала трения при выборе трансмиссионного масла для повышения износостойкости элементов трансмиссий горных машин / **В.И. Князькина**, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов // Сборник научных трудов 14-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». – 2018. – Т. 1. – С. 167-171.

10. **Князькина, В.И.** Систематизация причин отказов карьерных экскаваторов и повышение долговечности ресурсопределяющих элементов их трансмиссий организацией системы смазки / **В.И. Князькина**, С.Л. Иванов // Сборник научных трудов XVII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». – 2019. – С. 400-403.

11. **Князькина, В.И.** Изменение акустического сигнала трения при выборе типа масла для трансмиссии горной машины // Сборник тезисов Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019». – 2019. – С. 258 – 261.

12. **Князькина, В.И.**, Иванов С.Л. Диагностика и продление срока службы трансмиссий карьерных экскаваторов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки 2019. – Т. 25. – № 2. С. 141–148. DOI: 10.18721/JEST.25211

13. **Князькина, В.И.** К вопросу оценки технического состояния подшипниковых узлов и совершенствования эксплуатационных режимов систем смазки горно-шахтного оборудования / **В.И. Князькина**, К.А. Сафрон-

чук, С.Л. Иванов // Сборник научных трудов VI Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика – 2019; Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования и нефтепромыслового оборудования». – 2019. – Т. 1. – С. 76-81.

14. **Князькина, В.И.** О способе оценки технического состояния и модернизации эксплуатационных режимов смазки горно-шахтного оборудования / **В.И. Князькина**, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов // Сборник научных трудов XVIII Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых». – 2019. – Т. 1. – С. 392-394.

15. **Князькина, В.И.** Исследование совместного воздействия скорости давления на изменение величины акустико-эмиссионного сигнала трения в подвижном контакте / **В.И. Князькина**, С.Л. Иванов, В.А. Романов // Masters Journal. – 2019. – № 1. – С. 81-86.

16. **Князькина, В.И.** Повышение надежности горных машин совершенствованием смазки элементов трансмиссии при ее техническом обслуживании / **В.И. Князькина**, К.А. Сафрончук, С.Л. Иванов // Сборник научных трудов XVIII Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». – 2020. – С. 297-300.

17. Мякотных, А.А. Экспериментальная оценка загрязнения рабочей жидкости трансмиссии на изменение акустического сигнала насоса при его работе / А.А. Мякотных, **В.И. Князькина**, Д.А. Шибанов // Сборник научных трудов XIX Всероссийской конференции «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых». – 2020. – Т. 1. С. 369-375.

18. **Князькина, В.И.** К вопросу выбора системы технического обслуживания горных машин / **В.И. Князькина**, С.Л. Иванов, А.А. Мякотных, К.А. Сафрончук // Сборник научных трудов XIX Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности». – 2021. – С. 346-349.

Патент:

19. Патент № 2739147 Российская Федерация, МПК G01N 29/02 (2006.01). Устройство для оценки загрязненности жидкости трансмиссий: № 2739147: заявл.05.06.2020, опубл.21.12.2020 / Иванов С.Л., Мякотных А.А., Сафрончук К.А., **Князькина В.И.**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. Бюл. №36 – 7 с.: ил.

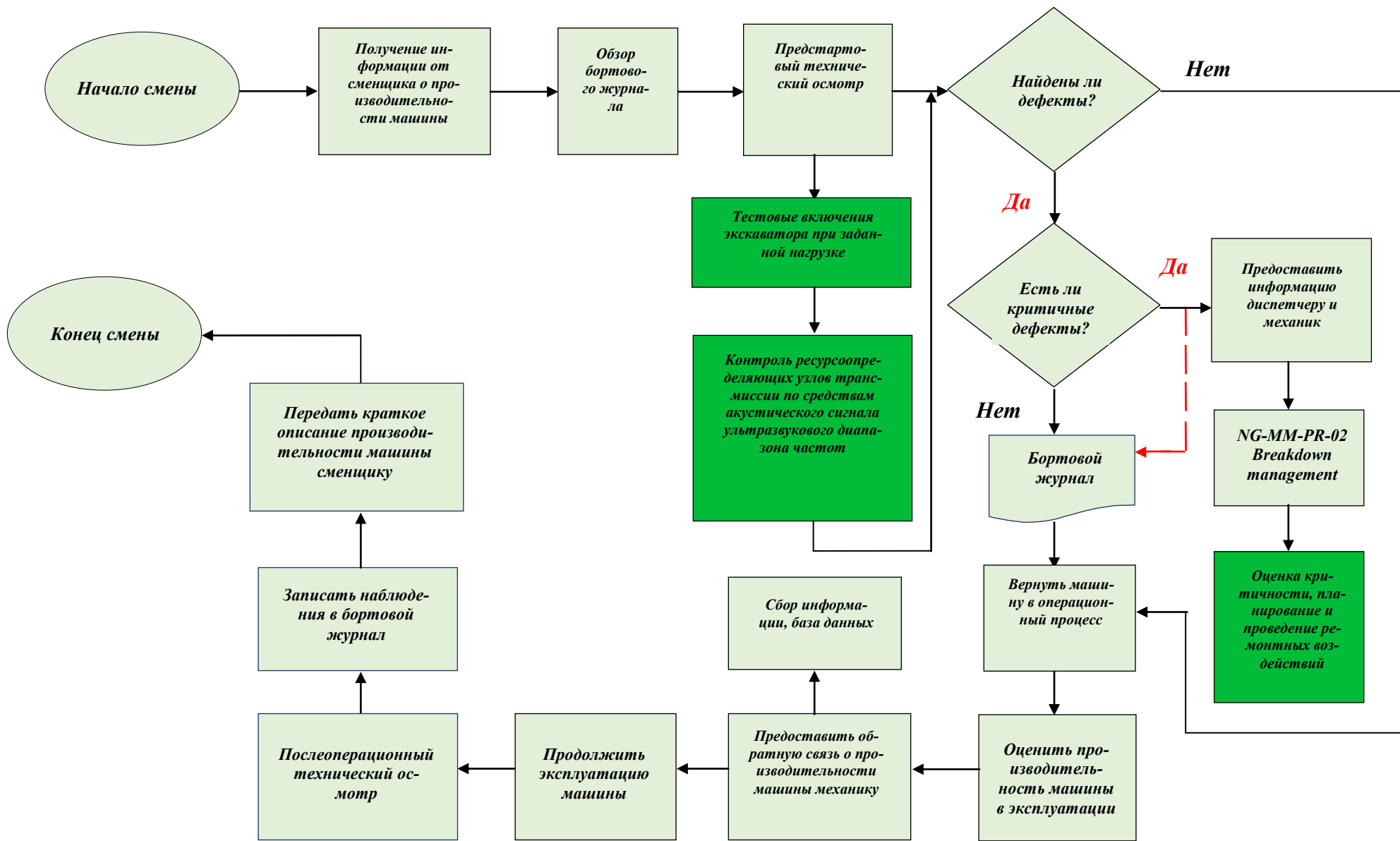
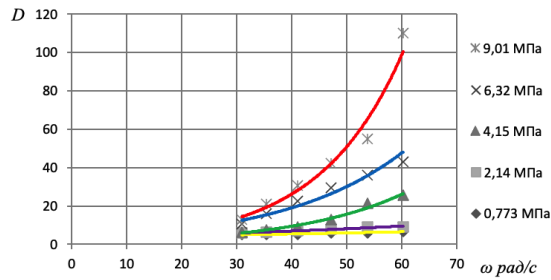
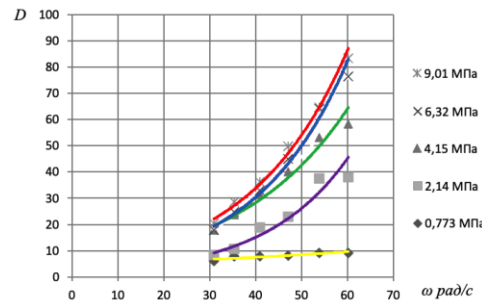


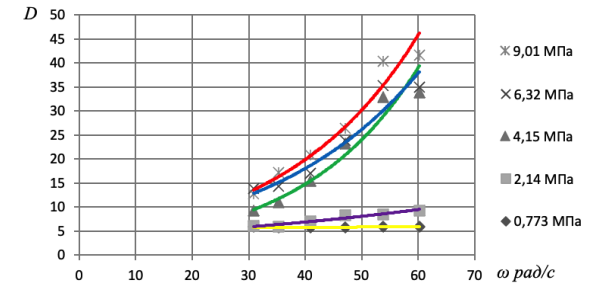
Рисунок 1 – Алгоритм ежемесячного технического осмотра карьерного экскаватора ЭКГ-18Р/20К



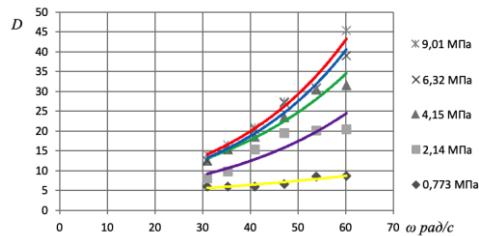
Смазка «ТМ-5-18» - акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения



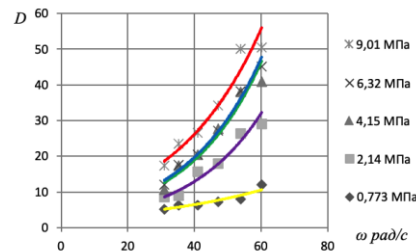
Смазка «Mobil ATF 3309» - акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения



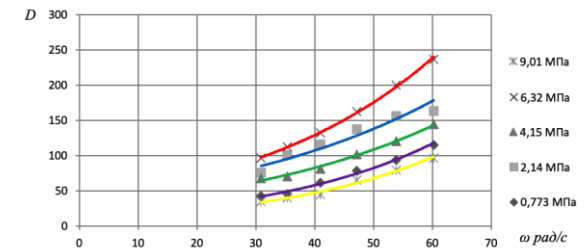
Смазка «NCS-ECF Let-lub» - акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения



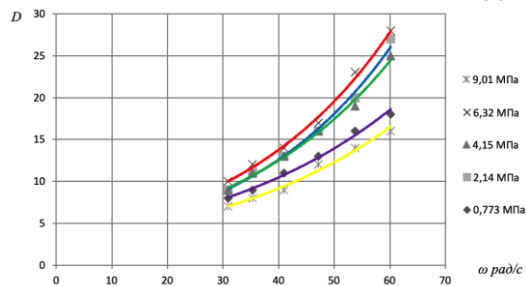
Смазка «Графитная ОлРайт» - акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения



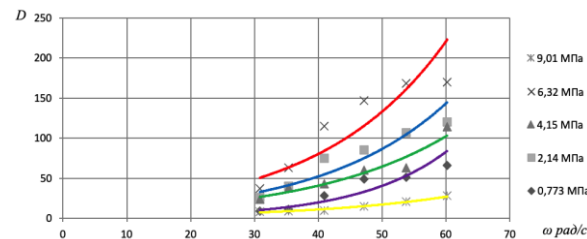
Смазка «PUC-1» - акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения



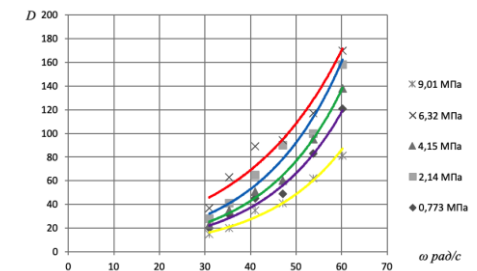
Смазка «Индустриальное масло И-20» - акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения



Смазка «Индустриальное масло И-20» протеканием процесса омеднения – акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения

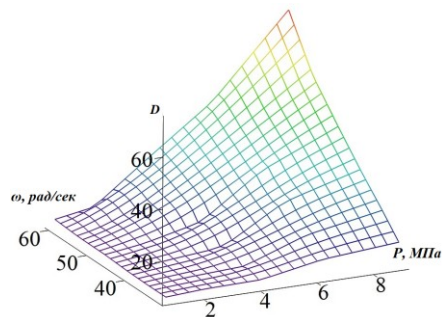


Акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения без смазки

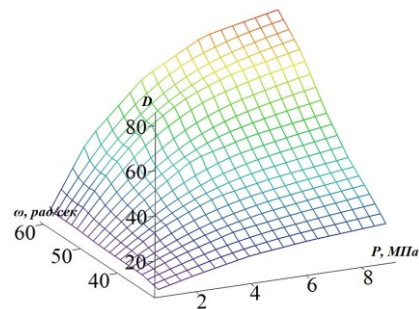


Акустический сигнал от изменения угловой скорости в паре трения после процесса износа

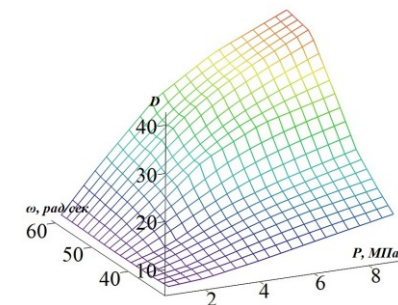
Рисунок 3 - Изменение величины акустического сигнала в зависимости от скорости во время протекания процесса трения в контактируемых ресурсопределяющих элементах трансмиссий



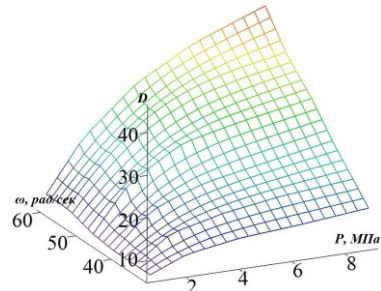
Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «ТМ-5-18»



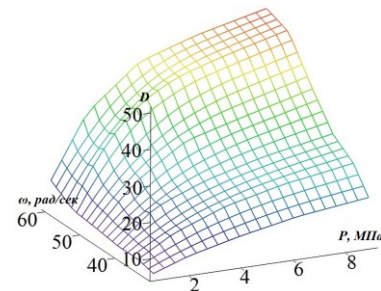
Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «Mobil ATF 3309»



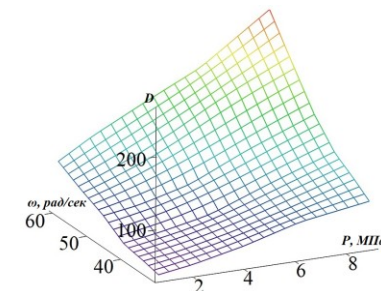
Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «NCS-ECF Let-lub»



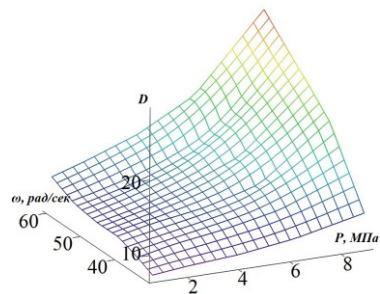
Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «Графитная ОлРайт»



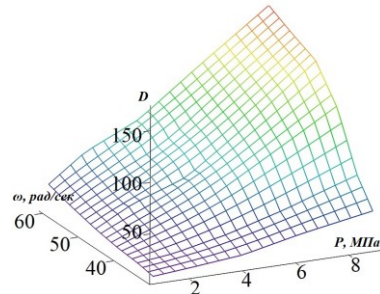
Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «РУС-1»



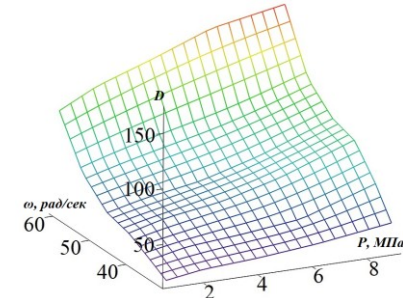
Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «Индустриальное масло И-20»



Изменения вида трения от давления и скорости в контакте со смазкой «Индустриальное масло И-20» с протеканием процесса омеднения



Изменения вида трения от давления и скорости в контакте без смазки



Изменения вида трения от давления и скорости в контакте после процесса износа

Рисунок 4 – Изменения вида трения от давления и скорости в контактируемых ресурсопределяющих элементах трансмиссий

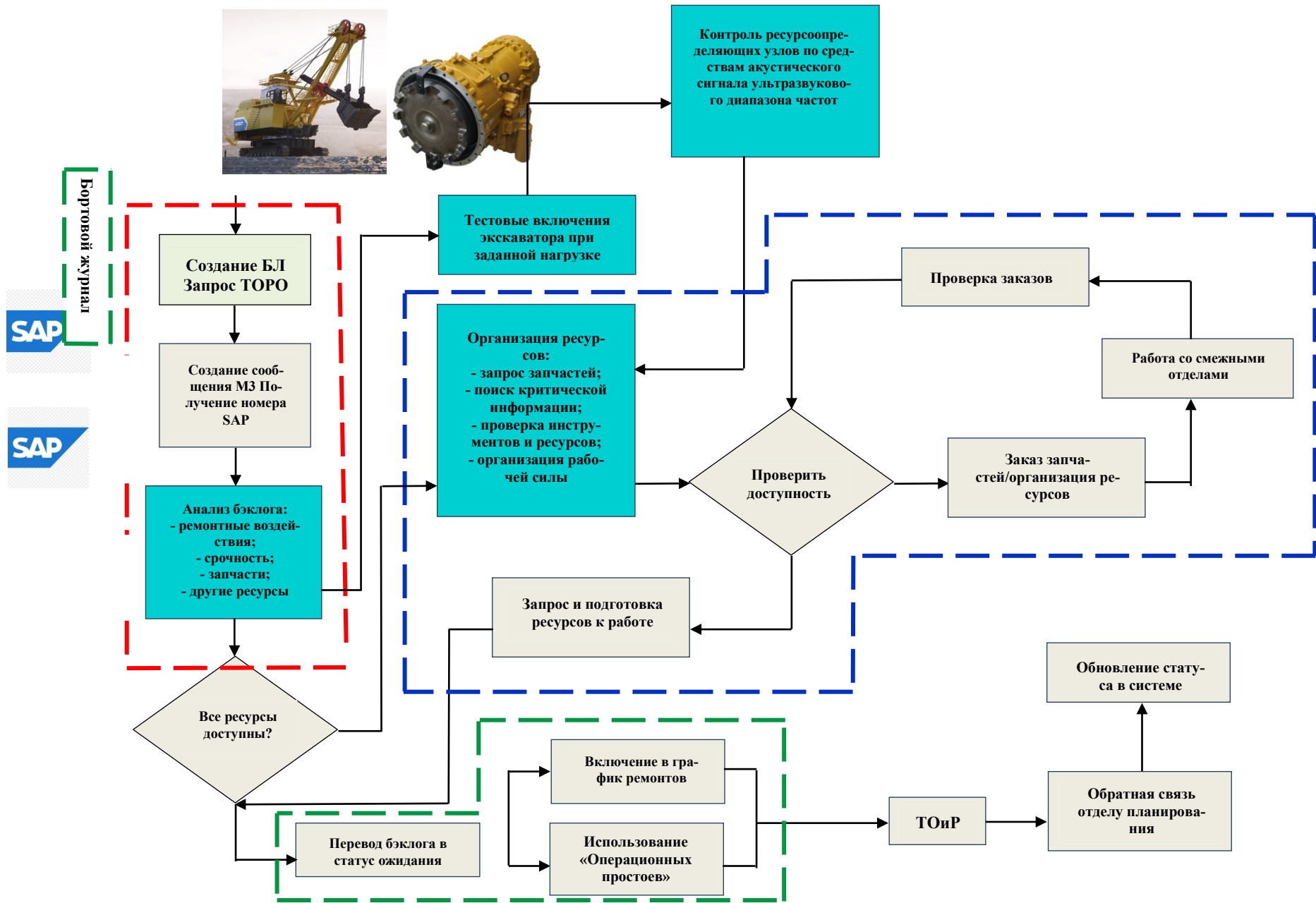


Рисунок 5 – Карта управления бэклогами