

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Брянский государственный технический университет»

На правах рукописи

 11

Ващишина Анна Павловна

 /

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГРЕБНЯ БАНДАЖА КОЛЕСА
ЛОКОМОТИВА УЛУЧШЕНИЕМ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА**

Специальность: 2.5.3 –Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Шалыгин Михаил Геннадьевич

Брянск 2024

Оглавление

Введение.....	5
ГЛАВА 1. ТРИБОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛЕСО-РЕЛЬС	10
1.1 Контактное взаимодействие колеса с рельсом. Модели изнашивания боковой поверхности гребня колеса.	10
1.2 Смазочные материалы фрикционного контакта	27
1.2.1 Типы смазочных материалов	27
1.2.2 Смазочные материалы системы гребень-рельс и их свойства	35
1.2.3 Влияние присадок на триботехнические свойства смазочных материалов	44
1.3 Устройства смазывания гребня колеса локомотива	47
Постановка целей и задач исследования.....	50
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	51
2.1 Объект исследований.....	51
2.2 Методика проведения теоретических исследований	58
2.3 Методика проведения экспериментальных исследований	63
2.3.1 Характеристики узла трения	63
2.3.2 Приборы и оборудование для определения свойств материалов	65
Выводы к главе 2.....	75
Глава 3. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УЗЛА ТРЕНИЯ ГРЕБЕНЬ-РЕЛЬС.....	76
3.1 Моделирование процесса изнашивания гребня колеса локомотива	76
3.2 Прогнозирование величины износа гребня бандажа локомотива	88
3.2 Регрессионный анализ факторов, определяющих износостойкость гребня колеса локомотива.....	91
Выводы к главе 3.....	98
ГЛАВА 4. АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРИСАДОК И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ГРЕБНЯ КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА	99
4.1 Фрикционные свойства смазочного материала Пума с присадками	99
4.1 Износостойкость гребня колеса локомотива при использовании присадок к смазочному материалу.....	99
4.2 Водородное изнашивание гребня колеса локомотива.....	104
4.3 Свойства смазочного материала гребня при использовании присадок	107

4.3.1 Реологические свойства смазочного материала	107
4.3.2 Концентрация металлов в смазочном материале.....	109
4.3.3 Фрикционные свойства пары трения гребень колеса локомотива - рельс при использовании смазочного материала с присадками.....	113
4.4 Физико-механические свойства пары трения гребень колеса локомотива - рельс при использовании антифрикционных присадок.....	118
4.4.1 Статические и химические свойства поверхностного слоя гребня колеса локомотива	118
4.4.3 Неровности поверхности гребня колеса локомотива.....	122
Выводы к главе 4.....	123
ГЛАВА 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	
5.1 Совершенствование системы гребнесмазывателя.....	124
5.2 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследований	125
Выводы к главе 5.....	130
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	134
Приложения	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. На данный момент в ОАО «РЖД» в эксплуатации находится более 20 тыс. локомотивов. Условия эксплуатации локомотивов ведет к интенсивному износу пары трения гребень бандажа колеса локомотива— рельс, что приводит к частым ремонтным работам и обточкам колес, следовательно, к значительному увеличению расходов. Согласно нормативам, принятым в ОАО «РЖД», плановая обточка гребня должна проводиться через 100 тыс.км, тогда как на практике, по причине интенсивного изнашивания гребня уже через 30 тыс.км. Локомотив имеет 4-8 колесных пар, перебандажировка одной пары в среднем по стоимости составляет 25 тыс. рублей. При повышении износостойкости гребня бандажа на 10%, экономический эффект от уменьшения количества перебандажировок составит более 10 млн. рублей в год. Планирование ремонтно-восстановительных работ и работ по замене узлов позволяет грамотно распределить ресурсы и получить значительный экономический эффект за годы эксплуатации локомотива. Помимо этого, знания о ресурсе позволяет избежать непредвиденных аварийных ситуаций и сходов с пути подвижного состава. Одним из узлов, который обеспечивает приведенные выше условия, является бандаж колеса локомотива. Интенсивность стирания гребней колесных пар локомотивов почти в два раза больше, чем интенсивность стирания бандажей, поэтому интенсивность стирания гребней определяет межремонтный период бандажей колесных пар. При начальной толщине гребня 29 мм удельный его износ составляет 0,58 мм на 10 тыс. км пробега. Межремонтный пробег для левой и правой колесной пары локомотива различен и определяется радиусом и направлением криволинейных участков, скоростью изнашивания и состоянием пути. На процесс изнашивания в основном влияют неизбежное круговое скольжение прижатого гребня колеса по боковой грани головки рельса при двухточечном их контактировании, а также продольное скольжение колеса по рельсу из-за разной длины наружной и внутренней рельсовых нитей в кривой. При этом влияние на срок службы триботехнической системы гребень бандажа колеса локомотива — рельс

оказывает слой смазочного материала между рабочими поверхностями. Наличие смазочной пленки на поверхности гребня уменьшает износ поверхности, однако этого оказывается недостаточно. Имеющиеся присадки для увеличения износостойкости не обеспечивают достаточной защиты пар трения от износа, поэтому в настоящее время продолжают исследования в данной области. В этой связи исследование присадок к смазочному материалу, повышающих износостойкость гребня бандажа колеса локомотива, является актуальным.

Целью диссертационной работы является повышение износостойкости гребня бандажа колеса локомотива подбором присадок к смазочному материалу с улучшенными антифрикционными свойствами.

В соответствии с поставленной целью было необходимо решить ряд научно-технических задач, а именно:

1. Провести анализ работы трибосистемы гребень бандажа колеса локомотива –рельс.
2. Исследовать присадки к смазочному материалу на предмет их влияния на процесс изнашивания.
3. Изучить влияние смазочного материала с присадками на структуру и свойства материалов пары трения гребень бандажа колеса локомотива –рельс.
4. Разработать модель изнашивания гребня бандажа колеса локомотива на основе физико-механических свойств поверхностей трения и свойств смазочного материала.
5. Адаптировать разработанную физико-математическую модель для определения времени эксплуатации бандажа локомотива с определением критического износа гребня.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является трибосистема гребень-рельс, предметом – смазочный материал с присадками и способ смазки.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлено, что введение сульфорганического соединения в качестве присадки в концентрации 0,1 % повышает износостойкость пары трения

гребень колеса локомотива–рельс в 1,5 раза.

Соответствует п.8 паспорта специальности 2.5.3. «Трение и износ в машинах»

2. Разработана модель изнашивания гребня бандажа колеса локомотива с учетом свойств смазочного материала с присадками и физико-механических свойств поверхностей трения, таких как вязкость, интенсивность выделения водорода, ударная вязкость, напряжение сдвига, коэффициент трения, давление, на основании которой предложено выражение для определения скорости изнашивания гребня бандажа колеса локомотива.

Соответствует п.10 паспорта специальности 2.5.3. «Трение и износ в машинах»

3. Экспериментально установлено, что в диапазоне температур смазочного материала гребня коэффициенты трения смазочного материала с присадками при максимальной температуре 260°С имеют значения: сульфосоединение 0,217, фосфорорганическое соединение - 0,160, гидрохинон - 0,102.

Соответствует п.8 паспорта специальности 2.5.3. «Трение и износ в машинах»

Практическая значимость:

1. Разработан испытательный стенд, позволяющий проводить испытания на износ с параллельным определением выделения диффузионно-активного водорода при полужидкостном трении.

2. Расчетный экономический эффект от использования смазочного материала с присадкой сульфорганического соединения составил 1 млн. рублей в год для одного локомотиворемонтного депо.

3. Доработана конструкция системы смазывания гребня бандажа колеса локомотива, заключающаяся в оснащении конструкции бака смазочной системы добавлением отсека с катализатором.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты теоретических и эмпирических исследований смазочного материала с присадками.

2. Модель изнашивания гребня бандажа колеса локомотива с учетом

физико-механических свойств поверхностей трения и свойств смазочного материала с присадками. Выражение скорости изнашивания гребня бандажа.

3. Вязкостно-температурные характеристики и коэффициенты трения исследованных присадок в диапазоне температур до 260°C.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанной модели скорости изнашивания, которая позволяет прогнозировать время до износа гребня колеса локомотива исходя из результатов лабораторных экспериментов.

Личный вклад автора состоит в выполнении обзора состояния вопроса, в определении цели и задачи работы, в проведении экспериментальных исследований, в обобщении их результатов; в формулировании выводов, в подготовке совместно с научным руководителем результатов для публикации научных статей и тезисов докладов, участии в постановке задач, в разработке алгоритмов и программ, в проведении численных расчетов и анализе результатов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с пунктами 8, 10 паспорта специальностей научных работников по специальности 2.5.3 – «Трение и износ в машинах».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на международных научно-технических конференциях, в региональных научно-практических конференциях молодых исследователей и специалистов, XXXIII Международной инновационной конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021, 2023), на XIV-ой Международной научно-технической конференции "Трибология - машиностроению 2022, посвященной 100-летию д.т.н., проф. Семенова А. П.", на XIV международной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли», 7-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, а так же были рассмотрены и

одобрены на расширенном заседании кафедр «Трубопроводные транспортные системы» и «Подвижной состав железных дорог» ФГБОУ ВО Брянского государственного технического университета, на заседании научно-технического совета отдела «Трение, износ, смазка. Трибология» ИМАШ РАН.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 20 таблиц, 68 рисунков и список литературы, включающий 212 наименований.

Первая глава содержит аналитический обзор по теме исследований и включает в себя описание пары трения гребень колеса-рельс, свойства и процесс изготовления смазочного материала с присадками, обоснование выбора исследуемых присадок, проанализированы способы повышения износостойкости и модели износа гребня колеса. Результаты анализа имеющейся актуальной информации позволили сформулировать цель и задачи исследования.

Во второй главе содержится методическое обеспечение проведения экспериментальных исследований смазочного материала и материала гребня колеса локомотива, описание установок и условия проведения эксперимента. Теоретическими основами исследования являлись теории граничного трения, водородного и механического изнашивания, корреляционное исследование, теории адгезии и радикалов. Исходными данными для расчета являлись: значение износа поверхностей пары трения (износ гребня и суммарный износ); масса изношенных частиц; интенсивность выделения водорода; графики зависимости износа гребня колеса локомотива от пути трения; вязкость смазочного материала с присадками и графики зависимости динамической вязкости от температуры испытаний; коэффициент трения смазочного материала с присадками; графики зависимости коэффициента трения от вязкости смазочного материала; площадь контакта поверхностей трения. Выходными параметрами в результате расчета являлись: графики зависимости скорости изнашивания от используемой присадки к смазочному материалу,

зависимость скорости изнашивания от интенсивности образования диффузионно-активного водорода и динамической вязкости смазочного материала с исследуемыми присадками.

Глава 3 посвящена теоретическому исследованию процессов, происходящих в зоне трения гребень-рельс. Разработана модель изнашивания гребня колеса локомотива и методика прогнозирования межремонтного пробега локомотива. Представлены обобщения и практические рекомендации. Выполнен регрессионный анализ результатов исследования изнашивания гребня колеса локомотива с различными присадками и эксплуатационными свойствами пары трения.

Глава 4 содержит практическое обоснование использования смазочного материала Пума с выбранными присадками: результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик пластичных смазочных материалов с учетом их состава, температуры и давления.

В пятой главе приводится расчет экономического эффекта от внедрения сульфоорганической присадки для смазочного материала гребня колеса локомотива. Приведено описание доработки гребнесмазывателя, установленного на колесной паре локомотива, заключающееся в доработке системы смазывания форсунками с жидким маслом. Был установлен дополнительный бак с катализатором для взаимодействия смазочного материала и присадки, что позволяет повысить равномерность распыления смазочного материала на поверхность гребня. Рассчитан годовой экономический эффект от внедрения сульфоорганической присадки к смазочному материалу в расчете на одно локомотиворемонтное депо.

ГЛАВА 1. ТРИБОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОЛЕСО-РЕЛЬС

1.1 Контактное взаимодействие колеса с рельсом. Модели изнашивания боковой поверхности гребня колеса.

Контакт колеса с рельсом представляет собой типичную открытую систему, в которой окружающая среда постоянно меняется. Трибология контакта колеса с рельсом имеет большое научное и промышленное значение из соображений безопасности и экономии. В последнее время на железных дорогах России обострилась проблема износа колес подвижного состава, что является актуальной проблемой на данный момент [117, 7]. Существует множество способов защиты колесной пары от износа: смазывание поверхности гребня или рельсосмазывание. Процесс плазменного упрочнения поверхности колес в процессе изготовления, а также оптимизация технологии обточки колесных пар и механическая обработка головки рельса представляют собой важные аспекты в железнодорожной индустрии. Применение вышеперечисленных методов позволяет уменьшить износ примерно в 5 раз и данные методы используются до сих пор.

Открытые системы, такие как контакт колеса с рельсом или контакт колодки с колесом в железнодорожных транспортных средствах, подвержены воздействию грязи, частиц и естественных смазочных материалов, таких как высокая влажность, дождь и листва. Открытые системы также излучают такие излучения, как звук и частицы в воздухе, от продуктов износа без экранирования. Тепло передается от контакта к окружающему воздуху [210]. Различия в топографии поверхности, твердости и пластической деформации взаимодействующих поверхностей приводят к тому, что они имеют разные характеристики трения и износа. Эти параметры часто задаются во время производственных процессов и зависят от выбора материала для поверхностей и сыпучего материала. Применяемая смазка, а также загрязнения также влияют на процессы трения и износа. Загрязнения, попадающие в контакт, могут быть в виде взвешенных в воздухе частицы или частицы, содержащиеся в смазке.

Взаимодействующие поверхности также издают звук, создаваемый процессами трения и переносимыми по воздуху или смазке частицами износа. В процессах трения между контактирующими телами также выделяется тепло, влияющее на свойства контактирующих поверхностей; мягкая сталь, например, подвергается термическому размягчению при температуре около 180°C и испытывает переход к хрупкости при температуре около -15°C .

Существует два типичных типа контакта между колесом и рельсом - контакт между колесной колеей и головкой рельса (рис.1.1), который обычно происходит на прямом пути, и контакт между гребнем колеса и рельсовой колеей, который обычно наблюдается на крутых поворотах .

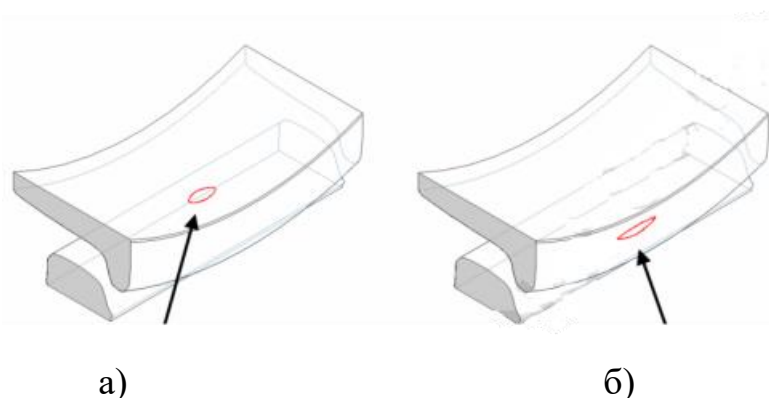


Рисунок – 1.1 Типы контакта между колесом и рельсом: 1 – контакт между колесной колеей и головкой рельса; 2 – контакт между гребнем колеса и рельсовой колеей

Большее скольжение в зоне контакта обычно происходит при контакте гребня колеса с рельсовой колеей, а также более высокое контактное давление, сопровождающееся большей пластической деформацией контактирующих тел. Этот контакт обычно смазывают на крутых поворотах, чтобы уменьшить часто катастрофическую скорость износа. Разница в скорости износа между этими двумя контактами может быть чрезвычайно высокой. Переход от умеренного (приемлемого) износа к сильному/катастрофическому износу может произойти при переходе от движения по прямой к путям с узким изгибом. На трибологию контакта колесо-рельс влияют как физика, так и химия. К физическим элементам относятся шероховатость поверхности (которая влияет на механику контакта) и свойства материалов. Контакт колеса с рельсом представляет собой контакт

качения и скольжения с высокой нагрузкой, и сыпучие материалы должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать контактные силы, создаваемые нагрузками вагона и его груза, а также динамическую реакцию на неровности пути и колес. Только крошечная зона контакта (примерно 1 см^2) [23] между каждым колесом и рельсом поддерживает эти силы. Эта контактная зона постоянно меняет свое положение в зависимости от того, как колесо встречается с рельсом. Следовательно, напряжения в контакте колеса с рельсом иногда превышают предел текучести сыпучих материалов, что приводит к упругой и пластической деформации в локальной зоне контакта [24].

Износ колеса и рельсов обусловлен тем, что при входе в криволинейный участок железнодорожного пути тележки происходит силовое воздействие (удар) между гребнем и рельсом. Многие факторы, такие как - сужение колеи, возвышение рельса в кривых участках, использование других материалов при изготовлении рельсов и шпал и многие другие – оказывают еще большее влияние на интенсивность изнашивания колесной пары. Согласно проведенному анализу литературных источников [143, 162, 144, 22, 23, 24, 46, 47, 80] значительное влияние на износ колесных пар оказывает процесс изнашивания гребня колеса. На рис. 1.2 представлена диаграмма, отражающая характер ремонтных работ по причинам возникновения отказов колесных пар в сети железных дорог России.



Рисунок –1.2 Структура обточек колесных пар в сети железных дорог России

Возникает необходимость разработки новых технических стратегий для оптимизации взаимодействия между компонентами пары трения колесо-рельс на основе всестороннего анализа результатов научных исследований как в России, так и за рубежом. Триботехническая система колесо-рельс представляет собой комплексную систему, базирующуюся на двух антагонистических принципах, регулирующих взаимодействие между поверхностями колес и рельсов. Первый принцип - это принцип трения и износа, который подразумевает постепенное разрушение и изнашивание поверхностей контакта из-за механического воздействия и нагрузок. Этот принцип связан с явлениями трения, износа и механического разрушения материалов, которые проявляются в процессе движения и контакта между колесами и рельсами. Вторым принципом - это принцип смазки и снижения трения, который направлен на уменьшение трения и износа путем обеспечения смазки между поверхностями контакта. Этот принцип включает в себя использование различных смазочных материалов и систем, таких как смазки, масла и твердые смазки, с целью снижения коэффициента трения и износа поверхностей. Работы исследователей [8, 47] показали, что после прохода первого колеса размол песка практически завершается, поверхность песка демонстрирует увеличение площади в 4-5 раз, приобретая адсорбционную активность, что приводит к интенсивному поглощению смазки и влаги в ее пористой структуре. При наличии песка смазывающие пленки выполняют разделительные функции и не защищают поверхности от износа.

Сцепление колеса с рельсом относится к касательной силе, действующей между колесами и рельсом, и описывает предельное трение. Однако значение сцепления в исследовательском сообществе колесных рельсов следует отличать от его традиционного трибологического значения. В трибологии «адгезия» определяется как конечная нормальная сила, необходимая для разрыва двух твердых поверхностей. Адгезия способствует трению и износу. Поверхности состоят из нескольких зон, обладающих физико-химическими свойствами, отличными от свойств объема (рис. 1.3).

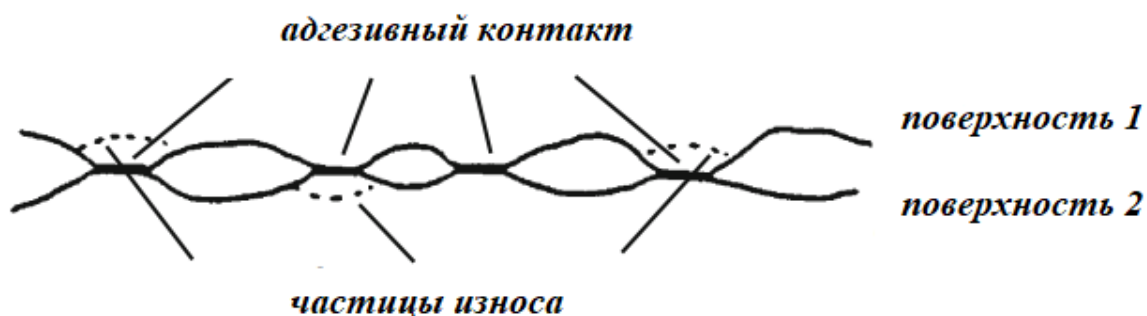


Рисунок – 1.3. Фрикционный адгезивный контакт

Фрикционные адгезивные контакты могут приводить к значительным микроструктурным изменениям в приповерхностных областях. В случае контактов металл-металл собственные оксиды могут стираться в течение начального периода приработки, что приводит к нежелательному контакту металл-металл.

Олофссон и др. в своем исследовании [193] предоставляют подробную информацию о сцеплении колеса с рельсом и его связи с трением. В работе описывается сцепление, а именно, как только сила сцепления совпадет с коэффициентом трения в контакте колесо-рельс, весь контакт находится в чистом состоянии скольжения, так что колеса прокручиваются на пути, и поезд останавливается. При эксплуатации железных дорог желателен коэффициент трения ни слишком высокий, ни слишком низкий.

На рис. 1.4 показаны общие уровни коэффициента трения в контакте колеса с рельсом. Низкое значение коэффициента трения приводит к плохому сцеплению во время движения поезда и торможения, что приводит к нарушению графика и увеличению тормозного пути. С другой стороны, слишком высокое значение приводит к быстрому повреждению поверхности, визгу и большому выбросу твердых частиц. Из-за тесной взаимосвязи между сцеплением колеса с рельсом и трением они оба обсуждаются в контексте открытой системы [182, 188, 189, 165].

Изменение коэффициента трения зависит от погодных условий, времени года, загрязнений, наличия воды в зоне трения. Частицы износа, которые в



Рисунок – 1.4 Уровни коэффициента трения в контакте колеса с рельсом

основном представляют собой оксиды железа, не влияют на коэффициент трения сами по себе, но усиливают воздействие масел и воды при смешивании с ними.

Данные исследования не учитывали температуру и влажность и их влияние на сцепление колеса с рельсом. Различные виды загрязнений (естественные и искусственные), находящихся в месте контакта колеса с рельсом влияют на сцепление. Вода является наиболее распространенным природным загрязнителем. Огромное количество экспериментов показало, что вода снижает трение в контакте колесо-рельс, хотя это уменьшение происходит в разной степени [169, 211, 212]. Разница в уменьшении связана с различиями в испытательных приборах, материалах колеса/рельса и шероховатости поверхности. Некоторые утверждают, что вода способствует образованию оксидов железа на контакте, что подавляет трение [188]. Другие утверждают, что поведение воды соответствует теории упруго-гидродинамической смазки [173]. Гидрофобные продукты могут решить проблему низкой адгезии, создаваемой водным слоем на дорожке, они способны поддерживать уровень адгезии выше того, который в противном случае был бы безопасным пределом [186]. Было исследовано совместное воздействие воды и других загрязнителей (модификатор

трения, песок, масло, оксиды железа) [171]. Взаимодействие масла и воды имели более низкий коэффициент сцепления, чем контакт, смазываемый чистым маслом, уменьшение коэффициента трения на 0,15 было обнаружено при контакте колеса с рельсом со смесью воды и песка по сравнению с чистым контактом с песком.

Контакт колеса с рельсом представляет собой контакт качения и скольжения, поэтому, возникающий износ можно разделить на четыре основные категории: контактная усталость качения (RCF), абразивный износ, адгезионный износ и коррозионный износ, механизмы которых влияют на износ в месте контакта колеса с рельсом в открытой системе. Следует отметить, что в процессе изнашивания в контакте колесо-рельс обычно доминирует не один единственный механизм изнашивания, а два или более вместе взятых.

Контактная усталость при качении (RCF) может начаться либо на поверхности, либо под ней. Подземная RCF встречается редко, но ее последствия, как правило, серьезные, такие как повреждение колес и рельсов или даже сход с рельсов. Поверхностно-инициированная RCF встречается гораздо чаще. Это свидетельствует о том, что нагрузка железнодорожного транспортного средства достигла максимального значения с экономической точки зрения. Основная причина поверхностной центробежной силы заключается в том, что сила трения между колесом и рельсом превышает предел текучести материалов. Происходит непрерывная пластическая деформация, которая в конечном итоге приводит к усталостным трещинам (рис. 1.5).



Рисунок – 1.5 Результат пластической деформации в паре трения колесо-рельс [178]

Большинство исследований по RCF сосредоточено на механических факторах, таких как геометрия, состояние поверхности и неровности. Лишь немногие исследовали воздействие на окружающую среду. Дефекты на рельсе еще больше снижают усталостную долговечность контакта колеса с рельсом, смазанного маслом [178], другие исследователи обнаружили, что присутствие модификаторов трения устраняет заедание головки и поверхностные трещины [176], другие исследователи показали, что только правильное применение модификаторов трения может уменьшить центробежную силу, а неправильное применение приводит к значительному увеличению относительной центробежной силы [201].

Абразивный износ сопровождается твердыми загрязняющими веществами в месте контакта колеса с рельсом - оксиды, песок и глинозем. Частицы снега и льда являются еще одним возможным твердым загрязнителем на контакте колес с рельсами в зимнее время. Теория плавления под давлением указывает на то, что они будут раздавлены и спрессованы в капли воды, которые будут смазывать контакт колеса с рельсом, уменьшая потери на износ.

Адгезионный износ является следствием микросваривания между противоположными неровностями на противоположных поверхностях. Этот вид износа особенно серьезен при использовании одинаковых материалов, таких как сталь для колес и рельсов. При относительном движении трущихся контртел микростыки будут разрываться, а некоторые материалы будут переходить с одного на другой или срезаться, что приведет к повреждению поверхности. Микрошвы могут быть небольшого размера или иметь большую площадь в зависимости от состояния неровностей на трущихся поверхностях. Выход из строя большой площади микростыки могут привести к заклиниванию, что представляет собой серьезную ситуацию в контакте колеса с рельсом, приводящую к быстрому выходу из строя колес и рельсов. Тип смазочных материалов влияют на переход от легкого адгезионного износа к заеданию.

Процесс износа усложняется, когда на контактирующих поверхностях

возникает коррозия. Твердые оксидные частицы, попавшие в контакт колесо-рельс, увеличивают скорость изнашивания в соответствии с трехчастным абразивным износом, но чешуйчатые оксиды, покрывающие поверхности колеса и рельса, могут защитить их от сильного износа. Высокая влажность и водные слои способствуют образованию чешуйчатых оксидов. Другие коррозионно-активные вещества на поверхности колес и рельсов могут привести к химическим реакциям и ускорить износ клея. Целесообразно анализировать механизм износа в каждом конкретном случае, когда речь идет о коррозии.

Среди наиболее фундаментальных работ в области изучения динамики взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути необходимо отметить труды наших отечественных ученых: А.А. Холодецкого [145, 146], Н.П. Петрова [124], К.Ю. Цеглинского [148, 149], Н.Е. Жуковского [68], С.П. Тимошенко [141], М.Ф. Вериги [38-42]. Работы И.А. Жарова и С.М. Захарова [66, 67] посвящены определению зависимости типа изнашивания от параметров контакта, изучению механизмов изнашивания и эволюции профиля колеса методом пошаговой итерации. М.Ф. Верига в своих работах предлагает способы уменьшения износа боковой поверхности гребня колеса путем смазывания поверхности, уменьшения поперечных сил и углов набегания колеса на рельс.

В работах зарубежных ученых также так же проведены исследования по анализу взаимодействия системы колесо-рельс: П. Аппель [4, 5], В. Клингель [183], Г. Юбелакер [164], Ф. Картер [172], И. Калкер [74].

Изучению вопроса процесса изнашивания элементов «колесо и рельс» при взаимодействии и повышения их эксплуатационного ресурса посвящены труды таких ученых, как: Андреев А. И. [2], Буйносов А. П. [15-24, 52, 53], Данилов В. Н. [57, 58], Карпущенко Н. И. [75], Лысюк В. С. [108] и др.

Задачами контактирования пары трения «колесо – рельс» занимались: Буяновский И.А. [27-33, 159, 161], Грачева Л. О. [55], Жаров И. А. [66, 67], Зернин М. В. [70], Крагельский И. В. [93-95], Кумар С. [98], Марков Д. П. [111, 112], Мюллер Р. [191], Ковалев Н.А. [81], Чичинадзе А. В. [150], Данилов В.Н. [57, 58], Данович В.Д. [59], Дружинина О.В. [62].

Большой вклад в исследование природы взаимодействия колеса и рельса внесли: Браун Э. Д. [14], Буше Н. А. [25, 26], Вериго М. Ф. [38-42], Захаров С. М. [69], Исаев И. П. [72], Калкер Дж. [74], Картер Ф. [172], Клингель В. [183], Коган А. Я. [82, 83], Коссов В. С. [87-91], Лужнов Ю. М. [104], Вершинский С.В. [43], Вальран О. [34]. В этих работах рассмотрены причины возникновения таких проблем, как сход вагона с рельсов, повышенный износ соединения колеса и рельса и контактная усталость.

Работы Кислика В.А. 1938 года [77, 78] содержат информацию по металлографическому анализу поверхностного слоя бандажа колеса, для определения механических свойств. Износ представляет собой смятие металла под действием внешнего давления колеса на рельс, а так же трение скольжения при проскальзывании бандажа по рельсу. В последующем исследовании, авторами Кисликом В.А. и Кармазиным А.И. [79], было установлено, что увеличение содержания углерода в составе стали сопровождается повышением устойчивости бандажей и колес к износу в процессе эксплуатации. Ларин Т.В. в своей работе [100], утверждает, что механизм износа сопровождается отделением пластически деформированных частиц с поверхности катания, образовавшихся в результате структурных изменений в процессе трения бандажа о рельс. В своей работе автор рекомендует уменьшение содержания углерода в стали и компенсацию естественной потери прочности за счёт термической обработки для повышения прочностных характеристик.

Изучению процессов трения посвящено большое количество трудов отечественных и зарубежных учёных. Из широко известных работ Боудена Ф. [13], Голего Н.Л. [49, 50], Евдокимова Ю.А. [63, 64], Костецкого Б.И. [92], Кораблёва А.И. [86], Хрущёва М.М. [147], Матвеевского Р.М. [114], и других следует, что в контакте трущихся поверхностей "колесо-рельс" отмечаются комплексные физико-химические процессы, протекание которых зависит от множества кинематических, силовых и тепловых параметров.

Специалисты ВНИИЖТ (Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта) [10, 11] выявили новое явление, которое

заключается в переходе от упруго-пластических деформаций металла контактирующих поверхностей к их схватыванию, сопровождающемуся образованием процесса микрорезания. Параллельно с этим было установлено, что происходит глубинное вырывание металла с поверхности катания бандажей локомотивов и колес. Определяющими условиями данного процесса были [49, 50] Относительная глубина проникновения контактирующих поверхностей и относительная прочность адгезионной связи, зависящая от предела текучести металла, определяются уровнем нагрузки и температурным режимом эксплуатации узла трения. В своем исследовании [93] И.В. Крагельский выявил, что критическим условием схватывания контактирующих поверхностей является превышение определенного порога относительного проникновения, который определяется прочностью адгезионной связи. Если даже в одном из многочисленных контактов происходит схватывание металла с образованием микрореза, это может привести к тому, что микрорезание станет доминирующим механизмом износа [94]. И.В. Крагельским [95] была разработана теория изнашивания, с помощью которой можно рассчитать интенсивность изнашивания пар трения, для использования которых необходимо определять параметры фрикционно-контактной усталости. Эта теория основана на принципах трибологии и механики деформируемого твердого тела и позволяет оценить интенсивность изнашивания в парах трения на основе различных параметров и условий эксплуатации. В основе теории изнашивания И.В. Крагельского лежат следующие ключевые аспекты. Теория учитывает различные механизмы, приводящие к изнашиванию поверхностей, такие как адгезия, абразивный износ, абразивно-адгезионный износ, фатиговый износ и др. Каждый из этих механизмов может вносить существенный вклад в общую интенсивность изнашивания пар трения. Теория учитывает различные факторы, влияющие на процесс изнашивания, такие как нагрузка, скорость, температура, химическая активность среды и механические свойства материалов. Анализ этих факторов позволяет определить условия, при которых наиболее вероятно возникновение изнашивания. Теория Крагельского предлагает математические

модели, которые позволяют рассчитать интенсивность изнашивания в зависимости от указанных параметров. Эти модели могут быть основаны на уравнениях механики деформируемого твердого тела, трибологических законах и экспериментальных данных. Результаты, полученные с помощью теории Крагельского, могут быть подтверждены и проверены экспериментально. Сравнение теоретических расчетов с реальными данными позволяет оценить точность и применимость моделей для конкретных условий и материалов. Схватывание контактирующих поверхностей становится возможным, если превышает определенный критический порог величины относительного их внедрения, который определяется прочностью адгезионной связи [131]. В.Д. Кузнецов разработал теорию наростообразования при трении металлов, которая говорит о том, что трение со схватыванием без смазочного материала сопровождается образованием наростов, наличие которых приводит к порче трущихся поверхностей и их изменению. Так же при различной твердости металлических поверхностей процесс схватывания происходит к более твердой поверхности. В процессе трения одинаковых по твердости металлов происходит образование нароста в толще металла, что приводит к процессу микрорезания. Для предотвращения процесса микрорезания необходимо использовать смазочные материалы. На износостойкость колеса локомотива оказывают влияние различные факторы, которые определяют его долговечность и эффективность в эксплуатации. Интенсивность износа колес напрямую зависит от уровня нагрузки и скорости движения локомотива. Большие нагрузки и высокие скорости могут ускорить процесс износа поверхностей колес. Качество металла. Правильное управление трением и использование эффективных смазочных материалов могут снизить износ поверхностей колес и увеличить их срок службы. Эксплуатация в различных климатических условиях может влиять на тепловые нагрузки, которые в свою очередь могут повлиять на износостойкость колес. Правильная геометрия и состояние рельсов также оказывают влияние на износ колес, поскольку неправильная геометрия или дефекты на рельсах могут вызвать неоднородные нагрузки на колеса,

эксплуатационные условия.

Анализ работ исследователей [51, 52, 53, 77, 78] позволил выделить несколько типов износа колесных пар.

Первый тип износа, который характерен для набегающих колесных пар электровазов, проявляется в высокой интенсивности изнашивания на участках железнодорожного пути с большим количеством кривых. Изношенный гребень колеса характеризуется матовой металлической поверхностью с признаками схватывания металла, выраженными в виде глубоких углублений, направленных от выкружки к вершине. Фрикционная поверхность подвергается пластической деформации и закатыванию. Второй тип износа характерен для бандажей колесных пар локомотивов, работающих на равнинных участках с мягким профилем пути и ограниченным количеством кривых. Характерный вид износа остается неизменным, однако схватывание и образование задиров на поверхностях значительно уменьшены. Износ гребня по высоте неравномерный: у выкружки более интенсивный, поэтому угол между продолжением образующей и осью колесной пары увеличивается до $70-75^\circ$ при предельном прокате. Основной причиной неравномерного износа гребня по высоте является неправильная геометрия колеи. Именно она влияет на поведение поезда и распределение сил, действующих на колеса. К третьему типу износа гребней относится вертикальный прокат, который проявляется с увеличением степени перекаса с пропорциональным ростом его интенсивности. Четвертым типом износа является односторонний подрез гребня, обусловленный неправильной установкой колесной пары в раме тележки и значительными различиями в диаметрах бандажей по кругу катания одной колесной пары. Если колесо неправильно установлено на оси (несимметрично), контакт с рельсом может быть нарушен. В этом случае возникает неравномерное распределение силы давления на колесо и рельс, что приводит к появлению одностороннего срезания гребня. Этот тип износа является довольно серьезной проблемой для железнодорожного транспорта. Он ведет к усложнению движения поездов, увеличению трения рельсов и колес, а, как следствие, к износу оборудования и

повышенному энергопотреблению, особенно на больших скоростях.

Поверхность катания приобретает ступенчатый накат, а на гребне после длительного пробега наблюдаются следы резца. Для электровозов дополнительным фактором, влияющим на износ, является присутствие электрического тока в зоне контакта между колесом и рельсом. Положительное влияние постоянного электрического тока на износ изучено в работе [84], где авторы считают, что он оказывает в общем упрочняющее воздействие, так как окисляет поверхности и создает защитные пленки, что относится к пятому типу износа.

Модель ВНИИЖТ задается зависимостью:

$$I = k\xi^2 p, \quad (1.1)$$

где p – давление в пятне контакта, ξ – полный крип. Во второй модели ВНИИЖТ для расчета износа по профилю колеса учитываются пластические деформации:

$$I = k\xi^2 p^* \min \left(\frac{p}{p^*}, 1.5 \right) \quad (1.2)$$

где p^* – критическое давление.

При малых значениях критического давления p^* данная модель переходит в формулу (1.1). Модели (1.1) и (1.2) используются в программе «Универсальный механизм» разработанные Брянским государственным техническим университетом.

Авторы работы Орлова А.М. и Лесничий В.С. [101, 121] предлагают результаты математического моделирования износа гребня колеса грузового вагона в зависимости от состояния тележки. В работе приведены исследования состояния тележек на боковой износ гребня с использованием программы MEDYNA, где показано, что разработанная математическая модель [101, 121], включает в себя характеристики тележки и угол набегания букса, режим сухого трения. Вычисление износа основывалось на теории абразивного износа в соответствии с моделью Арчарда [168]. Боковой износ гребня оценивался для всех колесных пар, разделенных по типам участков пути, с использованием следующего метода:

$$f_{\text{пр}} = p_{\text{straight}} \sum f_i^{\text{straight}} + p_{650} \sum f_i^{650} + p_{350} \sum f_i^{350} \quad (1.3)$$

где p_{straight} , p_{650} , p_{350} – вероятности движения в прямой, кривой среднего и малого радиуса, соответственно; $f^{\text{straight}, 650, 350}$ – боковой износ гребня в колесной паре с номером i на прямом участке пути, в кривой радиусом 650 м и 350 м, соответственно. Вероятности движения по различным участкам пути были приняты равными $p_{\text{straight}} = 0,75$; $p_{650} = 0,20$; $p_{350} = 0,05$. Увеличение ширины колеи приводит к уменьшению износа, результаты расчетов по модели показывают следующие значения: при изменении ширины колеи от 1520 мм до 1530 мм – на 30 %, от 1520 до 1525 мм – на 20 %.

В работах [111, 112] изучается кинематика перемещения точки контакта при различных наклонах гребня и боковой поверхности головки рельса. Важно отметить, что траектория движения точки на поверхности гребня вдоль боковой поверхности головки рельса, при отсутствии проскальзывания на поверхности катания, представляет собой сегмент удлиненной циклоиды, пересекающей точку контакта. Согласно теории циклоиды, точка Б [119, 120], находится на гребне бандажа этого же колеса, и она двигается по траектории удлиненной циклоиды. Проекция траектории движения точки Б на внутреннюю боковую грань головки рельса позволяет анализировать характер взаимодействия гребня колесной пары с внутренней гранью головки рельса. Это позволяет установить аналитические и параметрические соотношения между скоростью и ускорением взаимодействия колеса с рельсом в зависимости от его диаметра по кругу катания. Богдановым В.М. [10] процесс изнашивания колеса и рельса по поверхностям катания и боковым поверхностям определяется следующим уравнением:

$$\frac{\partial W_{p,k}^i}{\partial t} = F_{p,k}(p^i, V^i) \quad (1.4)$$

где $W_{p,k}^i$ – износ; t – время; p_i – контактное давление; V_i – скорость взаимодействия колеса с рельсом в точках А и Б; $F_{p,k}$ – известные функции.

В работе [115] для прогнозирования износа гребня колеса локомотива, авторы использовали регрессионный анализ и методы вероятностного

прогнозирования. Были описаны математические зависимости – линии регрессии, описывающие зависимость износа i и интенсивности изнашивания гребня A от пройденного пути L , так же авторами был рассчитан доверительный интервал. Расчеты проводились при помощи математического пакета MAPLE-7.

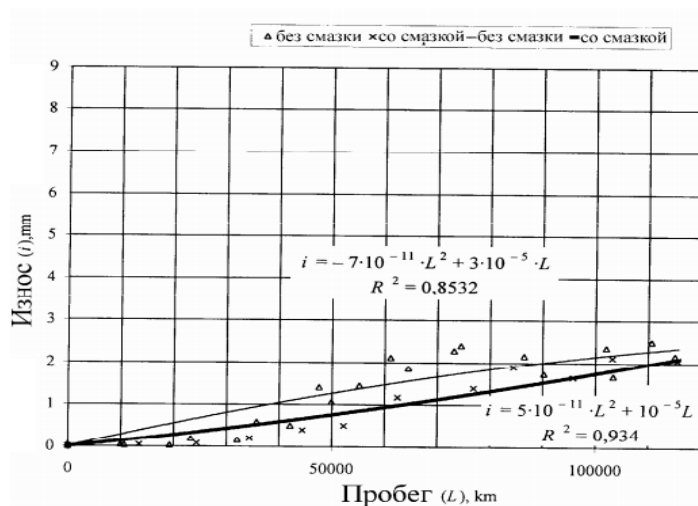


Рисунок – 1.6 Зависимость проката от пробега [115]

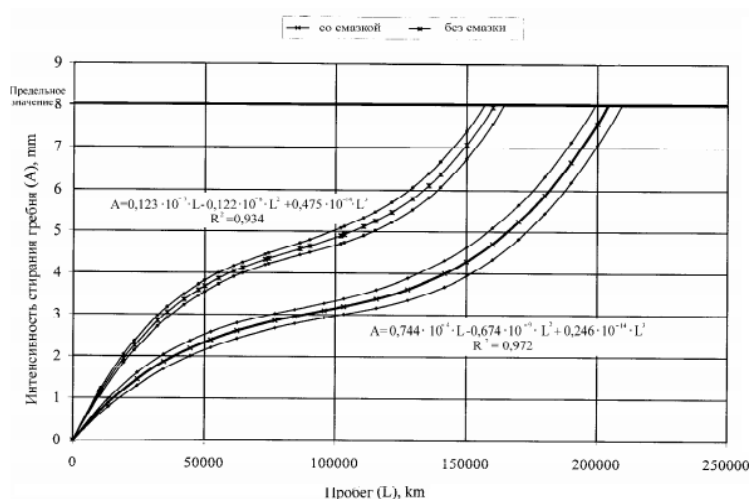


Рисунок – 1.7 Зависимость интенсивности стирания гребня от пробега [115]

Вышеприведенные зависимости показывают, что износ бандажа одинаков на всех этапах эксплуатации, а интенсивность износа гребня колеса наблюдается на начальных этапах эксплуатации при пробеге 30-40 тыс.км. Далее по графику на рисунке 1.7 видно, что интенсивность изнашивания гребня уменьшается и затем начинает снова возрастать с 15 тыс.км. По полученным функциям можно прогнозировать, что обточка колесных пар из-за стирания гребня потребуется после пробега 160 тыс. км с начала эксплуатации без применения лубрикаторов и после 20,5 тыс. км при смонтированной системе смазки гребней.

Григорьев А.В. и Лепов В.В. [56] рассматривают процесс изнашивания как накопление повреждений и проводят расчет ресурса элементов железнодорожной техники, учитывая накопление повреждений вследствие фрикционного взаимодействия. При этом трению сопутствуют процессы механического и молекулярного взаимодействия поверхностей. Степень их проявления зависит от конкретных условий изнашивания. Для снижения износа деталей необходимо уменьшить взаимное внедрение трущихся поверхностей, чтобы предотвратить их схватывание. Поэтому повышение микротвердости при механической обработке способствует уменьшению внедрения и контактного схватывания, что в свою очередь приводит к увеличению износостойкости трущихся поверхностей [56]. Интенсивность износа гребней локомотивных колес $\delta_{гр}$ рассчитывалась по следующей формуле:

$$\delta_{гр} = \frac{\Delta_2^{гр} - \Delta_1^{гр}}{\Delta П} \quad (1.5)$$

где $\Delta_{гр}$ – фактическая толщина гребня, $\Delta П$ – пробег локомотива между замерами. Полученные расчеты показали, что наибольшее значение интенсивности изнашивания наблюдается в кривых с радиусом 400 м.

Авторы принимают термокинетическую модель взаимодействия двух шероховатых поверхностей [54], учитывают усреднение напряжений в пятне контакта колеса и рельса. Поврежденность при износе задается следующим уравнением:

$$\psi_{Fr} = \int_0^T \frac{1}{\vartheta} \exp \left[-\frac{U - \gamma \sigma(t)}{kT(t)} \right] dt = \sum_{j=1}^M \frac{1}{\vartheta} \exp \left[-\frac{U - \gamma(\sigma_i)}{kT_i} \right] \quad (1.6)$$

где T – ресурс колеса, U – энергия активации, ϑ и γ – характеристики материала, k – постоянная Больцмана, $\sigma(t)$ – среднее напряжение по пятну контакта в момент времени t , $T(t)$ – зависимость температуры по времени, j – от 1 до M – количество месяцев эксплуатации, σ – усредненное значение напряжения.

В работе [109] Любимов Д.Н., В.И. Колесников, И.С. Гершман рассматривают трение как последовательное формирование, а затем, разрыв адгезионных связей между трущимися поверхностями. На трение и износ влияют трибоактивация и фрикционный перенос молекул между поверхностями трения.

Математическая модель, предложенная авторами, связывает количественные трибологические параметры и характеристики вещества, с помощью применения в расчетах уравнений взаимодействия твердых тел и конденсированных сред [109]. Уравнение имеет вид:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{A_3}{A_2}, (1.7)$$

где f_1 и f_2 – коэффициенты трения установившегося режима; A_2 – постоянная Гамакера (порядок 10^{-19} Дж для металлов), описывающая материал контртела; и A_3 – материал промежуточного слоя, образованный при фрикционном переносе.

1.2 Смазочные материалы фрикционного контакта

1.2.1 Типы смазочных материалов

Большинство механических компонентов движущихся механических узлов изготовлены из металлических материалов. Поверхностные взаимодействия между двумя плоскими металлическими поверхностями, когда они входят в атомный контакт, были проанализированы Табором в работе [13]. Сначала образуются связи из-за дальнodelствующих сил Ван-дер-Ваальса, и по мере того, как разделительные расстояния приближаются к межатомным расстояниям, возникают сильные металлические связи. Последнее явно является нежелательным явлением с точки зрения производительности и надежности. Органические присадки к смазочному материалу адсорбируются в виде монослоев, причем их прочность на сдвиг обусловлена слабыми взаимодействиями Ван-дер-Ваальса между противоположными углеводородными цепями на границах раздела. Толщина монослоя достаточна для того, чтобы предотвратить прямой контакт трущихся поверхностей. Их свойства снижения трения сильно зависят от длины цепи и функциональных групп на концах молекул.

Смазочные материалы должны соответствовать трибологическим требованиям к механическим и физическим свойствам: прочность, жесткость, усталостная долговечность, тепловое расширение и демпфирование.

Уменьшение трения и износа обычно достигается путем введения слоя, компенсирующего сдвиг между контактирующими поверхностями. Фрикционный контакт вызывает эволюцию микроструктуры в поверхностных и подповерхностных областях. Следовательно, смазка материала также зависит от условий нагрузки [13]. Твердые смазочные свойства встречающихся в природе материалов, таких как графит и молибденит, хорошо известны. Однако развитие современных технологий нанесения покрытий (физический пар, химический пар и плазменное химическое осаждение из паровой фазы) значительно расширило использование твердых смазочных материалов. Появление поверхностных и подповерхностных аналитических методов, таких как рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, сканирующая микроскопия, времяпролетная вторичная масс-спектропия и микроскопия с фокусированным ионным пучком, значительно облегчило фундаментальное понимание синтеза. Трение и износ зависят не только от физических и механических свойств отдельных контактирующих материалов, они обладают свойствами системы, включающими взаимодействия внутри пар контактирующих поверхностей и между ними и окружающей средой. Многие трибологические контакты приводят к переносу материала с поверхности покрытия на контртело а также к химическим реакциям поверхности с окружающей средой, известным как трибохимические реакции, в результате чего образуются поверхности износа, химический состав которых значительно отличается от химического состава поверхности. Химический состав скользящей поверхности может влиять на трение и износ, особенно во время процесса приработки, когда пленка переноса начинает прилипать к поверхности. Окружающая среда, нагрузка, материал контртела, скорость скольжения и т. д. играют значительную роль в определении их трибологических свойств.

Физические преимущества наличия смазочной пленки между поверхностями, находящимися в относительном движении, известны уже несколько тысячелетий.

Смазочные материалы для железнодорожных транспортных систем часто имеют непосредственный контакт с окружающей средой. Экологически безопасные, легко биоразлагаемые смазки для рельсов обеспечивают постоянную бесперебойную и безопасную работу железнодорожных сетей.

Рейнольдс изучал вязкое течение смазочных материалов в подшипниках скольжения. Результат его исследований привел к появлению дифференциального уравнения (1.8), которое является в основе расчета гидродинамической смазки. Уравнение Рейнольдса имеет вид:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta(U_0 + U_h) \left[\frac{h-h_m}{h^3} \right] \quad (1.8)$$

где p — давление жидкости, x — одномерное расстояние до подшипника, h — толщина пленки и h_m при максимальном давлении.

В 1922 году Харди [179, 180] определил условия, в которых не работает гидродинамическая смазка - низкая относительная скорость, высокие нагрузки и низкая вязкость смазки. Было установлено, что в данных условиях жидкостная пленка прерывистая из-за высокой нагрузки и низкой вязкости смазывающей жидкости, так же влияние оказывают микронеровности поверхности. Поверхностные защитные пленки были так же описаны Боуденом и Табором [13], которые говорят о том, что пленки образуются за счет компонентов смазки и определяют процесс трения поверхностей.

Вот уже два известных физика, Доусон и Хиггинсон, смогли на примере механизмов смазки доказать, что возможно значительно увеличить эффективность этого процесса с помощью ультразвуковых волн. Ранее считалось, что для смазывания механизмов требуются специальные смазочные материалы, которые образуют тонкую пленку, устраняющую трение и износ. Однако, исследования Доусона и Хиггинсона показали, что применение ультразвуковой волны во время смазывания может значительно повысить эффективность процесса. Доусон и Хиггинсон установили, что при экстремальной нагрузке и высоком давлении, возникает пластическая деформация контактные материалы вместе с повышенной вязкостью смазки под

давлением. Это эластогидродинамическая смазка, или ЕНЛ, - это особый вид смазки, который играет важную роль в обеспечении бесперебойной работы различных устройств. Она используется в механизмах, где происходит соприкосновение поверхностей, таких как подшипники, шестерни и зубчатые передачи. Когда две поверхности контактируют друг с другом, даже при малейшем трении может произойти износ, повреждения или перегрев. Это приводит к снижению эффективности работы механизма и укорачивает срок его службы. Эластогидродинамическая смазка призвана решить эту проблему и облегчить трение между поверхностями. Отличительной особенностью ЕНЛ является то, что она становится более эффективной и заметно улучшает свои свойства при увеличении нагрузки и скорости работы механизма. Это происходит благодаря образованию пленочного слоя между контактирующими поверхностями в результате высокого давления, которое возникает при сжатии смазочной жидкости. Такой слой предотвращает прямой контакт поверхностей и снижает трение и износ. Эластогидродинамическая смазка имеет не только техническое, но и экономическое значение. Ее использование позволяет снизить энергозатраты, повысить производительность механизмов и увеличить срок их службы. Это особенно важно для промышленных предприятий, где множество сложных устройств работают в тяжелых условиях и требуют постоянного обслуживания (рис. 1.8).

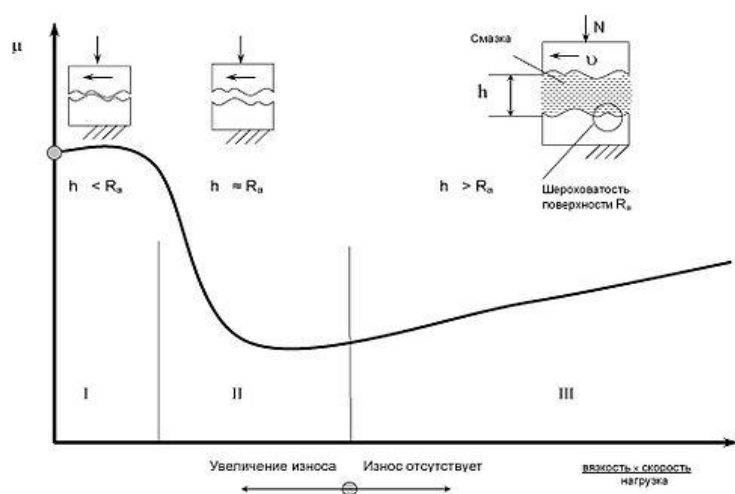


Рисунок – 1.8 Кривая Герси-Штрибека

Кривая Герси-Штрибека, также известная как кривая трения, представляет собой график, отображающий зависимость коэффициента трения от времени при скольжении твердых тел. Эта кривая может быть разделена на несколько зон, каждая из которых характеризуется определенными процессами трения. Первая зона: в этой зоне коэффициент трения высок из-за различных факторов, таких как неровности поверхностей, микро-адгезия и другие. Эта зона представляет начальный этап скольжения, когда твердые тела только начинают двигаться друг относительно друга. Режим сцепления (II): после преодоления начального сопротивления твердые тела входят в режим сцепления, где коэффициент трения снижается. Это обусловлено устранением некоторых микронеровностей и установлением стабильного сцепления поверхностей. III - зона гидродинамической смазки, в этой зоне трение стабилизируется, и твердые тела скользят друг относительно друга с постоянным коэффициентом трения. Это состояние может продолжаться до тех пор, пока не возникнут новые факторы, изменяющие условия трения. В конечном итоге, при дальнейшем увеличении времени трения, может произойти разрушение или изнашивание поверхностей, что приводит к увеличению коэффициента трения. Вероятность реализации гидродинамического или граничного режима можно приблизительно оценивать по величине λ , представляющей собой отношение толщины смазочного слоя h_{min} в зоне минимального зазора между трущимися деталями к характеристике высоты неровностей рабочих поверхностей этих деталей:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \quad (1.9)$$

где R_{a1} и R_{a2} – параметры шероховатости рабочих поверхностей соответственно первой и второй контактирующих деталей. При $\lambda > 3$ имеет место гидродинамический режим смазки.

Смазочные материалы являются составной частью механической системы и должны разрабатываться параллельно с этой системой. Натуральные жиры и масла, использовавшиеся в то время в качестве смазочных материалов, начали

разлагаться при повышенных физических условиях труда и продуктах их разложения, особенно органических кислотах, корродированной стали и особенно компонентах из цветных металлов. Требования к производительности системы превзошли способность смазочных материалов выполнять и защищать ее. Так же в это время более тяжелые углеводороды из добычи сырой нефти стали доступны для использования в качестве смазочных материалов, способных выдерживать более высокие температуры в среде пара высокого давления.

Работа пары трения связана с кривой Штрибека. Во время работы механизма твердые поверхности скользят друг по другу и возникает сопротивление в виде трения. Однако, стоит отметить, что все не так просто, как кажется на первый взгляд. Кривая Штрибека представляет собой график, который показывает зависимость коэффициента трения от скольжения. Ранее считалось, что коэффициент трения постоянен и не зависит от скольжения. Однако исследования в области трибологии показали, что это не так. При скольжении твёрдых поверхностей, находящихся друг относительно друга, происходят различные процессы, которые влияют на коэффициент трения. Например, сухое трение, при котором между поверхностями отсутствует смазка, и смазанное трение, когда на поверхности присутствует смазочный материал. Коэффициент трения сухого трения намного больше, чем коэффициент трения смазанного трения. Это объясняется тем, что в сухом трении поверхности прямо контактируют друг с другом и возникает большее сопротивление. В случае смазанного трения, смазка обеспечивает снижение трения между поверхностями и повышает эффективность работы механизма. Исследования показали, что кривая Штрибека имеет несколько разных форм в зависимости от типа поверхности и условий трения. Она может быть унимодальной, бимодальной или мультимодальной. Кривая Герси-Штрибека может иметь различные формы в зависимости от условий трения и свойств материалов, взаимодействующих поверхностей. Форма кривой может быть изменена в результате различных факторов, таких как скорость скольжения, нагрузка, температура, наличие смазки и другие параметры. При низких нагрузках и небольших скоростях

скольжения кривая может быть относительно плавной, и стартовая зона может занимать значительную часть кривой. Это связано с тем, что влияние неровностей поверхности и адгезии более заметно при низких нагрузках. При увеличении нагрузки стартовая зона может стать более краткой, а режим сцепления и режим стабильного трения могут более резко выражаться. Увеличение нагрузки может также привести к более значительному изнашиванию поверхностей. Использование смазки может существенно изменить кривую Герси-Штрибека. Смазка снижает трение, улучшает смазывающие свойства и может изменять характеристики кривой, особенно в области режима стабильного трения. Высокие скорости скольжения: При высоких скоростях скольжения могут происходить изменения в режимах трения, и форма кривой может меняться в зависимости от температуры и других параметров.

Таким образом, форма кривой Герси-Штрибека представляет собой результат сложного взаимодействия множества факторов, и она может быть уникальной для каждой конкретной пары твердых тел и условий трения.

Понимание работы пары трения и влияния кривой Штрибека на коэффициент трения имеет важное значение при проектировании и разработке различных механизмов. Это помогает ученым и инженерам улучшить эффективность работы систем, снизить износ и повысить надежность.

В условиях граничной смазки решающую роль в защите от износа играет роль адсорбированных молекулярных пленок защитных присадок. Присадки в смазочных материалах выполняют ряд важных функций, направленных на улучшение и оптимизацию работы двигателей и других механизмов. Вот некоторые из основных функций присадок в смазочных материалах. Присадки способствуют защите от окисления масла и металлических поверхностей. Они предотвращают разрушение масла под воздействием кислорода и других окислительных веществ, что способствует увеличению срока службы масла и двигателя в целом. Присадки, такие как противоизносные и противозадирные добавки, снижают трение и износ металлических поверхностей, что улучшает

эффективность работы двигателя и продлевает срок службы его деталей. Вязкостные индексы помогают поддерживать стабильную вязкость масла при различных температурах, что важно для обеспечения правильной смазки в широком диапазоне рабочих температур. Присадки могут улучшать текучесть масла при низких температурах, обеспечивая легкий пуск двигателя и защиту от износа при холодных стартах.

Противоизносные присадки являются лишь одним из ряда типов присадок, вводимых в базовые масла: существуют также антиоксиданты, антикислоты, моющие и диспергирующие присадки, смазывающие, противоизносные, противозадирные, депрессорные присадки, антикоррозионные и антикоррозионные присадки, антипенные добавки. Присадки, улучшающие индекс вязкости, представляют собой высокомолекулярные полимеры, которые изменяют температурную зависимость вязкости базового масла. В целом массовая доля присадок в смазочном материале может достигать 15–20 %. Добавки часто являются многофункциональными, поэтому некоторые соединения имеют функцию депрессора температуры застывания, а также функцию антикислотной функции. Учитывая эти перекрестные взаимодействия, составление конечного смазочного продукта представляет собой сложную и квалифицированную деятельность. Выделяют два основных типа модификаторов трения смазочных материалов: молибденорганические соединения и органические модификаторы трения. Первые модификаторы трения можно разделить на три семейства: серо- и фосфорсодержащие соединения; серосодержащие и не содержащие фосфор соединения; соединения, не содержащие серы и фосфора. Последние обычно представляют собой поверхностно-активные вещества с длинной цепью и полярными концевыми группами, включая карбоновую кислоту, сложный эфир, спирт, амин, амид, имид, борат, фосфат, ионную жидкость и их производные. Их полярные концевые группы либо физически адсорбируются на металлических поверхностях, либо химически реагируют с поверхностями, в то время как углеводородные цепи проникают в смазочные материалы.

Смазочные материалы оптимально адаптированы к различным требованиям для применения, например, при низких температурах окружающей среды, свойств распыляемости, центробежных характеристик и стабильности давления. Железнодорожные смазочные материалы используются в таких компонентах, как гребни колес, переключатели или рельсы. Сегодня консистентные смазки и пасты на шасси и приводы подвергаются возрастающим нагрузкам. Благодаря своим свойствам снижения вибрации и оптимизированному коэффициенту трения смазочные материалы обеспечивают контролируемые и воспроизводимые процессы движения во всех системах.

1.2.2 Смазочные материалы системы гребень-рельс и их свойства

Железнодорожный транспорт предъявляет высокие требования к энергоэффективности, безопасности и надежности. Ключевую роль в движении поезда играет контакт между колесом и рельсом, через который передаются силы тяги и торможения [201].

Продукты, применяемые на железнодорожном транспорте для смазывания, можно разделить на три основные категории: на масляной основе (смазочные материалы), на водной основе (модификаторы трения) и на твердой основе. Смазочные масла используются для смазывания подшипников, шестерен, колесных пар, рельсов и других подвижных частей. Эти масла обеспечивают смазку и защиту от износа и коррозии. Смазочные смеси с твердыми смазками включают в себя твердые смазки, такие как графит или молибдендисульфид, смешанные с маслами. Они применяются в тех случаях, когда требуется более стойкая смазка, например, на местах высоких нагрузок. Смазки для особых условий включают в себя смазочные материалы, разработанные для экстремальных условий, таких как высокие/низкие температуры, высокая скорость, высокие нагрузки и т.д. Смазочные пластичные компаунды (СПК) применяются для смазывания поверхностей с большими давлениями и частыми нагрузками, например, между колесными рельсами и бандажами колес. Идея заключается в снижении коэффициента трения до

промежуточного уровня (около 0,3) и обеспечении положительного наклона фрикционной характеристики [201]. Исследования смазочных материалов [171, 174] показывают, что важно правильно установить применяемое количество. Передозировка контакта может привести к очень низкой адгезии. При возникновении условий низкого сцепления эффективность торможения поезда может быть значительно снижена [167].

Современные исследования смазочных материалов [134, 140] показали, что железнодорожная смазка должна способствовать снижению износа и уменьшению сопротивления движению и трения между колесом и рельсом. Использование смазочных материалов уменьшает расход топлива и шумовое воздействие от движения тягового состава, повышает эксплуатационную деятельность и обеспечивает безопасное движение. При этом, для обеспечения вышеуказанных условий, необходимо, чтобы смазка отвечала условиям работы узла трения.

В работах [128, 150] предложен способ выбора смазочного материала. Если условия выбора смазки не имеют жестко установленных рамок, то выбор осуществляется исходя из соотношения между относительной скоростью перемещения трущихся тел и удельными нагрузками во фрикционном контакте.

В соответствии с техническими требованиями ОАО «РЖД», смазочные материалы нормируются по следующим принципам: обеспечение легкого и равномерного нанесения на соприкасающиеся поверхности, способность к легкому разбрызгиванию, отсутствие крошения и скалывания, а также высокая адгезия к поверхности и стойкость к гидролизу при следующих условиях эксплуатации: скорость движения передвигного рельсосмазывателя локомотива до 140 км/ч, рабочее давление составляющее 3 ГПа, температура окружающей среды в диапазоне от -45°C до $+50^{\circ}\text{C}$, а также при высокой влажности [140]. Смазочные материалы должны обеспечивать эффективную смазку при высоких давлениях, которые возникают при контакте колес с рельсами. Так как система находится на открытом воздухе, смазочные материалы должны быть устойчивы к влажным условиям и защищать механизмы от попадания воды и пыли.

Смазочные материалы должны сохранять свои смазывающие свойства при широких температурных диапазонах, которые могут изменяться в зависимости от климатических условий. С учетом высоких нагрузок и постоянного контакта с металлом, смазочные материалы должны быть стойкими к износу и абразивному воздействию. СМ должны быть низкотоксичными и безопасными для окружающей среды, должны быть совместимы с другими материалами, используемыми в системе, такими как уплотнения и материалы подшипников. Если система предназначена для высокоскоростного движения, смазочные материалы должны обеспечивать стабильную смазку даже при высоких скоростях. Современные применяемые смазки на железнодорожном транспорте не могут отвечать всем требованиям, поэтому разработка смазочных систем, которые будут отвечать вышеперечисленным требованиям, является актуальным вопросом на данный момент, что подтверждается многими исследованиями [44, 45, 48].

Современные смазочные материалы изготавливаются из ряда базовых жидкостей и химических добавок. Базовая жидкость выполняет несколько функций, но в первую очередь это смазка, которая обеспечивает слой жидкости для разделения движущихся поверхностей. Он также отводит тепло и частицы износа, сводя к минимуму трение. Многие свойства смазочного материала улучшаются или создаются за счет добавления в базовую жидкость специальных химических добавок. Базовая жидкость действует как носитель этих добавок и она должна сохранять их в растворе при любых нормальных рабочих условиях. Большинство смазочных базовых жидкостей получают путем переработки сырой нефти. Причины преобладания рафинированных базовых масел просты и очевидны – производительность, доступность и цена. Жидкости на не нефтяной основе используются там, где необходимы особые свойства, когда нефтяные базовые масла в дефиците или где осуществима или желательна замена натуральными продуктами.

На экспериментальном полигоне ВСЖД активно исследуют применение отработанного дизельного масла в качестве смазки, как в чистом виде, так и с

добавлением графитового порошка вместо традиционных смазок РС-6, РП-1. Несмотря на высокие антифрикционные свойства отработанного дизельного масла, обнаружено, что данная смазка оказывается неэффективной из-за быстрого стекания с рельсов из-за низкой вязкости и слабой адгезии к поверхности. Дополнительно, обнаружено, что мелкодисперсный графит в масле не демонстрирует устойчивость, быстро оседая и усложняя равномерное нанесение смазочной композиции на рельсы. Отработанное масло не спроектировано специально для смазки, и его химический состав может различаться, что может влиять на эффективность смазывания. Полигон ВСЖД может предъявлять особые требования к смазочным материалам в условиях военного строительства, где повышенные нагрузки и агрессивные факторы могут требовать специализированных смазок. Использование отработанного масла может повлечь за собой риски для окружающей среды, если не предпринимаются соответствующие меры по обеспечению безопасности и утилизации.

Смазочные материалы для смазывания системы «колесо-рельс» по своему агрегатному состоянию делятся на жидкие РС-6 «В» РС-6 «Ву» TORCL-40 SOYTRAK (масла); пластичные СПЛ ПУМА-МЛ ПУМА-МР ПУМА-МГ МС-27 (пластичные смазки); твердые РАПС-1, РАПС-2. Твердые смазочные материалы предназначены для снижения коэффициента трения и износа поверхностей, которые находятся во взаимодействии и совершают относительное движение. Основные типы твердых смазок и их применение представлены в таблице 1.1.

Твердые смазочные покрытия представляют собой составы, включающие твердую смазку (пигмент) и связующее вещество. Пигменты предназначены для снижения износа и трения на поверхностях, подвергаемых смазыванию. Связующее вещество играет роль в методе фиксации пигментов на металлической поверхности, предотвращая их смещение при движении трущихся поверхностей относительно друг друга и обеспечивая устойчивость смазочного слоя [6]. Пластичные смазки имеют широкое применение во многих сферах промышленности и автомобильной отрасли. Основой пластичных

смазочных материалов часто являются высокомолекулярные полимеры, включая полиэтилен, политетрафторэтилен (PTFE), полимеры на основе силикона и другие.

Таблица 1.1 Основные виды твердых смазочных материалов

Смазочный материал	Особенности применения
Порошкообразные	Графит обладает выдающимися смазывающими свойствами за счет своей слоистой кристаллической структуры. Между слоями графита существует слабое взаимодействие Ван-дер-Ваальса, что обеспечивает легкое скольжение и снижение трения между поверхностями. Важным аспектом использования порошкообразных смазочных материалов, таких как графит, является их способность образовывать тонкие пленки на рабочих поверхностях, что способствует созданию защитного слоя и предотвращению контакта металлических поверхностей, тем самым снижая износ и продлевая срок службы механизмов. Другие порошкообразные смазочные материалы, такие как дисульфидмолибдена (MoS_2) и дисульфид вольфрама (WS_2), также привлекают внимание исследователей и инженеров. Эти вещества обладают уникальными свойствами, такими как высокая термостойкость, стойкость к высоким давлениям и химическая инертность, что делает их применимыми в условиях экстремальных нагрузок и температур.
Твердая смазка с полимерным связующим	Данный материал представляет собой композицию, состоящую из порошкообразной твердой смазки, также называемой пигментом, и связующего вещества. В качестве пигмента может использоваться одна из различных порошкообразных смазок. Связующее вещество предназначено для улучшения адгезии порошкообразной смазки к трущейся поверхности.
Мягкие металлы	Одной из важных характеристик мягких металлов в качестве смазочных агентов является их низкое значение твёрдости, что способствует образованию легко деформируемого пленочного слоя между поверхностями трения. Такие пленки обеспечивают смазку, снижают трение и износ, а также способствуют улучшению эффективности механических систем. Мягкие металлы способны образовывать устойчивые пленки при низких давлениях, что делает их особенно подходящими для легких и высокоскоростных

	приложений. При этом мягкие металлы проявляют высокую адгезию к металлическим поверхностям, обеспечивая стойкость пленок при различных условиях эксплуатации. Важным свойством мягких металлов в контексте смазочных приложений является их химическая инертность, что обеспечивает устойчивость к окислению и коррозии. Это особенно ценно в условиях высоких температур и агрессивных сред, где мягкие металлы способны поддерживать стабильность своих смазочных свойств на протяжении длительного периода.
Износостойкие антифрикционные неметаллические покрытия	Структурно износостойкие антифрикционные покрытия часто представляют собой сложные композиты, объединяющие полимерные матрицы, наполнители и функциональные добавки. Полимерные матрицы обеспечивают эластичность и прочность.
Химические и гальванические покрытия	К таким методам относятся процессы фосфатирования и хромирования поверхностей, эти методы используются в сочетании с жидкими смазочными материалами.

Эти материалы обладают выдающейся пластичностью, обеспечивая легкость деформации под воздействием нагрузок, что является ключевым фактором для формирования долговечных защитных пленок. Механизм действия пластичных смазочных материалов включает в себя образование пленок, которые препятствуют прямому контакту металлических поверхностей, снижая тем самым трение и износ. Такие пленки, обеспечивая гладкость и эластичность, позволяют эффективно снижать механическое воздействие и сохранять свою стабильность в различных условиях эксплуатации. Однако, как и во всех других областях, у пластичных смазок есть свои недостатки и снижающие их рассмотрение как возможного смазочного материала. Пластичные смазки описываются как трёхкомпонентные коллоидные системы [110], включающие в себя дисперсионную среду (как правило, жидкая основа представлена нефтяными или синтетическими маслами, либо их смесями), дисперсную фазу (загуститель), а также модификаторы структуры и различные добавки (такие как наполнители и присадки). Коллоидные свойства определяются дисперсностью твердых смазочных частиц в базовом масле.

Оптимальная дисперсность обеспечивает равномерное распределение частиц по объему материала, создавая устойчивую коллоидную систему. Этот фактор важен для создания стабильных смазочных пленок на поверхностях контакта. Коллоидные материалы обладают стереохимической совместимостью между молекулами базового масла и твердыми частицами, что влияет на их взаимодействие в коллоидной системе. Эта совместимость способствует образованию устойчивых коллоидных дисперсий, способных поддерживать свою структуру в условиях эксплуатации. Электростатические взаимодействия между заряженными частицами могут оказывать влияние на коллоидную стабильность. Например, поверхностный заряд твердых смазочных частиц может взаимодействовать с молекулами базового масла, что важно для поддержания равномерного распределения частиц. Коллоидные свойства также влияют на вязкостные и реологические характеристики пластичных смазочных материалов. Оптимальная коллоидная структура способствует формированию стабильных смазочных пленок, что, в свою очередь, влияет на их текучесть и эффективность в условиях эксплуатации. Углеводородные смазки занимают почётное место в ряду пластичных смазок, выпускаемых отечественной промышленностью, и широко применяются в качестве консервационных смазочных материалов, обладающих достаточно хорошими противоизносными, антифрикционными и антикоррозионными свойствами [110]. Однако, будучи сложной смесью углеводородов, они подвержены при длительной экспозиции в атмосфере термоокислительному старению, испарению летучих фракций, снижению коллоидной стабильности, при этом эффективная защита металла смазкой во времени катастрофически уменьшается. Один из таких недостатков - низкая температура работы. Пластичные смазки обычно имеют определенные пределы рабочих температур, ниже которых их характеристики сильно ухудшаются. При экстремально низких температурах пластичные смазки могут стать твердыми и потерять свою способность к смазке, что может привести к снижению эксплуатационных свойств механизмов. Таким образом, при выборе пластичной смазки для определенной задачи, необходимо учитывать рабочие

условия, включая температуру окружающей среды. Если планируется использование смазки в условиях низкой температуры, необходимо обратить внимание на такие характеристики, как точка застывания и температурный диапазон работы. Одним из возможных решений проблемы низкой температуры может быть использование специальных пластичных смазок, которые созданы специально для работы в условиях низких температур. Такие смазки обладают особыми характеристиками, позволяющими им оставаться гибкими и работать даже при экстремально низких температурах. Для улучшения эксплуатационных характеристик смазочных композиций в их состав включают наполнители, представляющие собой твёрдые вещества, как правило, неорганического происхождения [61] (дисульфид молибдена, графит, слюда, тальк, порошки металлов, полимерные материалы), нерастворимые в масле. Однако применение смазывающих композиций с этими наполнителями выявило их недостатки, такие как агрегирование продуктов механического и коррозионного износа, которые увеличивают скорость разрушения трущихся поверхностей, разупрочнение структуры смазочного материала, плохой отвод тепла от смазываемых деталей [125]. Повышенные требования к эксплуатационным свойствам смазочных материалов не могут быть удовлетворены вследствие этих недостатков, поэтому приходится находить новые вещества для ввода в пластичные смазки в качестве наполнителей. Жидкие смазочные материалы состоят из базовых масел, к которым добавляются присадки. Внесение присадок в базовые масла придает смазочным материалам специализированные свойства и обеспечивает им многофункциональность.

Органические модификаторы трения появились в 1918 году. Они представляют собой группу химических соединений, активно используемых для улучшения трибологических характеристик материалов и поверхностей в условиях трения и износа. Эти органические соединения выполняют функцию поверхностно-активных агентов, воздействуя на интерфейс трения и способствуя снижению трения и износа. Важными аспектами органических модификаторов трения являются их молекулярная структура, адсорбционные

свойства и механизм воздействия на поверхность. Эффективность органических модификаторов трения в значительной степени зависит от их молекулярной структуры. Органические модификаторы могут включать в себя различные функциональные группы, такие как аминогруппы, карбоксильные группы, эфиры и др. Эти группы могут взаимодействовать с поверхностью материала, образуя защитные пленки и уменьшая трение. Органические модификаторы трения обладают высокой адсорбционной способностью к поверхностям материалов. Они образуют моно- или мультимолекулярные слои на поверхности, что приводит к снижению коэффициента трения и формированию барьеров, предотвращающих контакт и износ между твердыми поверхностями. Органические модификаторы трения могут воздействовать на поверхность через различные механизмы, включая физическое покрытие, химическое взаимодействие с поверхностью, адсорбцию на дефекты поверхности и образование молекулярных пленок. Эти механизмы способствуют снижению трения и износа в различных условиях эксплуатации. Эффективные органические модификаторы трения должны обладать устойчивостью к агрессивным средам, высоким и низким температурам, а также высоким нагрузкам. Их химическая стабильность играет ключевую роль в обеспечении долгосрочной эффективности в различных приложениях. Исследователи в то время показали, что небольшое количество жирных кислот, добавленных к рафинированному минеральному маслу, способно уменьшить трение на малых скоростях и в условиях высокого давления на подшипник и, таким образом, придать минеральному маслу загадочное тогда свойство – жирность [184]. Это вызвало период интенсивных исследований механизма действия этих добавок и, следовательно, самого явления маслянистости. В течение 1920-х годов исследователи установили, что одного монослоя поверхностно-активного вещества с длинной цепью, адсорбированного на смазанных трущихся поверхностях, достаточно для заметного снижения трения [185] и что это уменьшение сильно зависит от длины цепи [180]. Также было показано, что монослой Ленгмюра-Блоджетт (получение хемосорбированных пленок,

ковалентно связанных с поверхностью и полимеризуемых внутри слоя, а также смешанных монослоев, содержащих как хемосорбированные, так и физосорбированные компоненты), нанесенный одним слоем, способен обеспечить низкое трение даже в отсутствие объемной жидкой смазки [179]. Эти исследования привели к разработке известной модели монослойной адсорбции граничной смазки. Однако эта модель однослойной адсорбции ни в коем случае не была единственным предполагаемым механизмом действия органических модификаторов трения, и обширные исследования показали, что пленки, образованные поверхностно-активными веществами с длинной цепью, могут быть толще, чем одиночный монослой. Исследования смазочного материала с помощью рентгеновской дифракции показали, что смазка может образовывать организованный слой толщиной в несколько молекул на металлических поверхностях [205], а более поздние работы с использованием различных экспериментальных методов подтвердили это [175] (табл. 1.2).

К 1930-м годам Херси смог перечислить шесть гипотез, которые объясняют происхождение эффекта органического модификатора трения: пластичность, повышенная вязкость, вторичные объемные эффекты, адсорбция, адгезия и расслоение.

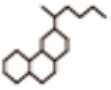
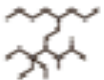
В настоящее время наиболее предпочтительной является модель монослойной адсорбции [202]. Однако за последнее десятилетие значительное количество исследований, проводимых сообществом физиков поверхностей, показало, что даже простые молекулярные жидкости могут скользить по твердым поверхностям.

1.2.3 Влияние присадок на триботехнические свойства смазочных материалов

При производстве смазочных материалов также важно учитывать аддитивную токсичность. Пределы токсичности строго регулируются природоохранным законодательством и промышленными стандартами. Примерами нетоксичных соединений являются органические соединения,

содержащие в качестве активных компонентов кислород, серу, фосфор и азот. Соединения, которых следует избегать, основаны на свинце, хлоре, барии и цинке (ZDDP, диалкилдитиофосфат цинка). Немаловажным фактором является свойство аддитивности и синергии - влияние различных дополнительных компонентов, которые усиливают (синергия) или ослабляют (антагонизм).

Таблица 1.2. Применяется присадки к смазочным материалам и маслам

Тип соединения	Структура	Индекс вязкости	Стойкость к окислению
Н-парафины		175	Высокая
Циклопарафины с одним кольцом и длинной цепью		130	Средняя
Поликонденсированные нафтенy		60	Средняя
Моноароматические соединения с длинными цепями		60	Средняя
Полиароматические соединения		<0	-
Изопарафины с разветвленными цепями		130	Средняя

эффект смазочного материала. Эти явления изучались в течение многих лет в системах с минеральными маслами и были рассмотрены Папаем в 1998 г. [194]. В другой работе, Баркрофт и Парк [170] проводили исследование присадки ZDDP с другими высокополярными веществами (диспергаторы и металлосодержащие антикоррозионные добавки). Чтобы присадки давали какую-либо противоизносную и противозадирную защиту, условия образования пленки должны быть правильными, а химическая активность присадок должна соответствовать условиям реакции, то есть температура, давление, другие химические вещества, присутствующие на поверхности металла. При анализе

соединений серы и фосфора в роли противозадирных добавок, исследователи Кавамура и Фуджита [181] изучали способность органической серы и фосфора формировать пленку и обеспечивать защитные свойства. Установлено, что противозадирное действие инициируется теплом трения, образующимся в пленке контактной поверхности. Из анализа вышеперечисленных работ можно сделать вывод, что необходимо учитывать несколько свойств трибосистемы: полярность, поверхностная активность, химическая реакционная способность, а также свойства, связанные с образованием пленки - такие как прочность пленки и ее несущая способность, теплопроводность и соотношение температуры и вязкости, особенно важны для анализа, поскольку большинство сложных эфиров характеризуются высокими значениями индекса вязкости [185].

В паре трения, когда две поверхности скользят друг по другу, образуется тепло и создает температурный градиент в области трения, вызывая движение жидкой смазки из области с высокой температурой в область с низкой температурой [197], что носит название термическая капиллярная миграция. Данный процесс оказывает влияние на состояние смазочного материала и вызывает выход из строя работающей пары трения, особенно, когда количество смазки ограничено [177]. За последнее десятилетие было проведено множество корреляционных исследований для изучения механизма миграции и эффективных средств предотвращения миграции [203, 204]. Шероховатость и топография поверхности также сильно влияют на миграцию жидкости. Текстура поверхности, как микроканавки или микроямочки используется не только для изменения трибологических свойств поверхностей скольжения, но и для препятствия термической миграции смазочных материалов [203, 204].

Процесс безызносного трения достигается путем применения металлоплакирующих смазочных материалов [96]. В состав таких смазочных материалов входят почти все металлы в виде отдельных элементов, а так же их сплавов [97, 60]. Использование сверхпластичных сплавов, таких как Bi-Cd-Sn-Pb, Bi-Hg-Pb-Sn, улучшает триботехнические характеристики металлоплакирующих смазочных материалов [139]. Образование сервовитной

пленки на поверхности трения сопровождается тремя эффектами: избирательное растворение металлоплакирующей присадки, эффект Ребиндера эффект Киркендала [118]. На основе металлоплакирующей присадки в смазочном материале образуются мицеллы, движение и направление которых происходит за счет разности потенциалов. На начальном этапе частицы металла имеют положительный заряд и мицеллы разрушаются на одной поверхности, потом происходит процесс перезарядки и подобный процесс происходит на другой поверхности. Таким образом, происходит заполнение микровыступов и впадин [163]. Описываемый процесс продолжается до образования на обеих поверхностях трения сербовитной пленки, после чего наступает режим пассивации. Для реализации самоорганизованного процесса необходимо, чтобы была активная смазочная среда. Сербовитная пленка обладает свойствами, такими как – пористость, большое число вакансий, различные параметры кристаллической решетки пленки и металла пары трения [163].

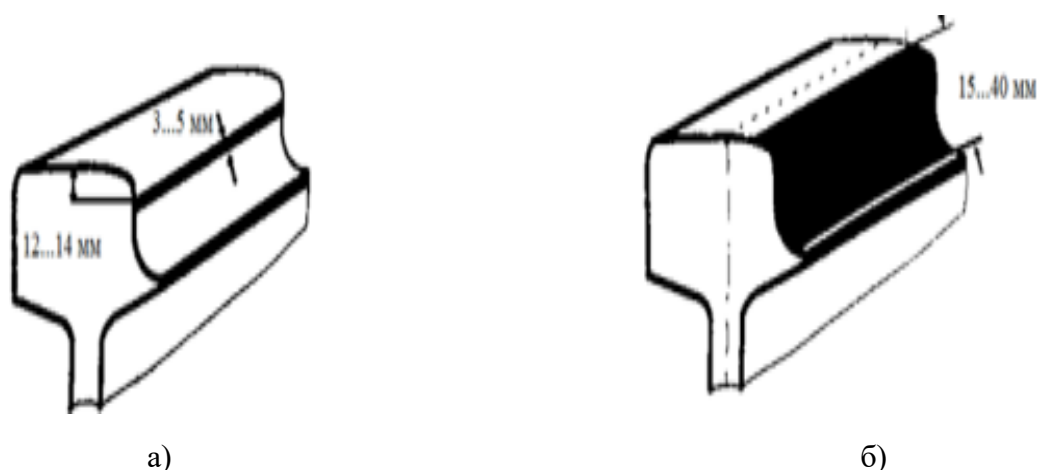
1.3 Устройства смазывания гребня колеса локомотива

Обеспечение надежной работы составляющих элементов, таких как система колесо-рельс, является одной из важных работ. Воздействие указанных деталей происходит на поверхностях контакта, включая взаимодействие между гребнем колеса и боковой поверхностью рельса. Анализ литературы показал, что движение экипажа в криволинейном участке железнодорожного пути сопровождается угловым набеганием колеса на рель. Для обеспечения правильного режима работы и уменьшения износа используются смазочные материалы и системы смазывания гребня колеса локомотива [151].

Для нанесения смазочного материала на гребень колеса локомотива или рельс используют специальные установки, которые оснащены датчиком, самой системой смазывания и бачком со смазочным материалом. Так же в качестве смазывателя широко используется гребнесмазывающий стержень. Данные системы смазывания широко применяются во всех климатических зонах мира и при различных условиях эксплуатации. На кафедре «Электрическая тяга»

УрГУПС был разработан гребнесмазыватель на основе мелкозернистого материала [18]. В состав материала входит нефтяной кокс, графит и каменноугольный пек. Графит, как высокопрочный механический материал, обладает, как и масла, вязкопластическими свойствами. Исследуемый в работе материал демонстрирует высокую адгезию к разнообразным поверхностям и обладает легкостью скольжения по ним [18]. Графит способствует быстрой приработке поверхностей трения, в то же время улучшая их качество. Этот материал оперативно наносится на обнажающиеся участки трения в процессе приработки, что предотвращает непосредственный контакт колеса с рельсом. Такой контакт часто происходит в начальные минуты эксплуатации трения, когда поверхности бандажей колесных пар и рельсов подвергаются наибольшему износу [18].

Возможность использования указанных гребнесмазывателей обусловлена тем, что первая и третья оси колесных пар тепловоза в буксовых узлах могут смещаться перпендикулярно оси пути на 1,5 мм [16]. Установка гребнесмазывателя требует учета движения тележки, вызванного работой рессорного подвешивания. Он должен быть закреплен таким образом, чтобы ось колеса-лубликатора совпадала с осью колесной пары или находилась под углом, обеспечивающим стабильную работу устройства. Смазочный материал наносится на рельс в виде полосы шириной 3–5 мм на высоте 12–14 мм (рис.1.9) от уровня головки рельса. После проезда поезда смазочный материал должен равномерно распределиться по полосе шириной 15–40 мм без выдавливания на поверхность катания (б). Значительным фактором здесь является высота, на которой происходит нанесение смазки. При данном уровне практически исключается перенос смазки на всю окружность катания рельса [15].



Рисунок– 1.9 Качество нанесения рельсовой смазки: а) сразу после нанесения;
б) после прохода поезда [15]

Мобильный рельсосмазыватель на комбинированном ходу «ЛДМ-1-РС» представляет собой переоборудованный на комбинированный ход внедорожник «УАЗ-3163 – Патриот [113]. Данный рельсосмазыватель предназначен для лубрикации стрелочных переводов, крестовин, рельсов в кривых станционных и малодеятельных железнодорожных путей, где использование вагонов-рельсосмазывателей нецелесообразно и неэкономично [116].

Заданные свойства учитываются при нанесении смазочного материала различными способами – меняется состав смазки или сама система смазывания. Анализ литературных данных показал, что из существующих систем нанесения смазочного материала (бортовые, стационарные и передвижные рельсосмазыватели представлены в виде бортовых форсунок и стержневых систем). Однако они характеризуются рядом недостатков, таких как отсутствие системы мониторинга исправности оборудования, сложность конструкции, включающей электронный блок, пневматическую систему, форсунки и маслостойкие шланги, а также необходимость квалифицированного ремонта такого оборудования. Так же можно отметить то, что при неисправности работы систем смазывания возможно попадание смазочного материала на дорожку качения, что уменьшит тяговые свойства состава. Было выявлено, что наиболее часто используемой системой является использование форсунок.

Постановка целей и задач исследования

Целью диссертационной работы является повышение износостойкости гребня бандажа колеса локомотива подбором присадок к смазочному материалу с улучшенными антифрикционными свойствами.

В соответствии с поставленной целью было необходимо решить ряд научно-технических задач, а именно:

1. Провести анализ работы трибосистемы гребень бандажа колеса локомотива –рельс.
2. Исследовать присадки к смазочному материалу на предмет их влияния на процесс изнашивания.
3. Изучить влияние смазочного материала с присадками на структуру и свойства материалов пары трения гребень бандажа колеса локомотива –рельс.
4. Разработать модель изнашивания гребня бандажа колеса локомотива на основе физико-механических свойств поверхностей трения и свойств смазочного материала.
5. Адаптировать разработанную физико-математическую модель для определения времени эксплуатации бандажа локомотива с определением критического износа гребня.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки влияния смазочного материала с выбранными присадками на эксплуатационные свойства пары трения использовались следующие методы исследований: определение температурной стойкости, определение химического состава, измерение динамической вязкости, рентгено-структурный анализ, инфракрасная спектроскопия, определение качественного и количественного состава материала гребня колеса локомотива, а так же определение динамических характеристик материала.

2.1. Объект исследований

В качестве объектов исследований выбран смазочный материал Пума, применяемый для смазывания гребней локомотивов. Пума - это разработка современных инженеров-химиков, предназначенная для обеспечения гладкой и безупречной работы гребней локомотивов. Он создан с использованием передовых технологий, чтобы обеспечить максимальную эффективность и долговечность.

Преимущества использования смазочного материала Пума:

- Высокая степень смазки. СМ Пума обладает отличным смазочным эффектом, что помогает снизить трение и износ гребней.
- Устойчивость к высоким нагрузкам. СМ Пума способен выдержать экстремальные нагрузки, что позволяет локомотивам работать более эффективно и дольше.
- Устойчивость к воздействию окружающей среды. СМ Пума разработан с использованием экологически чистых компонентов, что не только положительно влияет на окружающую среду, но и продлевает срок службы локомотивов.

Пума – водостойкий смазочный материал, применяется в температурном диапазоне от - 60°C до + 140°C, обладает хорошими адгезионными свойствами, что позволяет ему легко наноситься на вертикальную поверхность гребня

бандажа, обеспечивая таким образом смазывание пары трения колесо-рельс. Пума обладает хорошей водостойкостью, предотвращающей ее смывание атмосферными осадками. Реологические характеристики представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Реологические характеристики смазки Пума

Наименование показателей	Норма по ТУ 32 ЦТ 2232-97
Вязкость Па•с	100
Пенетрация при 25°С с перемешиванием	280-360
Испытание на коррозию, сталь марки 40,45	Выдерживает
Содержание воды	Отсутствие

Пума – однородный смазочный материал, цвет от светло-зеленого до темного зелено-коричневого. Он представляет собой пластичный смазочный материал и имеет сложный состав, который определяет его свойства. В состав смазки Пума входит минеральное базовое масло, загуститель – литиевое мыло стеариновой кислоты (модификатор трения) - мыло и масло образуют эмульсию в виде стабильного вязкого геля. Литиевый загуститель придаёт смазке термостойкость и вязкость, она хорошо прилипает к металлам и не вызывает коррозии. Данная присадка предназначена для снижения трения сопряженных поверхностей. А так же присадки – антикоррозионную (в основном полярные поверхностно-активные вещества), антиокислительную (повышает стойкость к окислению при высоких температурах) (рис.2.1). Концентрация присадок, как правило, 0,1- 0,5 %. В состав входит так же дисульфид молибдена – неорганический наполнитель, который можно использовать как отдельный пластичный смазочный материал, так и в качестве присадки к основному базовому маслу.



Рисунок 2.1 Состав смазочного материала

На базу приходится от 75% до 85% состава, на загуститель, который формирует каркас и удерживает масло, — от 10% до 20%. Оставшиеся проценты отводятся на присадки.

Анионные ПАВ являются наиболее распространенным классом ПАВ. Они представляют собой молекулы, состоящие из гидрофильной и липофильной частей, что позволяет им с легкостью образовывать стабильные эмульсии и снижать поверхностное натяжение воды. Причина их популярности заключается в простоте и низкой стоимости производства и на долю их мирового производства отводится около 60% экономики. Анионные ПАВ обладают способностью снижать поверхностное натяжение водных растворов, что позволяет им выступать в качестве эмульгаторов, пенообразователей и диспергаторов. Эти свойства делают их неотъемлемой частью многих бытовых и промышленных продуктов, таких как моющие средства, шампуни, моющие жидкости и др. Анионные ПАВ обычно обладают химической стабильностью в широком диапазоне pH и в различных химических средах, что делает их универсальными в использовании и позволяет применять их в различных условиях. Благодаря своим поверхностно-активным свойствам, анионные ПАВ являются эффективными агентами для удаления загрязнений и смывания грязи с поверхностей. Они обладают способностью разрушать масляные и жировые пленки, а также эффективно смывать растворимые загрязнители. Анионные ПАВ производятся в больших объемах и отличаются относительно низкой стоимостью, что делает их экономически выгодным выбором для широкого спектра промышленных и бытовых приложений. Наиболее широкое применение нашли первичные алкилсульфаты ($\text{R}\text{OSO}_3\text{Na}$), алкилсульфонаты ($\text{R}\text{SO}_3\text{Na}$), алкиларилсульфонаты ($\text{RC}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$) а также оксиэтилированные производные спиртов $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m\text{H}$, алкилфенолов $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{C}_6\text{H}_4\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m\text{H}$, карбоновых кислот $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{COO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m\text{H}$, аминов $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_2\text{H}$, амидов $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{CONH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m\text{H}$, сложных эфиров $\text{R}_2\text{C}[\text{CH}_2\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m\text{H}]_2$. Эти присадки обычно добавляются в смазочные материалы для улучшения их смазывающих и противоизносных свойств, а также для защиты поверхностей от

коррозии и окисления.

Выбор присадок происходил по трем параметрам: класс соединения, агрессивность к металлу, способность к смачиваемости поверхности. Последние два параметра являются условием необходимости при выборе присадки. Адсорбция поверхностно-активных веществ (ПАВ), выбранных в качестве присадок, происходит за счет того, что полярные части молекул взаимодействуют с активными центрами твердой поверхности. Процесс хемосорбции насыщает эти активные центры с образованием защитной пленки. Функциональная сульфогруппа в присадке и длинный углеродный скелет обеспечивают технологические эффекты, наблюдаемые у поверхностно-активных веществ. Использование пентавалентного фосфора позволяет образовывать циклические структуры гетерополифосфатов [73].

Фосфор является активным элементом. Фосфорсодержащие соединения, такие как трикрезилфосфат, уже много лет используются в качестве противозадирных и противоизносных присадок. Соединения, такие как дифосфид цинка, добавляются в смазочные материалы в качестве противоизносных присадок. Эти соединения способны формировать защитные пленки на поверхности металла, что приводит к снижению трения и износа при высоких нагрузках и скоростях. Фосфорсодержащие соединения могут быть использованы в качестве трибологических добавок для улучшения смазывающих характеристик смазочных материалов. Они способствуют образованию стабильных пленок на поверхности, что приводит к снижению трения и износа при различных условиях эксплуатации. Фосфорсодержащие присадки могут использоваться как добавки с экстремальным давлением, которые обеспечивают защиту поверхностей от разрушения при высоких нагрузках и точечных контактах. Они формируют на поверхности пленки, которые выдерживают высокие давления и предотвращают механическое разрушение. Некоторые фосфорсодержащие присадки также обладают антикоррозионными свойствами и используются для защиты металлических поверхностей от окисления и коррозии. Они могут также применяться для

предотвращения окисления и деградации смазочных материалов под воздействием высоких температур и окислительных условий. Фосфор и азот соединяются вместе, что должно быть некой перспективной добавкой. Кроме того, гетероциклический эфир фосфорной кислоты обеспечивает низкое загрязнение окружающей среды, высокую термическую стабильность и отличные противоизносные свойства. Противоизносные присадки Р-Н обладают высокой несущей способностью, простой технологией производства и образуют малое количество отходов при производстве. Сульфенол в качестве присадки более привлекателен тем, что обеспечивает высокую совместимость с полимерами и образует большое количество реакционноспособных центров для дальнейших модификаций. Гидрохинон может использоваться в качестве присадки в смазочных материалах благодаря своим антиоксидантным свойствам и способности предотвращать окислительные процессы, которые могут привести к деградации смазки и повреждению поверхностей. Радикалы – это нестабильные молекулы, имеющие один свободный электрон, способные вступать в различные химические реакции с образованием новых связей и разрушением старых. Гидрохинон способен поглощать свободные радикалы и предотвращать окислительные процессы, которые могут привести к окислению смазочного материала и образованию коррозии на поверхностях, что в свою очередь может привести к износу и снижению эффективности смазки. Добавление гидрохинона в смазочные материалы может увеличить их срок службы, предотвращая деградацию масла и образование отложений на механических деталях. Гидрохинон может помочь стабилизировать температуру смазочного материала, предотвращая его перегрев и обеспечивая оптимальные условия смазки, может помочь защитить металлические поверхности от коррозии, что способствует сохранению их целостности и продлевает их срок службы.

Для оценки влияния присадок на триботехнические характеристики были проведены испытания с различными известными концентрациями присадок к СМ и установлены оптимальные значения, при которых вещество выполняет

свои функции. Полученное значение является оценкой предела обнаружения. Испытания проводились по одной и той же методике, концентрации присадок находились в пределах от 0,1% до 5% (таблица 2.2) - концентрации выше и ниже установленной в спецификации нормы содержания.

Таблица 2.2. Концентрации присадок к СМ Пума

Концентрация	Сульфоприсадка	Фосфорприсадка	Гидрохинон
0,1%	0,1 г + 100 г Пума	0,1 г + 100 г Пума	0,1 г + 100 г Пума
0,5%	0,5 г + 100 г Пума	0,5 г + 100 г Пума	0,5 г + 100 г Пума
1%	1 г + 100 г Пума	1 г + 100 г Пума	1 г + 100 г Пума
2%	2 г + 100 г Пума	2 г + 100 г Пума	2 г + 100 г Пума
3%	3 г + 100 г Пума	3 г + 100 г Пума	3 г + 100 г Пума
4%	4 г + 100 г Пума	4 г + 100 г Пума	4 г + 100 г Пума
5%	5 г + 100 г Пума	5 г + 100 г Пума	5 г + 100 г Пума

На (рис.2.2) представлена схема образования защитной пленки с использованием органических соединений с сульфогруппой. В результате увеличения температуры в процессе трения связь C-S разрушается, и поверхность металла покрывается слоем сульфида железа, который защищает сопрягаемые элементы. При контакте с поверхностью металла в рабочих условиях они подвергаются диссоциации, то есть разделению на ионы, включая анионы сульфата. Анионы сульфата адсорбируются на поверхности металла. Этот процесс обусловлен химическими взаимодействиями между анионами сульфата и активными центрами на поверхности металла, такими как атомы металла или ионы металла. Адсорбированные анионы сульфата взаимодействуют с поверхностными оксидными слоями металла, образуя тонкую и стабильную защитную пленку. Эта пленка помогает снизить трение и износ поверхностей металла, предотвращает коррозию и обеспечивает дополнительную защиту от окисления. Формирование защитной пленки также способствует смазыванию поверхностей металла, снижая коэффициент трения и обеспечивая более плавное движение механических деталей.

В качестве присадок использовались: сульфоорганическая присадка марки особо чистая (ОСЧ), фосфорорганическая присадка марки ОСЧ, присадка производного гидрохинона марки ОСЧ.

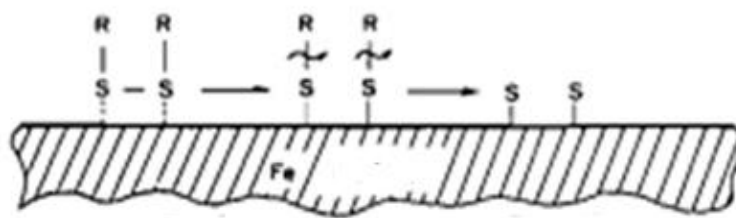


Рисунок – 2.2 Схема образования защитной пленки

Экспериментальные исследования включали изготовление смазочного материала с добавлением различных присадок в соотношении 1 г к 100 г смазочного материала, содержащих в своем составе сульфогруппу $-SO_3R$ и гидрохинон $C_6H_4(OH)_2$, а так же фосфатные группы. Процесс изготовления представлен на рис. 2.3 и рис.2.4.

Для того, чтобы получить нужную структуру смазочного материала, необходимо соблюдать все условия и порядок производства - температуру и время перемешивания компонентов смеси, охлаждение, гомогенизацию, введение присадок. В процессе получения смазок можно использовать готовые загустители и наполнители, но некоторые добавки (например, мыла) могут приготавливаться в общем процессе изготовления самого смазочного материала.

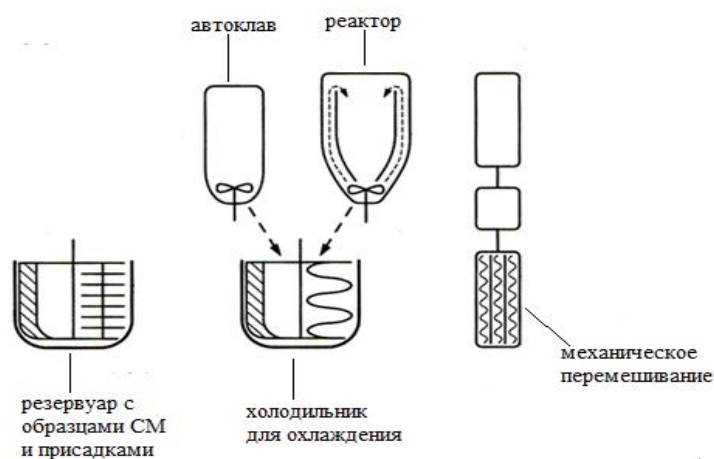


Рисунок 2.3 Реакторы для изготовления смазочного материала

При изготовлении использовался готовый загуститель. Осуществляется интенсивное механическое диспергирование в масле при нагревании.



Рисунок 2.4 Схема процесса изготовления смазочного материала

Процесс добавления загустителя сопровождался постоянным перемешиванием в течение 40 минут и поддержании температуры изготовления. После стадии смешивания смазочного материала и присадок наступает процесс охлаждения смеси, во время которого образуется структура смазочного материала. Смесь для гомогенизации подвергалась механическому взаимодействию для завершения формирования структуры материала.

2.2. Методика проведения теоретических исследований

Теоретическими основами исследования являлись теории граничного трения, теории водородного и механического изнашивания, теории корреляционного исследования, теории адгезии, теории радикалов. Исходными данными для расчета являлись: значение износа поверхностей пары трения (износ гребня и суммарный износ); масса изношенных частиц; интенсивность выделения водорода; графики зависимости износа гребня колеса локомотива от пути трения; вязкость смазочного материала с присадками и графики зависимости динамической вязкости от температуры испытаний; коэффициент трения смазочного материала с присадками; графики зависимости коэффициента трения от вязкости смазочного материала; площадь контакта поверхностей трения (рис. 2.5).

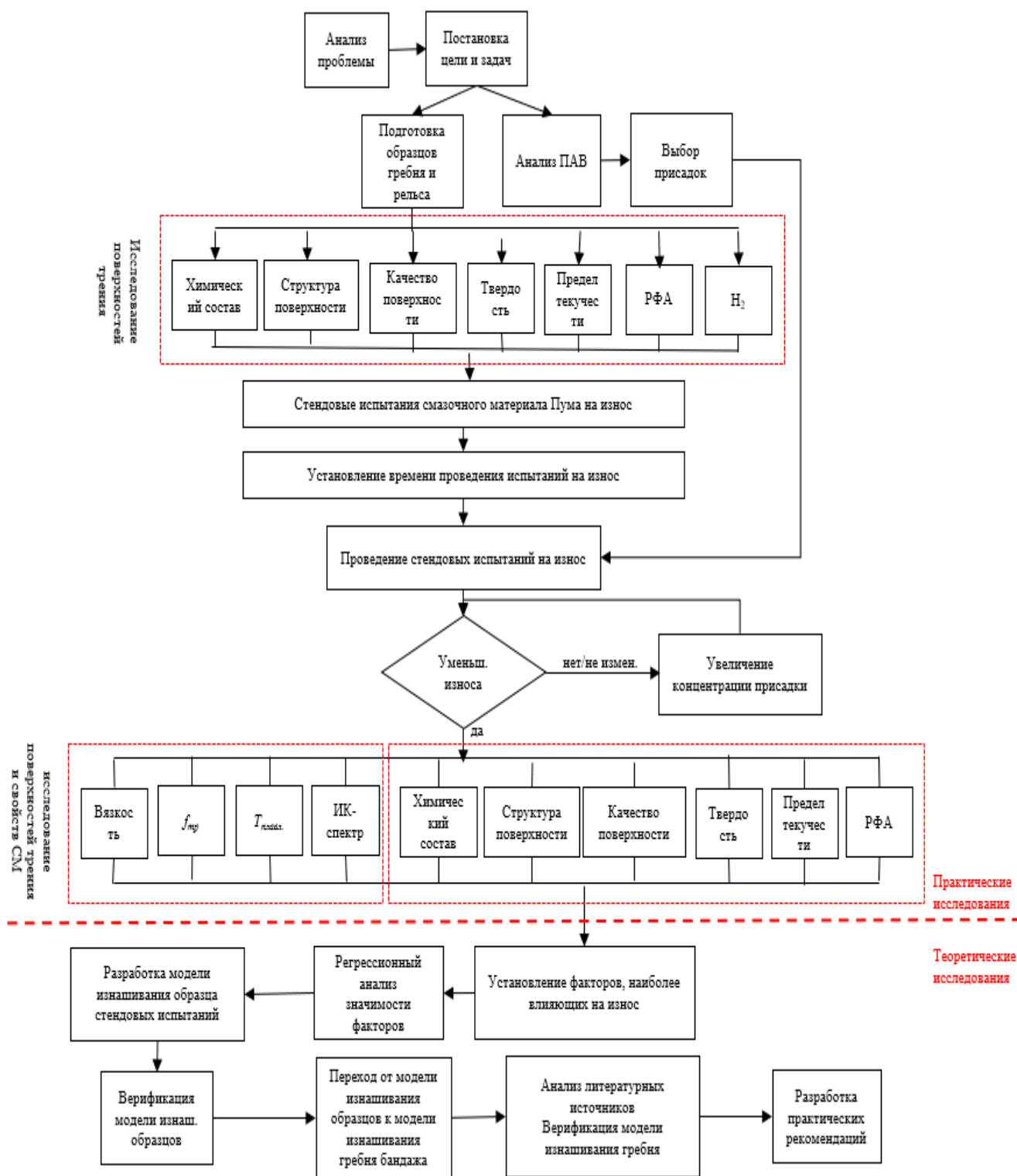


Рисунок – 2.5 Схема проведения исследований

Выходными параметрами в результате расчета являлись: графики зависимости скорости изнашивания от используемой присадки к смазочному материалу, зависимость скорости изнашивания от интенсивности образования диффузионно-активного водорода и динамической вязкости смазочного

материала с исследуемыми присадками.

Так же целью являлось определение факторов, влияющих на скорость изнашивания гребня колеса локомотива. Множественный регрессионный анализ позволяет выявить значимость модели и взаимное влияние факторов друг на друга и на исследуемые параметры. Структурная схема исследований включает следующие этапы:

Выбор базового смазочного материала, относительно используемого узла трения. Правильный выбор смазочного материала – один из ключевых факторов, определяющих работоспособность различных узлов трения в различных средах. Каждый тип узла трения требует индивидуального подхода, чтобы обеспечить его максимальную производительность и долговечность. Когда дело касается базового смазочного материала, важно учесть несколько факторов, которые мы сегодня и рассмотрим. Первым фактором, на который следует обратить внимание, является тип узла трения. Основываясь на типе узла трения (скольжение, качение или смешанное трение), выбирается базовый материал, который обеспечит оптимальные смазывающие свойства для данного типа трения. Например, для узлов с высокими нагрузками и скольжением часто используются масляные смазки на минеральной или синтетической основе с высокой вязкостью, а для узлов с высокими скоростями и качением могут применяться тонкие смазки на основе силикона или полиэфира. Условия эксплуатации, такие как температура, влажность, наличие агрессивных сред и другие факторы, также оказывают влияние на выбор базового материала.

Для работы в условиях высоких температур могут быть предпочтительны смазочные материалы на основе синтетических полимеров или жидких кристаллов, способные сохранять свои свойства при повышенных температурах. В зависимости от величины нагрузок и скоростей в узле трения выбирается смазочный материал с определенными вязкостными и адгезионными характеристиками. При высоких скоростях могут быть предпочтительны тонкие смазочные материалы с низкой вязкостью для снижения потерь на трение и повышения эффективности смазки. Для узлов трения, работающих в

агрессивных средах или подверженных воздействию влаги и коррозии, важно выбирать смазочные материалы с высокой коррозионной стойкостью. В этом случае могут использоваться специализированные смазки с добавлением ингибиторов коррозии или защитных пленок. Базовый смазочный материал должен быть рассчитан на высокие давления, чтобы предотвратить поломки и обеспечить надежную работу узла трения на протяжении всего срока службы. Ведущая присадка для смазочных материалов, таких как моторное масло, должна обеспечить защиту от окисления и предотвратить образование осадков и отложений. Это обеспечит улучшенную производительность двигателя. Стойкость к износу критически важна для снижения трения и уменьшению износа поверхностей, на которых существует соприкосновение. Присадки, которые формируют плотную пленку на поверхности, помогут минимизировать износ и увеличить срок службы оборудования. Виды техники, работающие в экстремальных условиях, например, при низких или высоких температурах, подвержены деградации смазочного материала. Поэтому присадки должны быть стабильными в широких диапазонах температур, чтобы обеспечить эффективное смазывание при любом климате. Подбор присадок, которые предотвращают накопление пены, поможет сохранить качество смазывания и, следовательно, долговечность вашей техники.

Изготовление образцов смазочного материала с присадками. Химические добавки придают смазке специфические свойства, такие как защита от окисления, снижение трения или улучшение снижения вязкости. Подбор оптимальных присадок помогает усилить черты исходной смазки и соответствовать требованиям конкретного применения.

Определение количества диффузионно-активного выделившегося водорода с помощью установленного датчика и разности водорода прошедшего через трубу и в окружающей среде. Диффузионно-активный водород является весьма активным атомом. Адсорбированный водород может диффундировать в глубь металла в результате механической работы или приложенных напряжений. Этот процесс способствует миграции водорода внутрь металла и его

распределению в зоне контакта. Водород, диффундирующий в металл, может вызывать образование микропор и микротрещин в структуре материала. Это может привести к ослаблению механических свойств металла и ускорению процессов изнашивания. Износ поверхностей - это процесс, при котором поверхность теряет свою первоначальную структуру и качество из-за контакта с другими материалами или различными воздействиями. Взаимосвязь между износом поверхности и выделением диффузионно-активного водорода имеет базовое значение для таких отраслей, как машиностроение, авиация, энергетика. Когда поверхность изнашивается, ее свойства могут меняться, что часто приводит к образованию трещин, покрытий или внутренних дефектов. Это может существенно повлиять на взаимодействие материала с окружающими субстанциями. Кроме того, изношенные поверхности могут увеличить выделение диффузионно-активного водорода. Водород может вступать во взаимодействие с другими элементами или соединениями, вызывая коррозию и разрушение материала. Взаимодействие водорода с активными участками металлической поверхности может привести к образованию новых соединений, таких как гидриды, которые могут изменять механические свойства поверхности и способствовать ее разрушению.

Исследование физико-химических свойств смазочного материала является одним из основополагающих пунктов в экспериментальной части работы. Смазочный материал представляет собой композитный слой, который выполняет три функции: он передает нагрузку, разделяет поверхность колеса и поверхность рельса, а также учитывает разницу в их скоростях. Коэффициент трения на границе раздела колесо/рельс тесно связан с реологическими свойствами составляющих третьего тела. Наиболее значимым свойством является вязкость. Вязкость смазочного материала влияет на трение и износ деталей механизмов, на его проникающую способность к локальным зонам соприкосновения. Второе свойство - это стабильность химического состава. Смазочный материал должен быть не только стабилен при высоких температурах и вибрациях, но и устойчив к окислительному разрушению.

Подобное свойство обеспечивает долговечность и надежность работы механизмов. Не менее важными являются следующие свойства: антикоррозионная защита, моющая способность, антифрикционные характеристики и стабильность в процессе работы.

Исследование состава и структуры и физических свойств поверхности гребня и рельса в зоне контакта. Взаимодействие между поверхностью колеса и поверхностью рельса приводит к возникновению двух основных механизмов разрушения: износа и усталости. Первый создает абразивные частицы и изменяет профиль рельса/колеса, второй – трещины, которые могут перерасти в катастрофические разрушения. Важно отметить, что эти два механизма разрушения могут взаимодействовать между собой и усиливать друг друга. Характер износа и условия трения в месте контакта колеса с рельсом зависят от взаимного расположения колеса и рельса. Поверхность гребня колеса/рельсовой колеи подвержена скольжению с проскальзыванием между поверхностями в диапазоне от 0,5 до 10 мм. Как следствие, при отсутствии смазки образуются крупные металлические пластинчатые частицы размером до 2 мм. В результате коэффициент трения высок (0,4–0,6), а скорость износа рабочей поверхности значительна.

2.3. Методика проведения экспериментальных исследований

2.3.1 Характеристики узла трения

Для определения качественного состава смазочного материала и его влияния на состав и структуру поверхностей трения, были проведены физико-химические исследования.

В качестве анализируемого образца был использован рельс марки Р65, в качестве контролобразца использовался материал бандажа на тепловозах типа ТЭМ. Анализ позволил выявить несколько ключевых особенностей и преимуществ использования такого типа рельсов: рельсы марки Р65 обладают высокой прочностью, что делает их идеальным выбором для тяжелых нагрузок

в грузовых составах. Они способны выдерживать значительные давления и удары, обеспечивая безопасность и надежность в процессе эксплуатации. Исследования показали, что рельсы Р65 имеют повышенную износостойкость. Благодаря высокой производительности и длительному сроку службы, рельсы марки Р65 могут значительно снизить операционные расходы, связанные с обслуживанием железнодорожного транспорта.

Исследования включали предварительную обработку образцов рельса и контртела, а так же подготовка смазочного материала и присадок к нему. Образцы (рис.2.6, рис. 2.7) вырезались из рельса и бандажа на станке РМ5ГМ так, чтобы исследуемые поверхности остались неизменными.

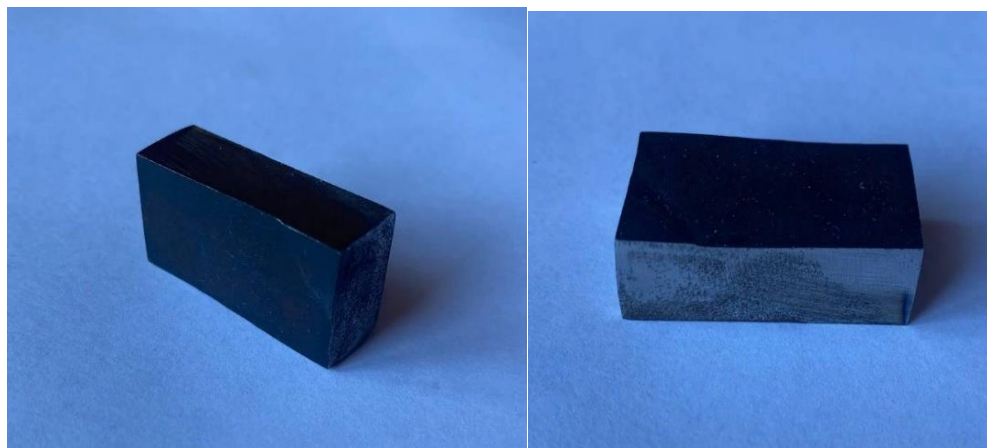


Рисунок –2.6 Образцы колеса локомотива



Рисунок – 2.7 Образец контртела -рельс

Исследования, которые проводились в данной работе, включали в себя следующие этапы. На первом этапе осуществлялся выбор базового смазочного

материала. Подбор присадок к смазочному материалу на основе установленных критериев – агрессивность, смачиваемость и класс соединений. В качестве первичных образцов были выбраны соединения, содержащие в себе сульфогруппу, фосфатную группу, карбонильную и амидную, а так же использовалось соединение гидрохинона, как поглотителя радикалов. Изготовление образцов смазочного материала с присадками с использованием механического интенсивного перемешивания и эмульгирования.

После получения образца смазочного материала с присадками, проводились испытания на износ с параллельным определением количества диффузионно-активного выделившегося водорода с использованием выбранных присадок для определения взаимосвязи износа поверхности и выделения диффузионно-активного водорода.

Определение физико-химических свойств смазочного материала с выбранными присадками и исследование состава и структуры и физических свойств исследуемых поверхностей трения – гребень колеса локомотива и рельс с помощью инструментальных методов исследования.

2.3.2 Приборы и оборудование для определения свойств материалов

Испытания на износ проводились по схеме [123], показанной на рис. 2.8. Установка представлена на рис. 2.9. Машина трения содержит электродвигатель [123]. В стойке имеется отверстие для выхода вала электродвигателя. На валу электродвигателя установлена втулка и захват, состоящий из двух одинаковых частей, в который установлено кольцо.

Кольцо помещается в испытуемый смазочный материал в зависимости от условий эксплуатации. Втулка обеспечивает отсутствие контакта между захватом и стойкой. На стойке закреплен рычаг, который служит для нагружения образца в процессе испытаний.

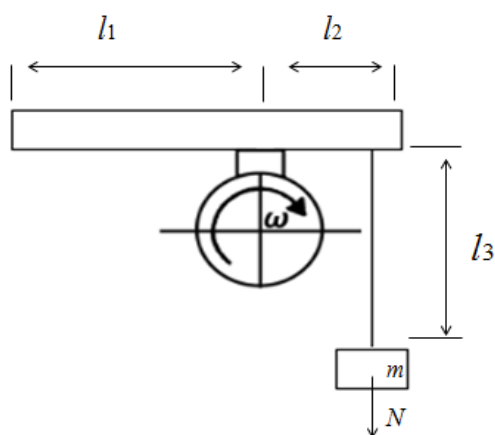


Рисунок – 2.8 Схема испытаний

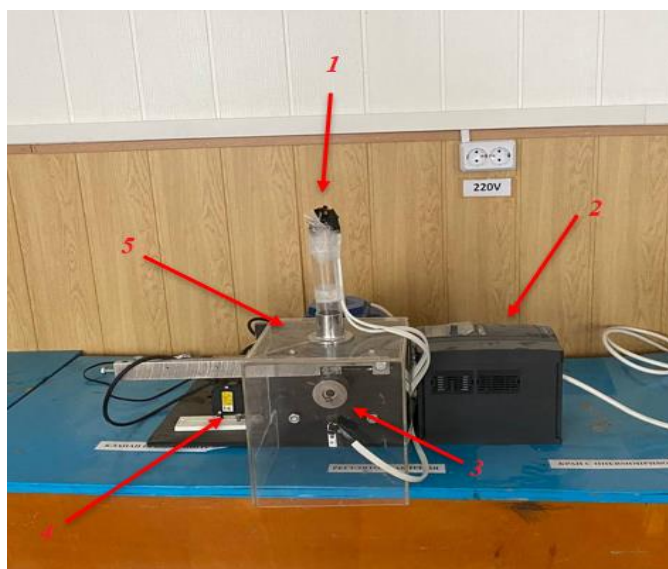


Рисунок – 2.9 Машина трения: 1– труба с датчиком определения выделяющегося водорода; 2 – электродвигатель; 3 – пара трения гребень-рельс; 4 – датчик определения износа; 5 – камера проведения испытаний на определение водорода

На рычаге закреплен лазерный датчик расстояния (рис.2.10, а), луч датчика направлен на кольцо в место трения образца по контртелу. К стойке прислонен кожух, выполненный из прозрачного оргстекла с отверстием с трубой [Приложение 1]. Температура в зоне трения контролируется бесконтактным датчиком температуры, направленным в зону трения. В трубе кожуха установлен датчик водорода (рис. 2.10, б).



а) датчик определения суммарного износа



б) датчик определения водорода

Рисунок – 2.10 Датчики экспериментальной установки

За счет разницы температур окружающей среды и в зоне трения образуется тяга водорода, которая улавливается датчиком. Для нивелирования погрешности установка снабжена датчиком водорода, который измеряет его концентрацию в помещении [123]. Также установка снабжена датчиками температуры, давления, износа образца и суммарного износа пары трения. Это позволяет измерять количество диффузионно-активного водорода в исследуемом и смазочном материалах в процессе испытаний и сопоставлять данные износа h и интенсивности изнашивания I_h с количеством выделившегося диффузионно-активного водорода $prmt$ и оценивать его влияние на износ, с учетом температуры t и давления P в зоне трения.

Датчик расстояния ZX1 показывает суммарный износ пары трения образец-контртело. Характеристика датчика представлена в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Характеристики датчика Omron

Параметр	Датчик расстояния ZX1
Расположение до контролируемой поверхности, мм	65...135
Диапазон измерений	0...60 мм
Гистерезис, %	0,01
Точность, 0С	-
Разрешение	0,002 мм
Рабочая температура, 0С	-30...+50

Суммарный износ I_h определяют при постоянной нагрузке, установленной в нормативно-технической документации на смазочный материал.

Испытания проводились при массе грузов 6 кг, что с учетом системы рычагов позволило получить нагрузку 108 Н. В процессе триботехнических исследований контролировали содержание водорода в камере машины трения с

одновременной непрерывной регистрацией триботехнических характеристик. Испытание каждого материала проводилось в течение 10 минут. Снятие показаний с датчиков осуществлялось через 1 минуту. Вхождение локомотива в криволинейный участок пути (момент удара гребня колеса локомотива о боковую поверхность рельса) имитировалось поднятием и броском рычага с подвешенными грузами.

Диффузионно-активный водород считается как разность водорода прошедшего через трубу и присутствовавшего в окружающей среде:

$$ppm_{H_2} = ppm_{изм} - ppm_{окр}$$

Интенсивность изнашивания определялась по формуле:

$$I_h = \frac{h}{L},$$

где h – линейный износ, мкм; L , мм – путь трения. Расчет скорости изнашивания проводился по выражению:

$$V_h = \frac{h}{t},$$

где h – суммарный нарастающий износ, t – время.

Для определения трибологических свойств смазочного материала были проведены испытания на маслоиспытательной машине КТ-2 по ГОСТ 23.221-84. (рис. 2.11).



Рисунок – 2.11 Маслоиспытательная машина КТ-2

Перед проведением исследования все детали маслоиспытательной машины были обработаны растворителем, чтобы удалить смазочный материал, затем их просушили на воздухе. Так же были обработаны шарики для испытаний. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью $\sim 4^\circ\text{C}$ в минуту. Коэффициент трения оценивался в течение 60 с через каждые 10°C . Осевая нагрузка на узел трения составляла 108 Н [159, 161]. Для проведения испытаний необходимо поддерживать температуру в зоне трения и не превышать его время разогрева.

Продолжительность работы КТ-2 составляет 60 ± 05 минут для каждого материала. Для более точных данных соблюдался стабильный режим трения. Чтобы определить показатель износа смазочного материала Пума и добавленных к нему присадок, для каждого образца была проведена серия измерений [161]. После каждого нового измерения смазочного материала с присадкой проводилась процедура обработки деталей маслоиспытательной машины КТ-2. Установка позволяет получить зависимость коэффициента трения от температуры, значение диаметра пятна износа.

Для определения диффузии химических элементов смазочного материала в детали пар трения в процессе испытаний на износ проводился спектрометрический анализ образцов на приборе Искролайн (рис.2.12) до проведения испытаний и после их завершения.

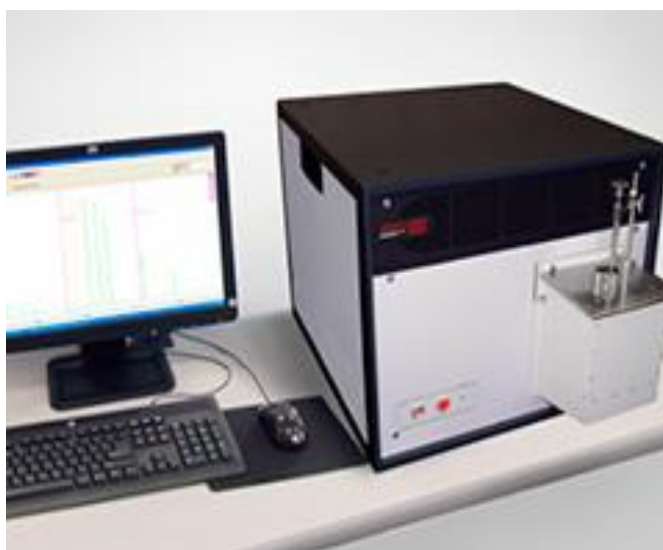


Рисунок – 2.12 Спектрометр Искролайн-100

Данный прибор предназначен для проведения быстрого и точного спектрального анализа металлов и сплавов с различными основами, такими как железо (Fe), алюминий (Al), медь (Cu), цинк (Zn), свинец (Pb), олово (Sn), сурьма (Sb), никель (Ni), титан (Ti), кобальт (Co), магний (Mg). Он обеспечивает доступ ко всем спектральным линиям в диапазоне от 167 до 460 нм, включая линии фосфора, серы и углерода, с разрешением от 0.02 до 0.03 нм. Спектрометр Искролайн 100 позволяет проводить анализ состава металлов и сплавов, включая в каждый режим работы собственную методику измерения и первичную подготовку образцов. Принцип работы спектрометра основан на методе эмиссионного анализа, использующий зависимость интенсивности спектральных линий от содержания элемента в пробе.

Исследование структуры поверхности проводилось на микроскопе Leica DM (рис.2.13) после травления образцов гребня колеса и рельса в азотной кислоте для снятия продуктов окислов и коррозии. Образец погружали в 3% раствор азотной кислоты, вынимали и переворачивали для равномерного растекания реактива по поверхности. Соотношение объемов реактива и образца составляло 1,2-2,5.



Рисунок 2.13 Микроскоп Leica DM для определения структуры материала

Статические характеристики определялись на стенде ЦДМ-200пу с

нагрузкой $P_{\max}=8050$ кг/силы.

Определение твердости материала гребня колеса локомотива и рельса проводилось на стационарном твердомере по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 24622, ГОСТ 23677, ГОСТ 10242 (рис.2.14). Для проведения эксперимента выбирали подходящую шкалу для материала (А, В или С). Устанавливали индентор и выбранную нагрузку, для правильности установки проводили 2 пробные проверки. После проверки устанавливали измеряемый материал на столик прибора, выбирали основную нагрузку и прикладывали до максимального усилия. Шкала показывала на экране значение твердости.



Рисунок – 2.14 Стационарный твердомер по Роквеллу

Определение шероховатости поверхности гребня колеса локомотива проводилось на приборе БВ7669М (рис.2.15)



Рисунок – 2.15 Установка для определения шероховатости поверхности

Продукты износа, содержащиеся в смазочном материале, оценивались с помощью ИК-спектроскопического анализа исходного смазочного материала и отработанного на лабораторном спектрометре ФСМ 1201 (рис.2.16, а) на приставке многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО) (рис.2.16, б).



а) ИК Фурье-спектрометр ФСМ 1201 б) приставка МНПВО

Рисунок – 2.16 Аппаратура для проведения инфракрасной спектроскопии

Принцип работы ИК Фурье-спектрометра основан на использовании двухлучевого интерферометра Майкельсона. В этой системе оптическая разность хода изменяется за счет перемещения (сканирования) одного из зеркал внутри интерферометра. Исходное оптическое излучение от источника проходит через интерферометр, где происходит регистрация интерферограммы, отображающей зависимость интенсивности светового потока от оптической разности хода. Для получения спектра, представляющего зависимость интенсивности излучения от волнового числа, применяется обратное преобразование Фурье интерферограммы [36, 37]. Оптическая разность хода определяется с помощью референтного канала, регистрирующего интерферограмму излучения He-Ne лазера на том же интерферометре. Спектр нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) очень похож на обычный спектр поглощения в ИК-диапазоне. Спектр НПВО возникает в результате нарушения условий полного внутреннего отражения в оптической системе. Это происходит, когда свет пытается перейти из более плотной среды в менее плотную под углом, превышающим критический угол. В этом случае свет не

отражается полностью, а частично проникает в менее плотную среду. В результате этого происходит интерференция и отражение света, что приводит к образованию спектра НПВО. Для идентификации образцов смазочного материала методом многократного нарушенного полного внутреннего отражения образец наносился на поверхность призмы из селенида цинка, данный метод позволяет получить хороший не искаженный спектр. Метод НПВО представляет собой разновидность спектроскопии. Принцип действия данного метода заключается в том, что излучение, пройдя через образец, отражается от зеркальной поверхности, снова попадает на образец и уже после этого сигнал идет в детектор. Часть падающего излучения попадает на образец и там поглощается соответствующими для данного колебания длинами волн. В результате данный метод носит название «нарушенного полного внутреннего отражения».

Эффективность и реологические свойства смазочного материала с различными присадками и загустителями проявляются по-разному. Поэтому, был проведен анализ смазочного материала Пума с исследуемыми присадками: сульфосоединение, производное гидрохинона, фосфорорганическое соединение. Определение вязкостных свойств смазочного материала осуществлялось на установке Vero Viscosimeter SV-100 (рис.2.17).



Рисунок – 2.17 Автоматический вискозиметр Vero Viscosimeter SV-100

Также в ходе испытаний происходил первоначальный нагрев смазочного материала и показания датчика записывались при изменении шкалы термометра на 1°C до комнатной температуры. Для проведения экспериментальных исследований, готовили базовый смазочный материал, в который добавляли присадки [153-161].

Физико-химические свойства пары трения являются важными характеристиками в условиях эксплуатации. Среди множества физических и химических методов анализа состава и других характеристик пленок и пленочных покрытий хорошо зарекомендовал себя метод рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) (рис.2.18). Его основные преимущества заключаются в скорости и отсутствии разрушения образца. Интенсивности аналитических линий рентгеновского спектра не зависят от толщины образца d , если она превышает толщину насыщенного или толстого излучающего слоя dh [103]. В противном случае наблюдается зависимость, и по интенсивности вторичного излучения можно оценить толщину пленки или

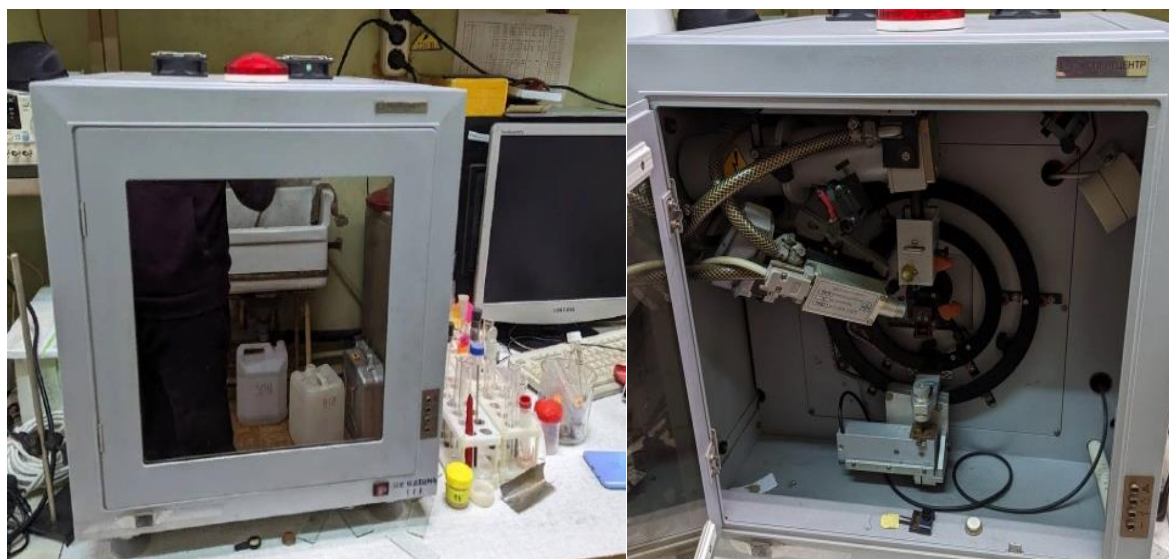


Рисунок – 2.18 РФА спектрометр Renom

покрытия. Для тонких плёнок анализ определения химического состава или толщины приведен в работах [9, 12, 187]. Определение качества поверхности гребня осуществлено на рентгено-флуоресцентном спектрометре.

Выводы к главе 2

1. Принята методика проведения теоретических и экспериментальных исследований по повышению износостойкости гребня колеса локомотива путем исследования присадок в смазочный материал, наносимый на гребень.
2. Разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая определять износ материала бандажа колеса локомотива в установленных условиях работы с использованием смазочного материала и присадок к нему.
3. Подобраны присадки поверхностно-активных веществ к смазочному материалу на основе важных требований, таких как: класс соединения, агрессивность к металлу, способность к смачиваемости поверхности. Последние два параметра являются условием необходимости при выборе присадки.
4. Определены концентрации присадок ПАВ, при которых наблюдается противоизносный эффект.
5. Метод инфракрасной спектроскопии смазочного материала позволяет выявить наличие характеристических частот смазочного материала и выбранных присадок до и после испытаний на машине трения с целью определения частоты колебаний функциональных групп, которые отвечают за состав смазочного материала. С помощью данного метода можно определять качественный состав смазочного материала с присадками с указанием функциональных групп, отвечающих за свойства.
6. Выбранные методики исследования химического состава материала бандажа колеса локомотива (атомно-эмиссионная спектрография и рентгено-структурный анализ) позволяют определить состав материала до и после испытаний на износ и выявить процентное содержание элементов, которые удаляются с поверхности в процессе трения.

Глава 3. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УЗЛА ТРЕНИЯ ГРЕБЕНЬ-РЕЛЬС

3.1 Моделирование процесса изнашивания гребня колеса локомотива

Схема контакта гребня бандажа и рельса можно представить как контакт двух тел при наличии слоя смазочного материала.

Несмотря на наличие микронеровностей, таких как шероховатость и больших значений давления гребня на рельс, толщина смазочного слоя является достаточной для заполнения микронеровностей. Однако, она может оказаться недостаточной для перекрытия макроотклонений, что, однако регламентируется стандартами РЖД. Таким образом, при моделировании контакта гребень-рельс шероховатостью можно пренебречь.

Предположим, что при входе локомотива в криволинейный участок железнодорожного пути наиболее опасное явление возникает при контакте колесной пары с внешним рельсом (рис.3.1), так как центробежные силы на внешнем рельсе максимальны.

Суммарное давление на рельс P_r в таком случае складывается как сумма векторов центробежного и рамного давлений $P_r = P_p + P_{\text{ц}}$ (рис.3.2).

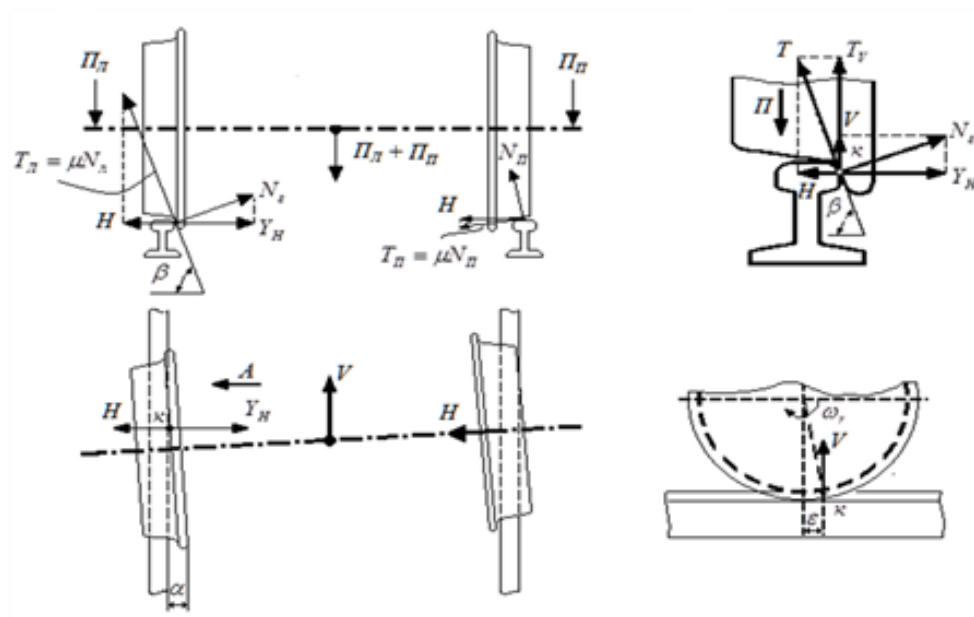


Рисунок – 3.1. Силы, действующие в криволинейном участке железнодорожного пути

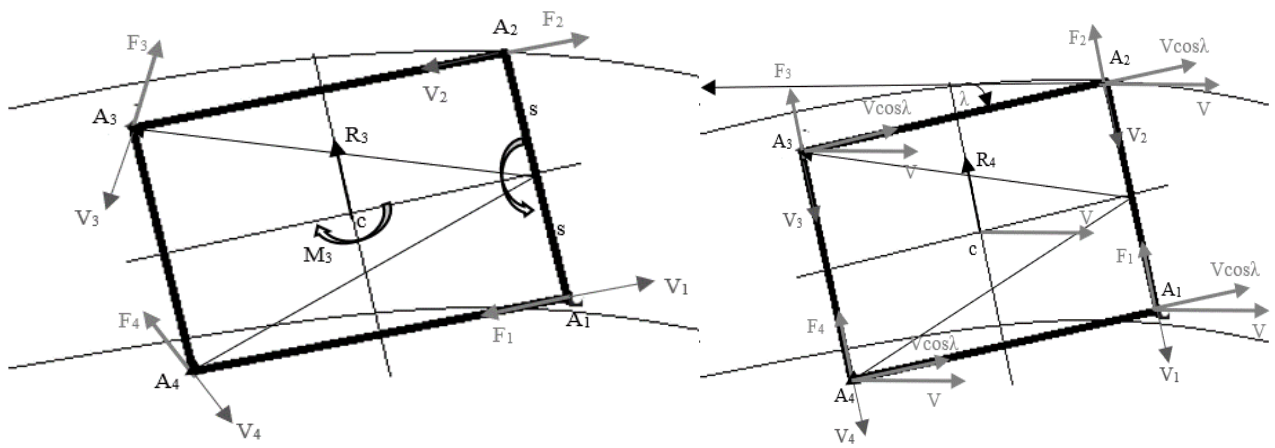


Рисунок – 3.2 Касательные силы в точках контакта колес и рельсов за счет относительного движения тележки (дополнительные внешние силовые факторы)

Несомненно, что ключевыми факторами при определении давления гребня на рельс будут являться скорость входа локомотива $v_{вх}$ в криволинейный участок пути, масса состава m и радиус криволинейного участка, тогда в первом приближении давление гребня на рельс можно определить:

$$Pr = R_3 + R_4 + m_T a_T \ddot{\lambda} \quad (3.1)$$

где R_3 — вектор, направленный перпендикулярно продольной оси тележки наружу кривой, R_4 — модуль равнодействующих сил; m_T — масса тележки; a_T — половина жесткой базы тележки; $\ddot{\lambda}$ — угловая скорость разворачивания тележки в рельсовой колее.

Давление при стендовых испытаниях можно рассчитать по выражению:

$$P_r = \frac{F}{S}, \quad (3.2)$$

где F — сила, действующая на образец, S — номинальная площадь контакта.

Площадь контакта S определим из теории Герца для пары цилиндр-плоскость (рис.3.3):

$$S = 1,52 \cdot \frac{P}{E} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}, \quad (3.3)$$

где P — нагрузка при испытаниях на машине трения, E — модуль упругости, R_1, R_2 — радиусы поверхностей трения образца и контртела. Откуда $S = 284 \cdot 10^{-5}$ мм. Таким

образом, давление в зоне контакта $P=70,32/284 \cdot 10^{-8} \cdot 55 \cdot 10^{-3}=4,502 \cdot 10^8$ Па.

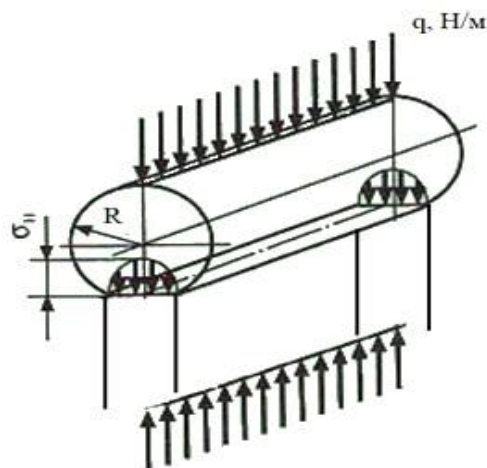


Рисунок – 3.3 Площадь контакта пары цилиндр-плоскость

В связи с тем, что согласно нормальным требованиям стойкость смазочного материала зоны контакта колесо-рельс при его однократном нанесении должна составлять не менее 15000 пропущенных осей подвижного состава [134], одним из критериев его эффективности может являться скорость изнашивания гребня колеса локомотива. Тогда моделирование скорости изнашивания можно осуществить на основе теории подобия.

Наличие трех тел в зоне контакта при рассмотрении факторов, оказывающих влияние на скорость изнашивания, позволил выделить четыре критерия подобия: $v_1=f(\pi_i)$ при $i=s$.

К определяющим факторам отнесем P – давление гребня на рельс (максимальное) в криволинейном участке пути; $KС$ – ударная вязкость более мягкого материала (бандажа); характеристики смазочного материала: η – динамическая вязкость, τ – напряжение сдвига в пластичном смазочном материале; условия протекания процесса изнашивания: L – путь трения, V – объем, отделяемый в процессе изнашивания, v – скорость изнашивания.

Направление сдвига смазочного материала или предел прочности – это удельное напряжение, при котором происходит разрушение его структурного каркаса в результате сдвига одного слоя относительно другого. Под воздействием катящихся колес формируется циклическое напряжение сжатия –

растяжения внутри материала, что приводит к накоплению пластической деформации под поверхностью и возникновению остаточных напряжений. Этот процесс становится причиной появления различных видов дефектов, связанных с контактной усталостью, как в колесах, так и в рельсах [46, 47].

Для определения числа независимых решений воспользуемся π -теоремой Бакингема. С учетом того, что критерии подобия являются величинами нулевой размерности, то решение имеет вид:

$$\begin{cases} -z_1 - z_2 + 3z_3 + z_4 - z_5 + z_6 = 0 \\ z_1 + z_2 + z_5 + z_6 = 0 \\ -2z_1 - 2z_2 - z_5 - 2z_6 - z_7 = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Здесь $z_1 \dots z_n$ показатели степени. Для данного уравнения были использованы три основные единицы ($[L][M][T]$), $r=3, n=7$

$$P=[\text{Па}] = [\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}] = [\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}] = [\text{L}^{-1} \text{MT}^{-2}]$$

$$KC=[\text{кДж} \cdot \text{м}^{-2}] = [\text{Н} \cdot \text{м} / \text{м}^2] = [\text{кг} / \text{с}^{-2}] = [\text{MT}^{-2}]$$

$$\tau=[\text{Па}] = [\text{L}^{-1} \text{MT}^{-2}]$$

$$\eta=[\text{Па} \cdot \text{с}] = [\text{L}^{-1} \text{MT}^{-1}]$$

$$V = [\text{L}^3]$$

$$v = [\text{м/с}] = [\text{LT}^{-1}]$$

Далее, с учетом размерностей и приведенных значений, представим каждый фактор в виде:

	<i>M</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
<i>P</i>	1	-1	-2
τ	1	-1	-2
<i>V</i>	0	3	0
<i>L</i>	0	1	0
η	1	-1	-1
<i>KC</i>	1	0	-2
<i>f</i>	0	0	0
<i>I_{h2}</i>	0	0	0
<i>v</i>	0	1	-1

	M	L	T
P/KC	0	-1	0
η/τ	0	0	1
L	0	1	0
V	0	3	0
ν	0	1	-1

Выберем три фактора, определитель размерностей которых $\neq 0$

	M	L	T
KC	1	0	-2
η	1	-1	-1
L	0	1	0

$\pi_1 = P/KC^\alpha \cdot \eta^\beta \cdot L^\gamma$, тогда $(MT^{-2})^\alpha \cdot (ML^{-1}T^{-1})^\beta L^\gamma = ML^{-1}T^{-2}$. При M: $\alpha + \beta = 1$, L: $\beta = -1$, отсюда $\alpha = 1$, $\beta = 0$.

$\pi_2 = V/KC^\alpha \eta^\beta L^\gamma$, $L^3 = (MT^{-2})^\alpha (ML^{-1}T^{-1})^\beta L^\gamma$, при M: $0 = \alpha + \beta$, L: $3 = -\beta + \gamma$, T: $0 = -2\alpha - \beta$. Отсюда $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\gamma = 3$. $\pi_2 = V/L^3$

$\pi_3 = \rho / KC^\alpha \eta^\beta L^\gamma$, $(ML^{-3}) = (MT^{-2}) \cdot (ML^{-1}T^{-1})^\beta L^\gamma$, при M: $1 = \alpha + \beta$, L: $-3 = -\beta + \gamma$, T: $0 = -2\alpha - \beta$. Отсюда $\alpha = -1$, $\beta = 2$, $\gamma = -1$. $\pi_3 = \rho \cdot KC \cdot L / \eta^2$

Перепишем полученные значения анализа размерностей через матрицу.

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & +3 & +1 & -1 & 0 & +1 \\ +1 & +1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ -2 & -2 & 0 & 0 & -1 & -2 & -1 \end{vmatrix} = A.$$

Транспонируем матрицу A. $A_T = B$.

Для определения ранга матрицы B приведем ее к ступенчатому виду. Первую строку делим:

$$\begin{array}{ccc} -1 & 1 & 2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{array}$$

Ко второй строке добавляем первую строку, умноженную на 1. От третьей

строки отнимаем первую строку, умноженную на 3. От четвертой строки отнимаем первую строку, умноженную на 1. К пятой строке добавляем первую строку, умноженную на 1. От седьмой строки отнимаем первую строку, умноженную на 1. Тогда:

$$\begin{array}{ccc} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & -6 \\ 0 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -3 \end{array}$$

Поменяем вторую и третью строку местами:

$$\begin{array}{ccc} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 3 & -6 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -3 \end{array}$$

Вторую строку делим на треть:

$$\begin{array}{ccc} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & -3 \end{array}$$

От четвертой строки отнимаем вторую строку, умноженную на 1. От шестой строки отнимаем вторую строку, умноженную на 1. От седьмой строки отнимаем вторую строку, умноженную на 1.

$$\begin{array}{ccc} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{array}$$

Поменяем третью и пятую строки местами:

$$\begin{array}{ccc}
1 & -1 & 2 \\
0 & 1 & -2 \\
0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & -1
\end{array}$$

К седьмой строке добавляем третью строку, умноженную на 1:

$$\begin{array}{ccc}
1 & -1 & 2 \\
0 & 1 & -2 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0
\end{array}$$

Так как ненулевых строк 3, ранг матрицы равен 3. $\text{Rank}(B)=3$ Тогда число независимых решений s можно определить по выражению $S=n-r$, где n - число факторов, r -ранг матрицы. Откуда $s=7-3=4$.

Система уравнений (2) имеет единственное решение если определитель матрицы B не равен нулю.

Для нахождения определителя используем минор C матрицы B :

$$C = \begin{array}{ccc} 1 & -1 & 2 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{array}, \text{ тогда}$$

$$\det = 1 \cdot 1 \cdot 1 + (-1) \cdot (-2) \cdot 0 + 2 \cdot 0 \cdot 0 - 2 \cdot 1 \cdot 0 - 1 \cdot (-2) \cdot 0 - 1 \cdot 0 \cdot 1 = 1$$

С учетом того, что определитель не равен нулю $\det C \neq 0$, найдем критерий π , из выражения (3), откуда:

$$\pi_1 = \frac{P\tau V}{L\eta K C v} \quad (3.5)$$

Проведя анализ выражения (3.5) нетрудно заметить, что отношение объема изнашенного материала V на путь трения L представляет собой объемную интенсивность изнашивания $I_v = \frac{V}{L}$. Отношение давления к ударной вязкости K_c характеризует способность материала разрушаться при ударных нагрузках. Направление сдвига τ отнесенное к произведению вязкости и скорости скольжения определяет несущую способность смазывающего материала [156].

Учитывая нулевую размерность критериев подобия можно записать

$$\pi_1(v) = 1$$

$\frac{P\tau V}{L\eta K C v} = 1$, откуда с учетом критериев π_2, π_3, π_4 :

$$v = \frac{P\tau V}{L\eta K C} f(\pi_2) f(\pi_3) f(\pi_4)$$

Очевидно, что в рассматриваемой системе гребень-рельс критерий π_2 должен характеризовать процесс трения, тогда $f(\pi_2)=f_{тр}$. Немаловажную роль играет механизм процесса изнашивания, на который, как широко признается [105–107, 135–138], существенное воздействие оказывает водород и водородное изнашивание.

Тогда критерий π_3 можно записать, как характеристику активности водорода в зоне трения $f(\pi_3)=I_{H_2}$, где I_{H_2} – интенсивность выделения диффузионно-активного водорода в зоне трения.

Критерий π_4 характеризует отклик системы и может быть определен эмпирически. Тогда скорость изнашивания гребня бандажа:

$$v = f_{тр} \frac{P\tau V}{L\eta K C} I_{H_2} f(\pi_4) \quad (3.6)$$

По результатам лабораторных испытаний на износ пары трения гребень-рельс получены значения скорости изнашивания для смазочного материала Пума приведенные в табл.3.1

Проведем расчет по выражению (3.6) для условий проведенных испытаний. Максимальное время испытаний составило 10 мин=600 с на пути трения $L=94,2$ м. Давление в зоне контакта определим по выражению (3.1).

Таблица 3.1 Скорость изнашивания для смазочного материала Пума с присадками

Смазочный материал	v , м/с
Пума	$3 \cdot 10^{-7}$
Сульфоприсадка	$3,05 \cdot 10^{-9}$
Фосфорорганическая присадка	$3,12 \cdot 10^{-9}$
Гидрохинон	$3,06 \cdot 10^{-9}$

Площадь контакта S определим из теории Герца для пары цилиндр-плоскость. Интенсивность выделения диффузионно-активного водорода в

процессе испытаний на пути трения L определялась по выражению:

$$I_{H2} = \frac{dH_2}{dL} \quad (3.7)$$

При этом параметр I_{H2} принимается безразмерным. Здесь d_{H2} – увеличение в концентрации выделившихся газов водорода ppm. Объем изношенного материала определим как фактор свойств материала. Тогда $V = \frac{dm}{\rho}$, где dm – изменение массы частиц износа, ρ – плотность материала г/см³.

Плотность бандажной стали $\rho=7850$ кг/м³, масса частиц износа dm примем 27 мг, тогда объем изношенного материала $V=1,4 \cdot 10^{-6}$. Ударная вязкость бандажа определяется по ГОСТ 398-96 и равна $KC=0,2$ Дж/см², вязкость смазочного материала Пума $\eta=10$ Па·с, коэффициент трения при температуре $t=50^\circ\text{C}$ равен $f_{\text{тр}}=0,08$, напряжение сдвига $\tau=330 \cdot 10^6$ Па по заявленному производителем [159, 160].

Подставив значения в выражение (3.6) получим $v=3,02 \cdot 10^{-7} f(\pi_4)$ м/с. Экспериментальные исследования позволили получить следующее значение скорости изнашивания $v_{\text{экс}}=3 \cdot 10^{-7}$ м/с. Анализируя результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований становится очевидно, что критерий $\pi_4=10^{-9}$:

$$v = f_{\text{тр}} \frac{P\tau V}{L\eta KC} I_{H2} \cdot 10^{-9} \quad (3.8)$$

Таким образом, давление в зоне контакта $P=70,32/284 \cdot 10^{-8} \cdot 55 \cdot 10^{-3}=4,502 \cdot 10^8$ Па

В процессе эксперимента установлено, что объем выделившегося водорода составил 67, тогда по выражению (3.7): $I_{H2}=0,711$

На рисунке 3.4 приведен график зависимости скорости изнашивания от пути трения, построенный по выражению (3.8) с использованием смазочного материала Пума.

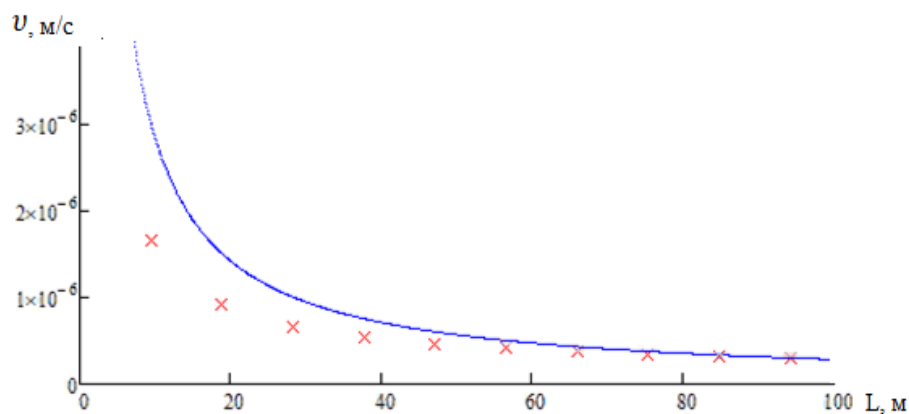


Рисунок – 3.4 Значение скорости изнашивания полученное по модели в сравнении с результатами экспериментальных исследований

На рисунке приведены точки скорости изнашивания, полученные по результатам экспериментальных исследований. Как видно из рис.3.5, наибольшее расхождение модели (3.8) и экспериментальных данных не превышает 6-8 %. На рисунках 3.5-3.7 приведены графики для смазочного материала Пума с различными присадками.

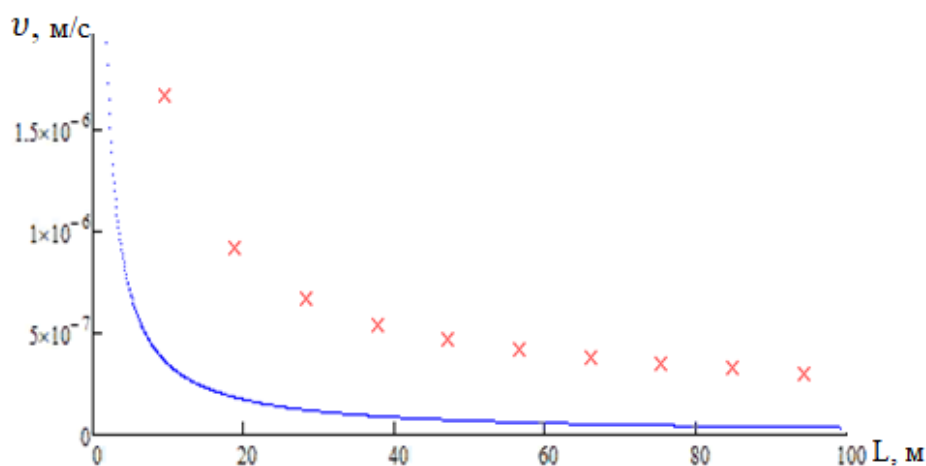


Рисунок – 3.5 Скорость изнашивания с использованием фосфорорганической присадки

Исходя из характера расположения эмпирических точек и теоретической кривой возможно ввести в выражение (3.8) коэффициент χ для их большего сближения (табл. 3.2).

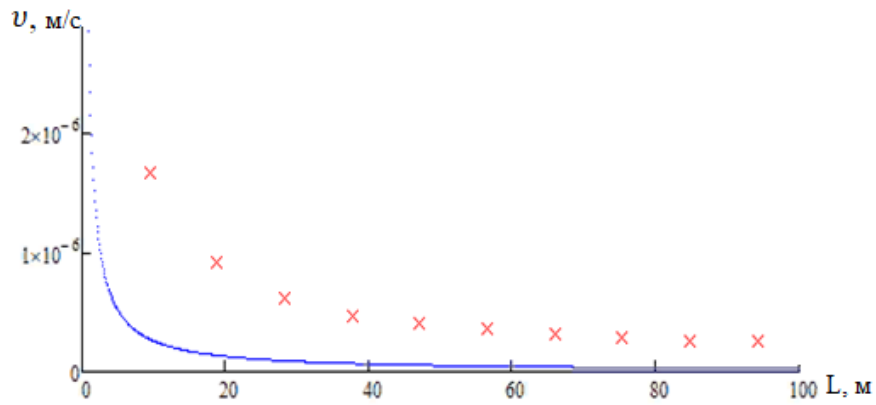


Рисунок – 3.6 Скорость изнашивания с использованием сульфоприсадки

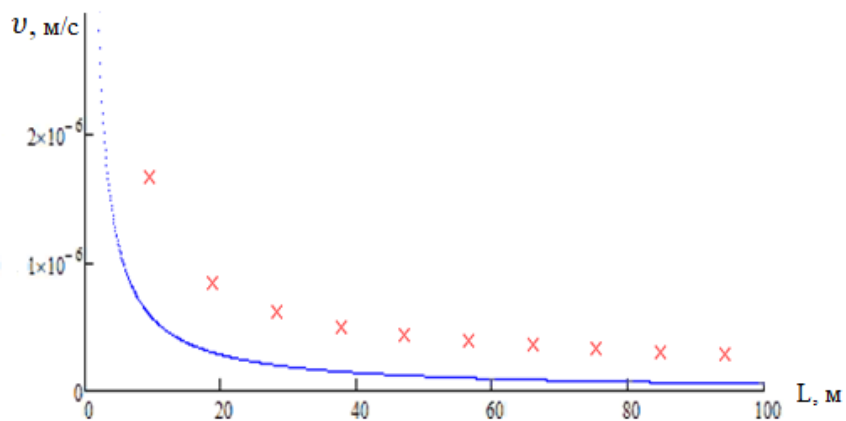


Рисунок – 3.7 Скорость изнашивания с использованием присадки соединения гидрохинона

Тогда выражение (3.8) примет вид:

$$v = \chi f_{\text{тр}} \frac{P\tau V}{L\eta_{\text{КС}}} I_{\text{H}_2} * 10^{-9}. \quad (3.9)$$

Для исследования связи значений эмпирического коэффициента в выражении (3.9) требуется провести дополнительные исследования. На основании модели (3.9) имеется возможность прогнозировать износ материала, так:

$$v = \frac{dh}{dt},$$

тогда:

$$dh = dt \cdot v, \quad (3.10)$$

$$dt = dh/v, \quad (3.11)$$

где dh – износ материала, dt – время испытаний.

Таблица 3.2. Графики расположения эмпирических точек и теоретической кривой с коэффициентом χ .

Присадка	Коэффициент χ	График
-	0,7	
фосфорорганическая	5,3	
сульфоприсадка	7	
гидрохинон	3,1	

Так, для смазочного материала Пума износ за 600 с испытаний составил 180 мкм, тогда как расчет по выражению (3.10) с учетом выражения (3.9) равен $dh=3,02 \cdot 10^{-7} \cdot 600=181,2$ мкм [159, 160]. Таким образом, погрешность не превышает 7%.

3.2 Прогнозирование величины износа гребня бандажа локомотива

На практике актуальным остается прогнозирование ресурса узлов локомотива в реальных условиях. Планирование ремонтно-восстановительных работ и работ по замене узлов позволяет грамотно распределить ресурсы и получить значительный экономический эффект за годы эксплуатации локомотива. Помимо этого, знания о ресурсе позволяет избежать непредвиденных аварийных ситуаций и сходов с пути подвижного состава.

Одним из узлов, который обеспечивает приведенные выше условия, является бандаж колеса локомотива. Интенсивность износа гребней колесных пар локомотивов практически в два раза превышает интенсивность износа бандажей. Поэтому уровень износа гребней является определяющим фактором для определения интервала межремонтного обслуживания бандажей колесных пар. Норматив износа гребня до планового ремонта составляет 4 мм на 160 000 км, однако в реальных условиях он значительно меньше. Например, при начальной толщине гребня 29 мм удельный его износ составляет 0,58 мм на 10 тыс. км пробега [126]. В этой связи целесообразно построить теоретическую прогнозную модель.

Путь трения о рельс точки на бандаже можно определить с помощью выражения [132]:

$$L_{расч} = \frac{\pi}{2} \left[3 \times (a + b) - \sqrt{(3 \times a + b) \times (a + 3 \times b)} \right] \quad (3.12),$$

где a, b – части петли удлиненной циклоиды (рис.3.8).

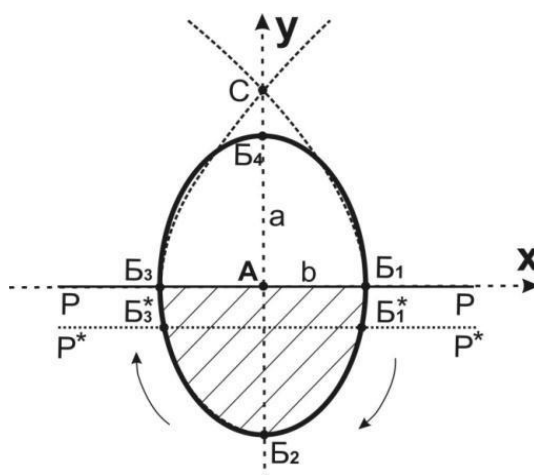


Рисунок – 3.8 Петля удлиненной циклоиды [132]

Расчет осуществлялся по исходным данным диаметр колеса $d=1050$ мм, толщина гребня колеса – 25 мм, откуда $L_T=737,194$ мм. Давление гребня на рельс при движении состава в криволинейном участке пути определяется многими факторами, среди которых масса локомотива, радиус кривизны криволинейного участка, скорость локомотива и т.д. В этой связи расчет будем вести для максимального значения давления.

Путь трения на реальном участке пути будет складываться из суммы единичных участков, которые можно определить как число левых и правых кривых на участке [126]:

$$L_{\text{участка}} = \sum_{i=1}^n L_{\text{расч } i}, \quad (3.13)$$

где n – число левых или правых кривых в зависимости от того для каких колес ведется расчет.

Так, на Забайкальской железной дороге на длине участка в 9 000 км приближенное число левых кривых равно $n = 70$ [1], тогда суммарный путь трения:

$$L_{\text{участка}} = L_{\text{расч}} \cdot n. \quad (3.14)$$

Для расчета в реальных условиях необходимо учесть силы, действующие на локомотив в криволинейном участке (рис. 3.9).

Для расчетов, требующих повышенной точности, а также при проектировании железных дорог приведена формула, предложенная П.Н.

Астаховым [3]:

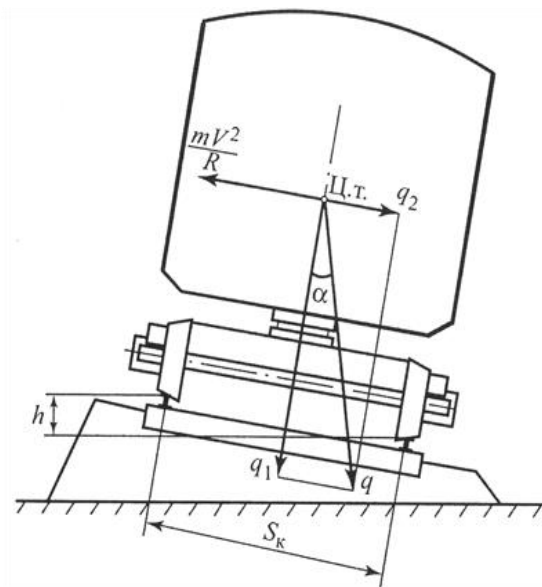


Рисунок – 3.9 Схема сил, действующих на экипаж при движении в кривой [17]

$$P = w_r = \frac{200}{R} + 1,5|\tau_K|, \quad (3.15)$$

$$\tau_K = \frac{V_{\text{лок}}^2}{3,6^2 R} - \frac{h_{\text{возв}}}{S_K} g, \quad (3.16)$$

где R – радиус кривой; τ_K – непогашенное ускорение, м/с^2 ; $V_{\text{лок}}$ – скорость локомотива в криволинейном участке; $h_{\text{возв}}$ – возвышение наружного рельса, мм; S_K – расстояние между кругами катания колес, мм; g – ускорение свободного падения.

Расчет для левых кривых участка Забайкальской железной дороги скорости изнашивания по выражению (3.8) с учетом выражений (3.12), (3.14) для используемого на практике смазочного материала Пума:

$$v = f_{\text{тр}} \frac{P\tau V}{L_{\text{расч}} \cdot n\eta_{\text{КС}}} I_{\text{H2}} * 10^{-9} = 8,564 \cdot 10^{-10}, \text{ м/с}.$$

Согласно [65] средний износ гребня бандажа на Забайкальской железной дороге составляет 1мм на 30 тыс. км пути пробега. Тогда время до износа по выражению (3.11):

$$dt = \frac{1}{1,399 \cdot 10^{-6}} = 324,357 \text{ ч.}$$

Скорость локомотива $V_{\text{лок}}$ на данном участке необходимо определять

исходя из нормативов кривизны криволинейного участка, однако, ввиду отсутствия литературных данных по рассматриваемому участку примем за скорость локомотива среднее значение скорости на данном участке $V_{\text{лок}} = 90$ км/ч, откуда длина участка пути на котором износ составит 1 мм равна:

$$l_{\text{крит}} = dt \cdot V_{\text{лок}} = 29190 \text{ км},$$

что близко к литературным источникам, в которых износ при толщине гребня менее 29 мм составляет 0,39 мм на 10 тыс. км пробега или 1,17 на 30 тыс. км пробега [1].

Более точный расчет можно провести если учитывать радиусы кривых с учетом их направления (левое или правое), скорость локомотива в кривых и массу состава.

3.2 Регрессионный анализ факторов, определяющих износостойкость гребня колеса локомотива

Для исследования влияния на износ различных факторов, использовался метод регрессионного анализа. В таблице 3.3 представлены исходные данные для множественного регрессионного анализа.

Запишем связь между износом и переменными факторами можно в следующем виде:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5,$$

где y – износ; x_1 – вязкость смазочного материала, x_2 – коэффициент трения, x_3 – интенсивность выделения водорода, x_4 – температура в зоне трения, x_5 – индекс вязкости.

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ - измеряют ожидаемое изменение износа на единицу изменения выделения диффузионно-активного водорода, когда вязкость смазочного материала поддерживается постоянным, а β_2 измеряет ожидаемое изменение износа на единицу изменения вязкость смазочного материала, когда выделения диффузионно-активного водорода поддерживается постоянным. Аналогично для коэффициента $\beta_3, \beta_4, \beta_5$.

Таблица 3.3. Факторы, влияющие на износ

h	η	f_{тр}	I_{H2}	T °C	ИБ
y	x₁	x₂	x₃	x₄	x₅
100	10,6	0,079	0,000637	30	120
110	10,3	0,082	0,000637	40	130
120	10,2	0,082	0,000672	50	110
130	10,04	0,093	0,00069	50	110
140	9,86	0,113	0,000701	56	120
150	9,73	0,187	0,000708	60	130
160	9,6	0,297	0,000713	70	125
160	9,37	0,331	0,000717	86	130
170	9,14	0,3	0,00072	56	130
190	8,89	0,308	0,000711	78	120

Для оценки коэффициентов использовался метод наименьших квадратов.

$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \beta_4 x_{i4} + \beta_5 x_{i5} + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i$ (1), где $i = 1, 2, \dots, n$.

Запишем в матричных терминах уравнение: $y = x\beta + \varepsilon$, где

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ 1 & x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \\ 1 & x_{51} & x_{52} & x_{53} & x_{54} \\ 1 & x_{61} & x_{62} & x_{63} & x_{64} \\ 1 & x_{71} & x_{72} & x_{73} & x_{74} \\ 1 & x_{81} & x_{82} & x_{83} & x_{84} \\ 1 & x_{91} & x_{92} & x_{93} & x_{94} \\ 1 & x_{101} & x_{102} & x_{103} & x_{104} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix}$$

$$x'x\beta = x'y \quad (2)$$

данное уравнение является матричной формой нормальных уравнений наименьших квадратов. Для решения нормальных уравнений, умножим обе стороны равенства (2) на матрицу, обратную $x'x$. Таким образом, оценки наименьших квадратов параметров β будут равны $\beta = (x'x)^{-1} \cdot x'y$.

Разность между фактическим наблюдением y_i и соответствующим подобранным по модели значением $\bar{y}_i$ является остатком, $e_i = y_i - \bar{y}_i$. Вектор остатков размера $(n \times 1)$ обозначается как

$$e = y - \bar{y} \quad (3)$$

Найдем оценку дисперсии ошибок σ^2 . Для расчета использовалась формула суммы квадратов остатков

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 = e'e \quad (4)$$

$$SS_E = y'y - \beta'y'y \quad (5)$$

Оценка σ^2 имеет вид:

$$\sigma^2 = \frac{SS_E}{(n-p)} = MS_E.$$

Критерий значимости регрессии показывает существует ли связь между износом и переменными x_1 – вязкость смазочного материала, x_2 – коэффициент трения, x_3 – интенсивность выделения водорода, x_4 – температура в зоне трения, x_5 – индекс вязкости. Гипотезы имеют вид: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_k = 0$, $H_1: \beta_j \neq 0$ хотя бы для одного j .

Отклонение гипотезы H_0 подразумевает, что хоть одна из переменных x_1 – x_5 вносит существенный вклад на изменение износа поверхности.

Процедура проверки включает в себя дисперсионный анализ, состоящий в разложении общей суммы квадратов SS_T на сумму квадратов, обусловленную регрессией, и сумму квадратов остатков:

$$SS_T = SS_R + SS_E$$

Остаточная сумма квадратов находится из соотношения $SS_E = y'y - \beta'x'y$.
Общая сумма квадратов SS_T находится следующим образом:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

В матричной форме

$$SS_T = y'y - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

Сумма квадратов, обусловленная регрессией, может быть найдена:

$$SS_R = SS_T - SS_E = \beta'x'y - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2$$

Критерий значимости отдельных коэффициентов представляет собой проверку значения переменных где y – износ; x_1 – вязкость смазочного материала, x_2 – коэффициент трения, x_3 – интенсивность выделения водорода, x_4 – температура в зоне трения, x_5 – индекс вязкости. Выражение имеет вид:

$$t_0 = \frac{\beta_j}{\sqrt{\sigma^2 c_{jj}}} \quad (6)$$

где c_{jj} – диагональный элемент матрицы $(x'x)^{-1}$, соответствующий оценке β^j .

При наличии повторных наблюдений подобранное уравнение регрессии может быть проверено на адекватность. Для этого остаточная сумма квадратов раскладывается на две составляющие $SSE = SS_{\text{чс.ош}} + SS_{\text{неад.}}$, которые могут быть найдены такими же способами, что и при проведении парной линейной регрессии. Модель неадекватна, если:

$$F_0 = \frac{SS_{\text{неад.}}/m - p}{SS_{\text{чс.ош.}}/n - m} = \frac{MS_{\text{неад.}}}{MS_{\text{чс.ош.}}} \geq F_{a;m-p;n-m}$$

Результаты проведенных расчетов приведены далее. С помощью оценки параметров регрессии, запишем линейное уравнение:

$$I_h = -0,557 \mu + 0,187 f_{mp} + 0,343 I_{H2} - 0,053 t + 0,000995 \text{ ИВ}$$

Таблица 3.4. Расчетные данные для построения модели процесса

	β	t	p-знач	Толеран.	R-квадр.
x_1	-0,557	-3,59467	0,022866	0,078576	0,921424
x_2	0,187	1,25170	0,278880	0,084516	0,915484
x_3	0,343	3,36086	0,028282	0,180822	0,819178
x_4	-0,053	-0,52209	0,629183	0,180392	0,819608
x_5	0,000995	0,01980	0,985153	0,748342	0,251658

Значение коэффициентов регрессии β дают представление о том, насколько уменьшится значение износа при увеличении на единицу соответствующей переменной x при условии, что другая переменная не изменится. Значение предикторов x_1 и x_3 является значимым для построения модели, так как данные значения p-значимости находятся в пределах $<0,05$, что

подтверждается вычислениями в программном обеспечении STATISTICA. Значение коэффициентов толерантности стремится к нулю для избыточных переменных в рассматриваемой матрице. Столбец R-квадр. содержит в себе значения R-квадр. соответствующих переменных и показывает их содержание и влияние друг на друга.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что износ зависит главным образом от вязкости смазочного материала и интенсивности выделения водорода [159-161].

Формально переменные, имеющие незначительные коэффициенты регрессии, могут быть исключены из рассмотрения. Однако в некоторых случаях может оказаться целесообразным все же оставить в регрессионной модели некоторые предикторы, не оказывающие значимого влияния на отклик. Большое значение коэффициента детерминации $R^2=0,98$ свидетельствует, что значительная доля (98 %) общей изменчивости величины интенсивности износа обусловлена вариацией переменных x_1 - x_5 .

Относительно большое расчётное значение статистики $F_0=231,701$ и очень малая величина p -значимости $=0,0000004$ свидетельствуют о значимости регрессионной модели. Таким образом, вязкость смазочного материала и интенсивность выделения диффузионно-активного водорода оказывают существенное влияние на износ и их следует использовать в прогнозной модели максимально допустимой величины износа гребня.

С целью установление влияния факторов между собой и количественной оценки тесноты связи предикторов, был проведен анализ мультиколлинеарности. Данный анализ проводится с целью определения надежности параметров и их интерпретации, в результате возможно наблюдать повышение стандартной ошибки, что приведет к незначительному понижению значимости модели.

Как видно из рисунка 3.10 наблюдается линейная зависимость между переменными x_1 и x_3 . Необходимым является проведение анализа для полученных переменных, который будет рассмотрен далее.

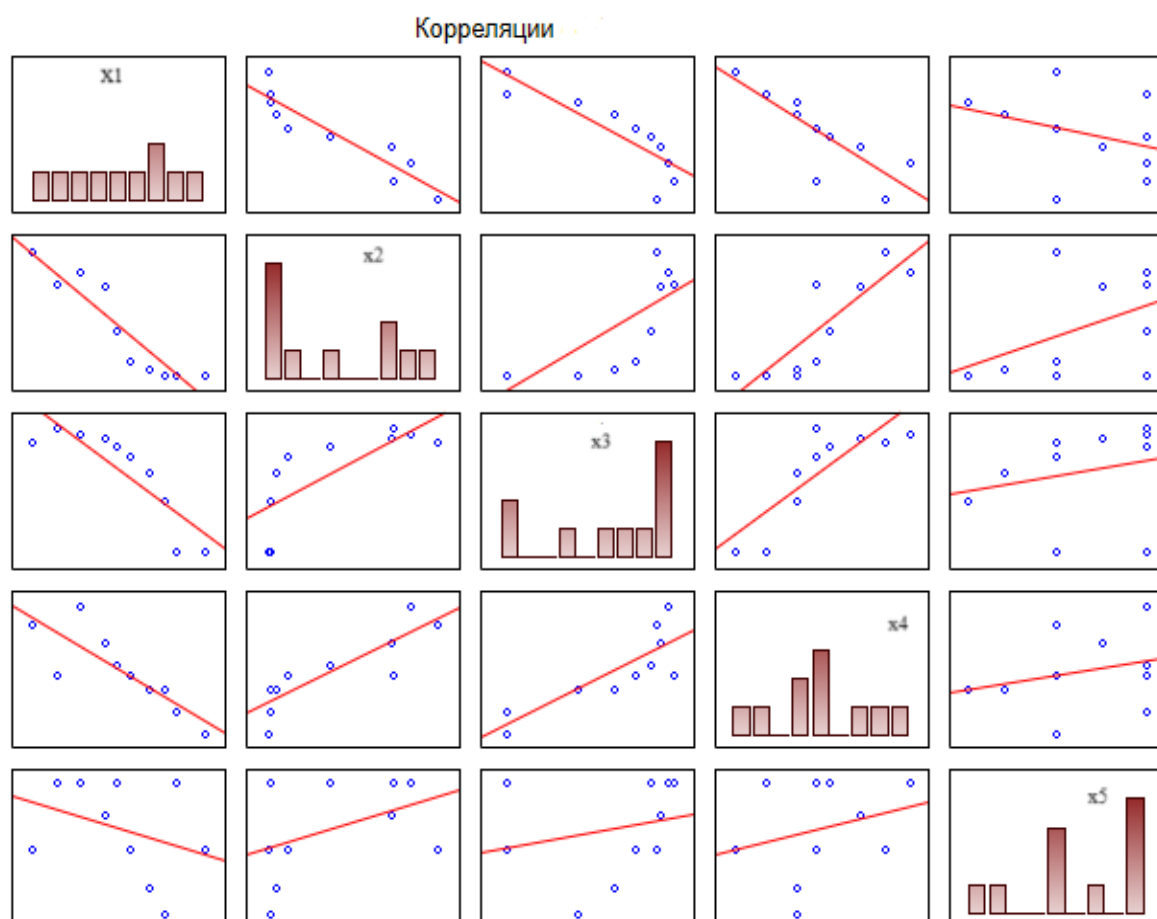


Рис. 3.10– Мультиколлинеарный анализ переменных

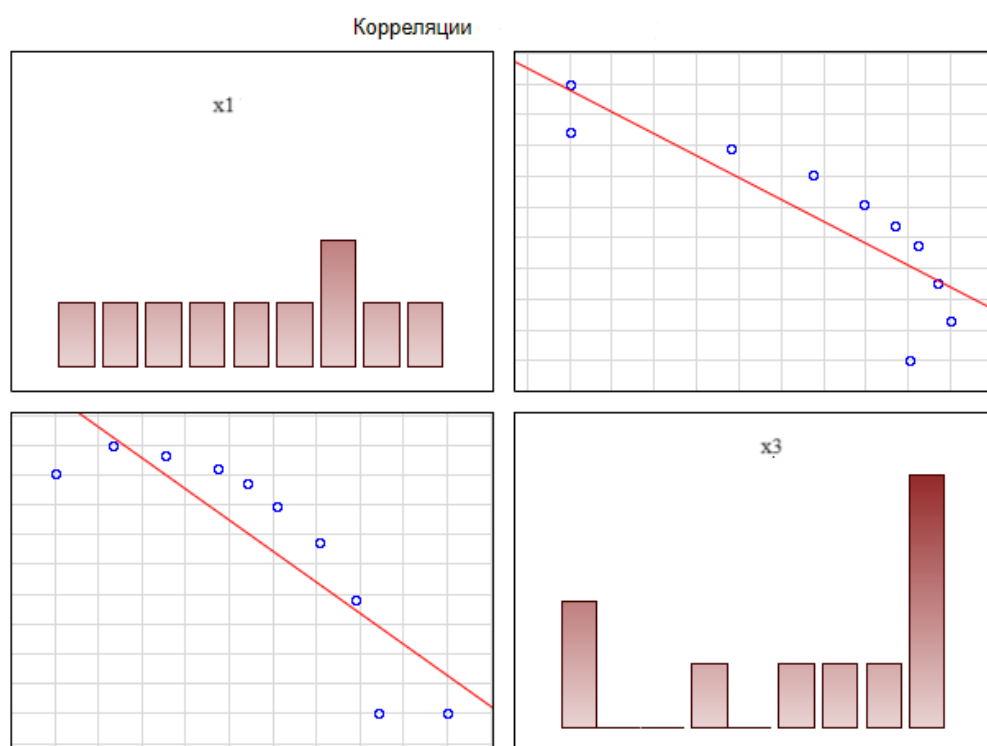


Рис. 3.11– Мультиколлинеарный анализ переменных x_1 и x_3

В таблице 3.5 приведены расчетные данные для модели, с учетом переменных x_1 и x_3 . Коэффициент детерминации при этом: $R^2=0,9623$ (96%), высокое значение также свидетельствует о значимости регрессионной модели.

Таблица 3.5 Расчетные данные для построения модели процесса

	β	t	p-знач	Толеран.	R-квадр.
x_1	-0,7288	-9,2827	0,000035	0,2570	0,74295
x_3	0,2949	3,75628	0,000711	0,2570	0,74295

Уравнение в таком случае будет иметь вид:

$$I_h = -0,5577288 \mu + 0,2949 I_{H2}$$

Рассмотрим значения остатков величины износа от двух переменных в уравнении. Для этого построим график предсказанных значений и остатков при отсутствии закономерности (рис.3.12). Как видно из хаотичного расположения точек на графике, можно говорить о том, что дисперсия значений переменных не будет меняться во всем диапазоне.

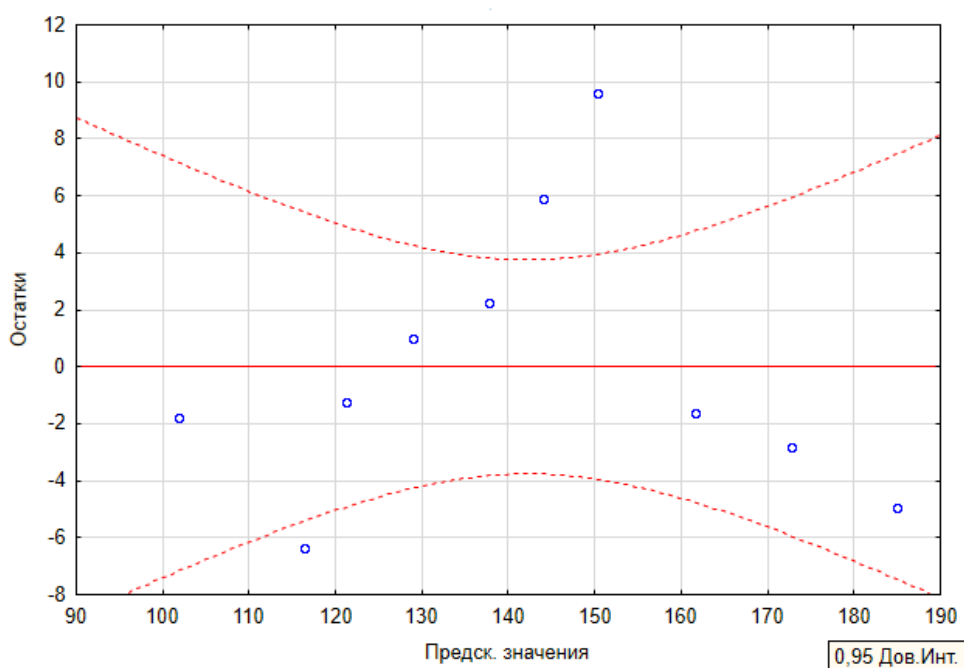


Рис. 3.12– Анализ предсказанных значений и остатков

Выводы к главе 3.

1. Получено выражение скорости изнашивания гребня бандажа и модель изнашивания гребня колеса локомотива с учетом физико-химических свойств поверхностей трения и свойств смазочного материала с присадками.

2. Модель изнашивания верифицирована по данным Забайкальской железной дороге, расхождение с эксплуатацией является приемлемым.

3. Дисперсионный и регрессионный анализ полученной модели показали значимость введенных коэффициентов. Вязкость и интенсивность выделения диффузионно-активного водорода оказывают существенное влияние на износ и их следует использовать в прогнозной модели максимально допустимой величины износа гребня.

ГЛАВА 4. АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПРИСАДОК И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ГРЕБНЯ КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА

В настоящее время использование присадок к смазочному материалу обусловлено изучением триботехнических свойств. Активно исследуются пластичные смазочные материалы, обеспечивающие хорошие смазывающие свойства и способные выдерживать ударные нагрузки. В железнодорожном транспорте нашли широкое применение металлплакирующие присадки, в частности для смазывания гребней колес локомотивов, однако, до настоящего времени исследования в данной области продолжаются, так как не решен вопрос износа поверхности гребня, и, в частности, вопрос водородного изнашивания поверхности гребня.

4.1 Фрикционные свойства смазочного материала Пума с присадками

С точки зрения повышения износостойкости гребня колеса подвижного состава целесообразно исследовать присадки, уменьшающие износ поверхностей трения, не изменяющих статических и других свойств поверхностей, способных работать в заданном диапазоне температур. В качестве таких присадок выбраны соединения, содержащие поверхностно-активные вещества.

4.1 Износостойкость гребня колеса локомотива при использовании присадок к смазочному материалу

С целью определения противоизносных свойств присадок были проведены испытания на определение износа поверхностей на разработанной установке машина трения. Описание установки и испытаний приведены в главе II. Испытания проводились в сравнении со смазочным материалом Пума, используемом при смазывании гребня колеса при вхождении локомотива в криволинейный участок железнодорожного пути.

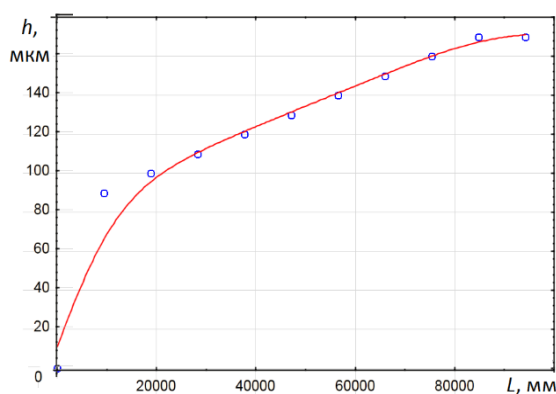
Для получения достоверных результатов исследований, была проведена серия испытаний смазочного материала с присадками, включающая 5 испытаний с 10 изменениями для определения среднего значения износа гребня и суммарного значения пары трения. Результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты 10 трибологических испытаний смазочного материала с различными присадками для суммарного износа и износа гребня

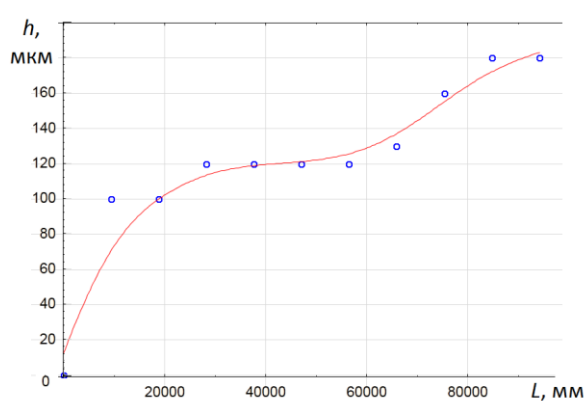
Средние значения суммарного износа h_{Σ} , мкм				Средние значения износа гребня $h_{гр}$, мкм			
Без присадки	Гидрохинон	Сульфоприсадка	Фосфорорганическая присадка	Без присадки	Гидрохинон	Сульфоприсадка	Фосфорорганическая присадка
200	170	180	190	190	160	170	200
200	170	170	170	200	180	150	190
180	170	190	200	180	160	150	180
190	170	170	170	180	180	140	180
180	180	200	200	180	190	150	170
200	180	180	180	180	170	160	170
180	160	170	170	170	170	160	160
180	160	180	170	170	160	150	180
200	170	180	180	170	160	140	190
190	170	180	170	180	170	150	180
Среднее значение							
190	170	180	180	180	170	150	180

В результате испытаний установлено, что суммарный износ пары трения с использованием смазочного материала Пума составил 190 мкм. С добавлением присадки, в качестве которой использовалось сульфосоединение износ уменьшился и составил 180 мкм (табл.4.1). Износ при использовании присадки с производными гидрохинона составляет 170 мкм. Добавление присадки фосфорорганического соединения так же уменьшает износ до 180 мкм.

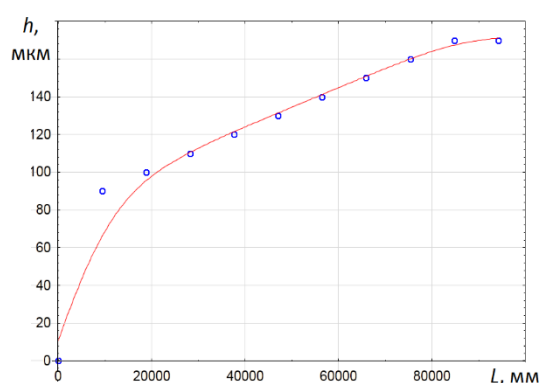
На рис. 4.1 показаны графики зависимости износа пары трения от пройденного пути с использованием присадок сульфосоединения, фосфорорганической присадки и соединений производных гидрохинона с построением аппроксимирующей кривой. Как видно из рис.4.1 присадки уменьшают износ пары трения.



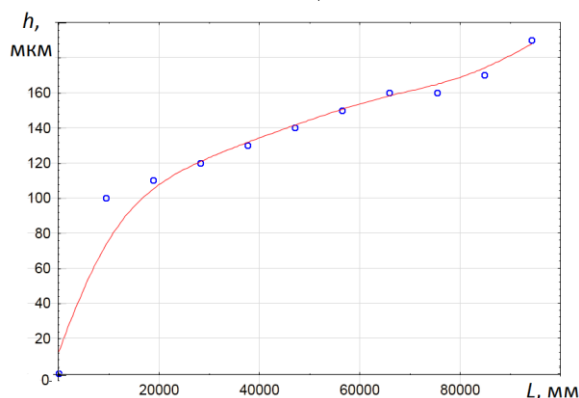
а)



б)



в)



г)

Рисунок – 4.1 Зависимость суммарного износа пары трения от пути: а) сульфоприсадка; б) присадка гидрохинона; в) фосфорприсадка; г) без присадки

На рис. 4.2 показаны графики зависимости износа гребня колеса локомотива от пути трения с использованием присадок сульфосоединения, фосфорорганической присадки и соединений производных гидрохинона с построением аппроксимирующей кривой. Как видно из рис.4.2 присадки уменьшают износ гребня колеса локомотива.

На рисунке 4.3 приведено значение скорости изнашивания образцов с различными присадками в течение 10 минут испытания, что соответствует пути трения 94,2 м. Необходимо отметить, что с использованием присадки гидрохинона процесс приработки идет быстрее, что связано с химическими свойствами активного компонента смазочного материала. Исследования показали, что увеличение мольной доли гидрохинона приводит к снижению молекулярной массы полимера, которую оценивали из показателей значений приведенной вязкости. Данное явление противоречит известному факту, что мономеры с более объемными радикалами обладают более высоким

экранирующим эффектом, что приводит к снижению молекулярной массы полимера.

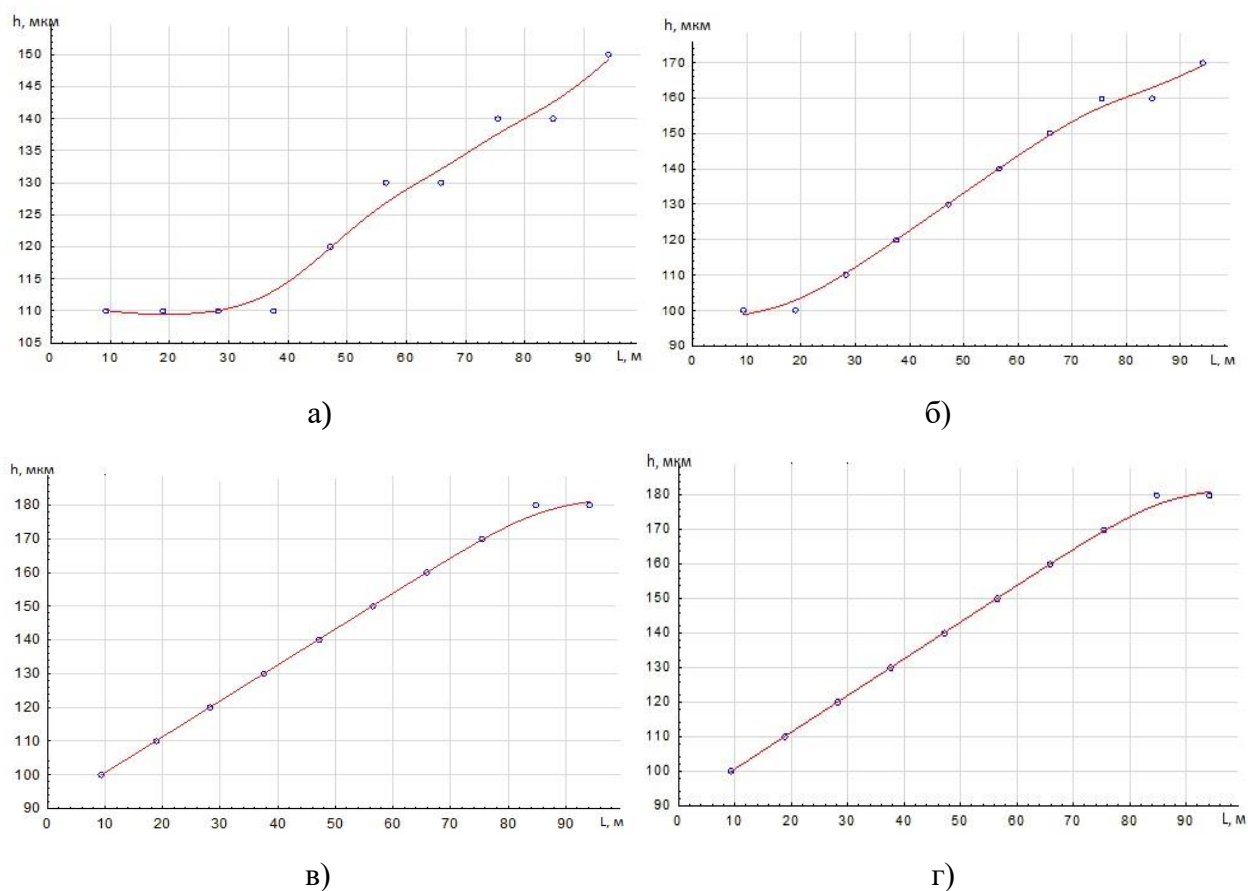


Рисунок – 4.2 Зависимость износа гребня колеса локомотива от пути: 1 – сульфо присадка; 2– присадка гидрохинона; 3– фосфоприсадка; 4– без присадки

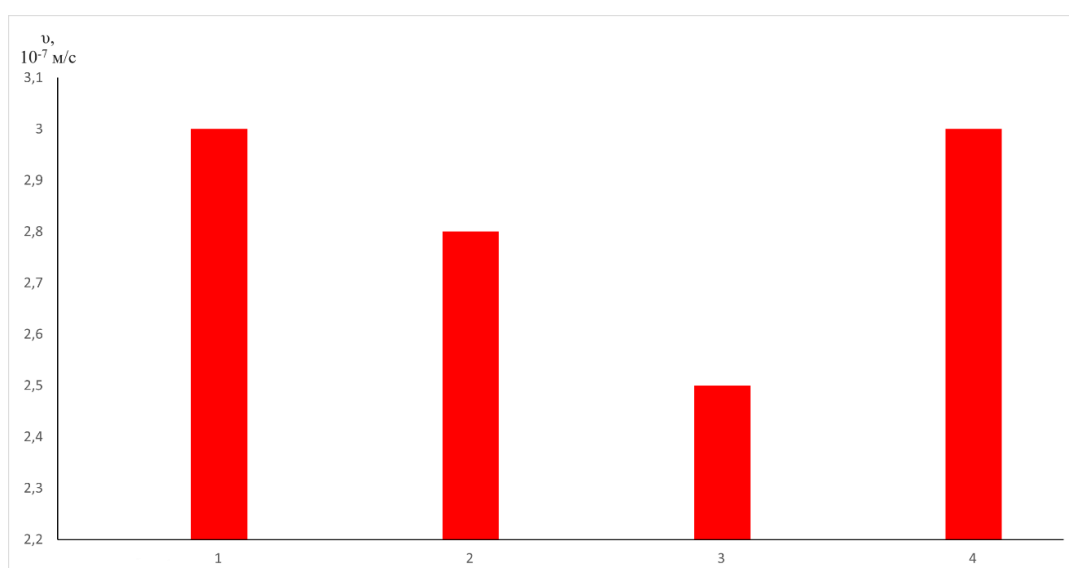


Рисунок – 4.3 Значение скорости изнашивания трущихся поверхностей:

1– без присадки; 2– гидрохинон; 3– сульфоприсадка; 4 – фосфорорганическая присадка

Наблюдаемое устойчивое снижение вязкости сополиэфиров при увеличении молярной концентрации гидрохинона, не содержащего в структуре заместителей, видимо объясняется повышением скорости реакции окисления гидрохинона в хинон, при котором его реакционная способность снижается.

Скорость изнашивания пары трения гребень колеса локомотива-рельс с использованием присадок значительно уменьшается (табл.4.2). По результатам исследований можно сказать, что добавление сульфосоединения к смазочному материалу Пума уменьшает скорость изнашивания на 7%, добавка производных гидрохинона на 13 %, присадка фосфорорганического соединения на 2 %. Интенсивность изнашивания уменьшилась на 14% при использовании гидрохинона и на 13% при добавлении сульфосодержащего агента. Значение износостойкости материала пары трения с учетом используемых присадок находится в промежутке от 0,5 до 0,59.

Таблица 4.2. Интенсивность изнашивания, скорость изнашивания и износостойкость для пути трения 94,2 м гребня колеса

	Без присадки	Гидрохинон	Сульфоприсадка	Фосфорорганическая присадка
Интенсивность изнашивания, 10^{-6}	1,911	1,805	1,592	1,911
Скорость изнашивания, 10^{-7} м/с	3,0	2,833	2,5	3,0
Износостойкость, 10^6	0,50	0,55	0,63	0,50
Интенсивность выделения водорода, ppm/м	0,711	0,159	0,339	0,085

Активность присадок объясняется тем, что на поверхности формируются абсорбированные слои из-за полярной природы молекул. Органические компоненты притягиваются к металлической поверхности за счет сильных поглощающих сил, полярная часть молекулы закрепляется на металлической

поверхности. В результате многоповторяющихся процессов образуется многослойная матрица органических молекул, которая легко подвергается сдвигу, что снижает трение между поверхностями. Поэтому, можно сделать вывод о том, что эффективность данных слоев зависит от: способности полярной группы связывать водород для достаточной адсорбции; длины углеводородной цепи – более длинные цепочки увеличивают толщину поглощенной пленки. Сульфосоединение представлено слоями, в которых связи атомов серы слабые, что позволяет пленке скользить и смещать слои по пути трения. Взаимодействие трущихся поверхностей, между которыми находится углеводородный слой цепных молекул, показывает, что молекулы упорядочиваются в квазислои, молекулярные слои которых выровнены параллельно поверхностям. В результате, возникшая сольватация колеблется между притяжением и отталкиванием, что предотвращает соприкосновение поверхностей.

4.2 Водородное изнашивание гребня колеса локомотива

В процессе эксплуатации машинных деталей при трении происходит активное взаимодействие с водородом. Этот элемент присутствует как в составе смазочных материалов, так и в окружающей среде, а также в самих трущихся деталях, и известен как биографический водород.

Биографический водород оказывает менее значительное воздействие по сравнению с водородом, высвобождающимся из окружающей среды, включая водородсодержащие материалы, особенно в составе смазочных средств, формирующихся в процессе трения. Поэтому необходимо определить количество водорода, которое выделяется в систему при трении до использования внедренных присадок и с использованием присадок, для оценки влияния состава смазочного материала на выделение водорода. Водород, выделяющийся в зоне трения, является причиной водородного изнашивания узлов трения. В научной литературе [135-138] такой водород принято называть диффузионно-активным, так как в газообразном состоянии водород существует в виде молекул, состоящих из двух атомов. При контакте с поверхностью

металла молекула водорода диссоциируется на атомы, которые адсорбируются на поверхности металла в форме отдельных атомов. После этого атомы водорода могут диффундировать в металл с высокой скоростью.

Для определения количества выделившегося водорода, были проведены исследования с использованием смазочного материала Пума, а так же с добавлением присадок: сульфоприсадка, фосфорорганическая присадка и производные гидрохинона. В процессе исследования было измерено количество выделяющегося диффузионно-активного водорода способом, описанным в разделе II (табл.4.3).

Таблица 4.3 Результаты испытаний на определение количества диффузионно-активного водорода

	Диффузионно-активный водород H ₂ , ppm			
Путь трения L, мм	Без присадки	Гидрохинон	Сульфоприсадка	Фосфорорганическая присадка
9420	6	2	4	1
18840	12	3	7	1
28260	19	5	9	3
37680	26	5	11	3
47100	33	6	14	4
56520	40	8	17	4
65940	47	9	20	5
75360	54	11	24	6
84780	61	13	28	8
94200	67	15	32	8

Наибольшее количество водорода выделяется при использовании смазочного материала Пума и составляет 67 ppm. При добавлении присадок количество выделяющегося водорода значительно уменьшается, 32, 15 и 8 ppm с использованием сульфоприсадки, производного гидрохинона и фосфорорганического соединения соответственно [154].

Данные исследования показывают, что перспективной присадкой для

уменьшения выделения водорода, а, следовательно, и уменьшения водородного изнашивания, является фосфорорганическое соединение (рис.4.3).

С целью сопоставления количества выделившегося водорода в процессе трения и износа поверхностей трения, был построен график сопоставления (рис.4.5).

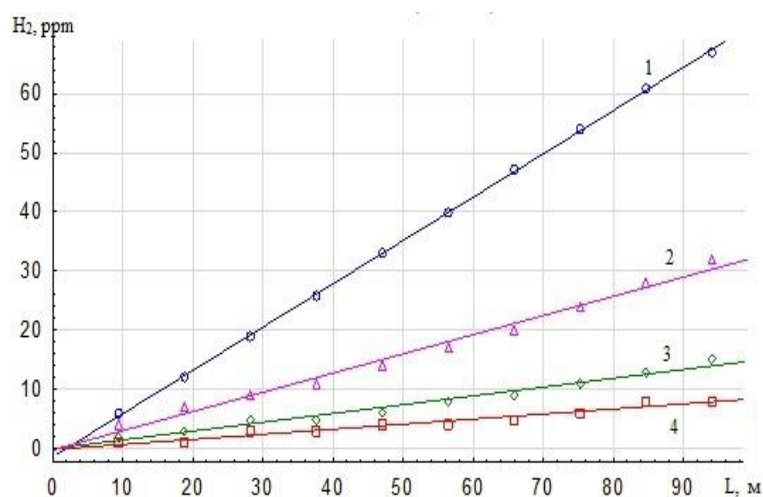


Рисунок – 4.4. Выделение диффузионно-активного водорода в процессе трения: 1– без присадки; 2– гидрохинон; 3– сульфоприсадка; 4– фосфорорганическая присадка

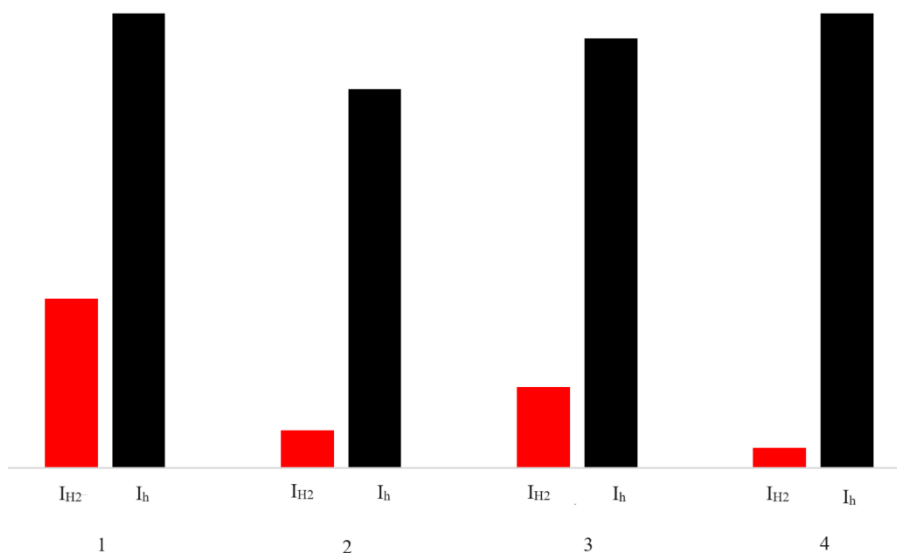


Рисунок 4.5 Сопоставление интенсивности изнашивания материала и интенсивности выделения диффузионно-активного водорода в анализируемой системе: 1– без присадки; 2– гидрохинон; 3–сульфоприсадка; 4 – фосфорорганическая присадка

Интенсивность изнашивания с использованием смазочного материала Пума, с использованием сульфо- и фосфорорганической присадки имеют близкие значения [154]. Присадка производного гидрохинона показывает меньшее значение интенсивности. Однако, не смотря на близкие значения интенсивности изнашивания для исследуемых присадок, выделение диффузионно-активного водорода при использовании присадки сульфосоединения больше за такое же время проведения испытаний. Это позволяет утверждать, что, несмотря на общее уменьшение интенсивности изнашивания, присадка гидрохинона и фосфорорганического соединения, вероятно, будет способствовать меньшей интенсивности выделения водорода.

4.3 Свойства смазочного материала гребня при использовании присадок

Для рационального применения смазочных материалов необходимо располагать достоверными данными об их физико-химических, механических и теплофизических свойствах. Используемые смазочные материалы должны быть максимально качественными и правильно подобранными для эксплуатируемых машин, а так же отвечать требованиям параметра вязкости и адгезионным свойствам.

4.3.1 Реологические свойства смазочного материала

Важным свойством смазочного материала является его вязкость. Результаты исследований и реологические свойства полученных смазочных материалов приведены в таблице 4.4.

Как видно из таблицы 4.4, при нагревании смазочного материала вязкость значительно меняется с добавлением присадок [36]. Можно отметить, что использование сульфоприсадки явно показывает завышенные значения динамической вязкости, что говорит о высоком коэффициенте внутреннего трения и материал становится более плотным. Значения остальных материалов имеют незначительные изменения (рис.4.6).

Увеличение вязкости приводит к загущению смазочного материала, что

приведет к увеличению температуры в трибосопряжении [37]. Низкая вязкость приведет к тому, что кислород во влажных условиях эксплуатации попадет в смазочный материал и к поверхностям трения, что приведет к коррозии.

Влага окружающей среды и молекулярный кислород катализирует в смазках преобразование структуры из циклической в цепочечную с образованием волокнистых структур, характерных для полифосфатов [195]. В таких образованиях возможна деформация цепей без их разрыва.

Таблица 4.4 Реологические характеристики смазочного материала «Пума» с исследуемыми присадками. Значения вязкости при нагревании смазочного материала с присадками

Температура °C	Без присадки	Сульфоприсадка	Гидрохинон	Фосфорприсадка
	Вязкость, η Па*с			
25	10,60	23,30	10,01	17,60
26	10,30	22,90	9,90	17,20
27	10,20	22,70	9,67	17,00
28	10,04	22,20	9,50	16,60
29	9,86	22,00	9,34	16,30
30	9,73	21,80	9,14	16,00
31	9,60	21,49	9,00	15,70
32	9,37	21,20	8,90	15,30
33	9,14	20,90	8,67	15,00
34	8,89	20,68	8,25	14,70
35	8,65	20,30	8,17	14,20
36	8,40	20,00	8,00	13,90
37	8,30	19,67	7,90	13,60
38	8,08	19,50	7,75	13,10
39	7,87	19,30	7,73	12,86
40	7,65	19,10	7,50	12,60
41	7,42	19,00	7,39	12,30
42	7,21	18,80	7,20	12,00
43	7,00	18,40	7,00	11,50
44	6,80	18,00	6,89	11,00
45	6,66	17,67	6,78	10,78
46	6,30	17,34	6,57	10,40
47	5,84	17,10	6,40	10,10
48	5,46	16,89	6,23	9,73
49	5,20	16,65	6,15	9,40

50	5,11	16,23	6,05	9,10
51	5,06	16,00	5,95	8,70
52	5,00	15,66	5,80	8,34
53	4,98	15,00	5,66	8,00
54	4,90	14,60	5,50	7,69
55	4,82	14,30	5,31	7,28
56	4,70	14,00	5,10	6,92
57	4,44	13,80	4,94	6,50
58	4,34	13,60	4,80	6,13
59	4,22	13,20	4,58	5,82
60	4,00	13,00	4,34	5,60
61	3,67	12,50	4,00	5,18
62	3,44	12,20	3,79	4,70
63	3,24	11,80	3,64	4,30
64	3,10	11,40	3,40	3,67
65	2,89	11,00	3,15	3,40
66	2,70	10,70	3,07	3,20

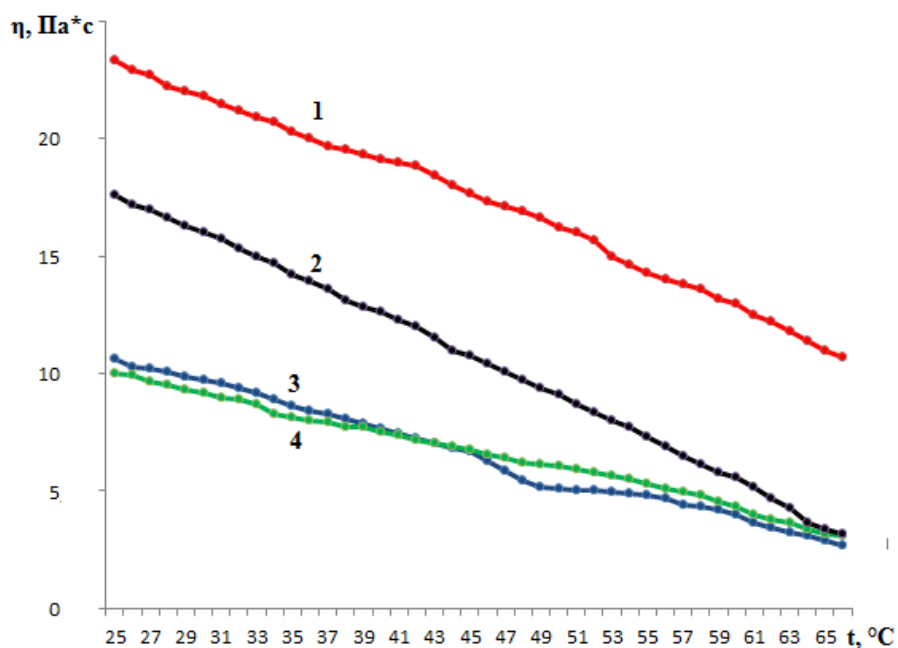


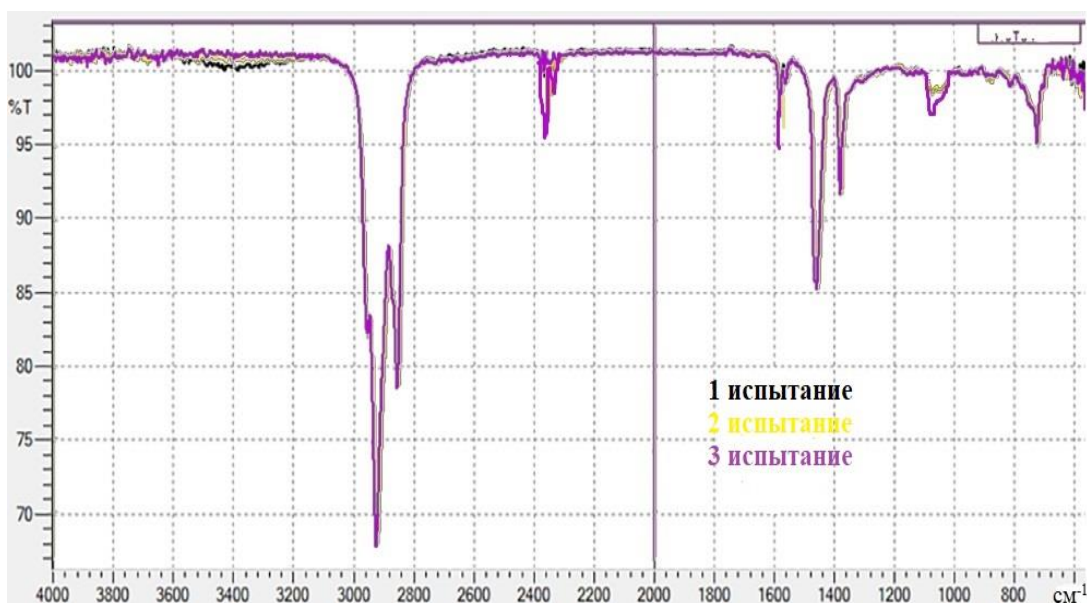
Рисунок – 4.6 Изменение динамической вязкости: 1– сульфоприсадка;
2– фосфорорганическая присадка; 3– без присадки; 4– гидрохинон

4.3.2 Концентрация металлов в смазочном материале

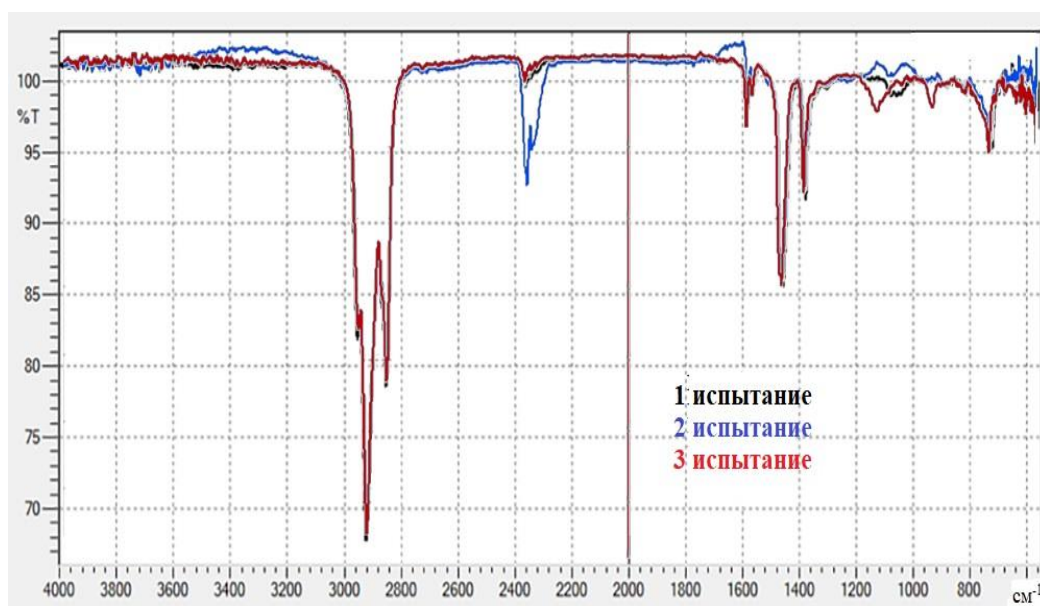
Исследование смазочного материала Пума с присадками до и после испытаний показано на рис.4.7 (1 – 4). Проведена серия испытаний 1– 3, длительность которых составляла, соответственно, 1 час, 3 часа, 6 часов

непрерывной работы на машине трения. В спектрах образцов увеличивается интенсивность полосы при частоте 633 см^{-1} , которая относится к полосе поглощения Fe-OH, по сравнению с исходным образцом, что напрямую связано с увеличением концентрации железа в отработанном смазочном материале.

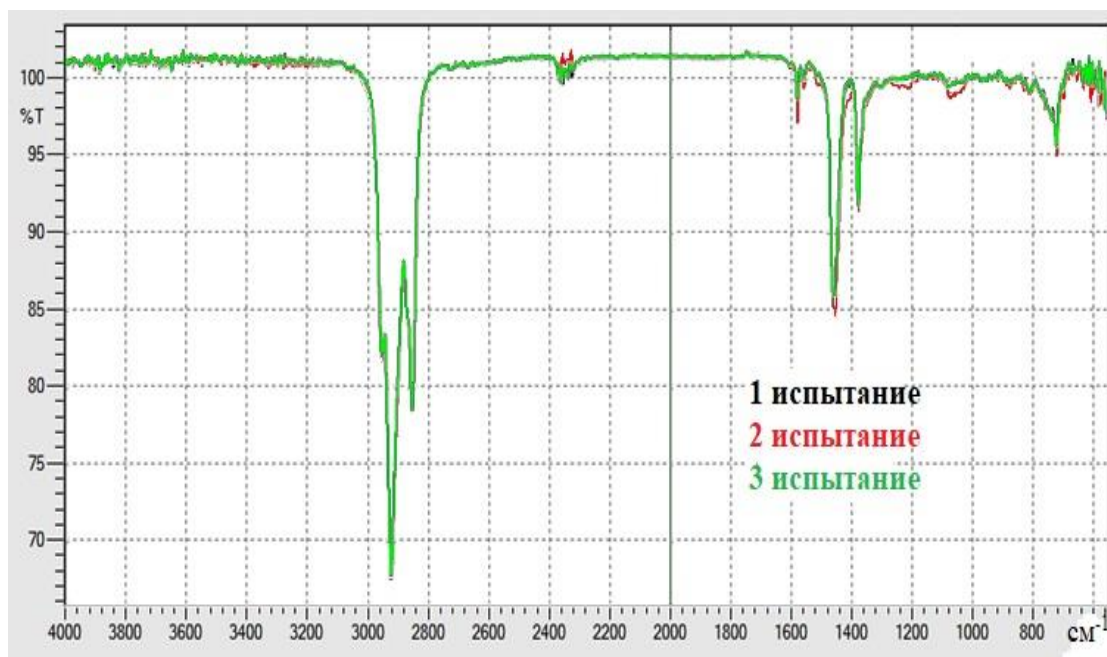
Вычисленные значения колебаний групп Fe^{3+}O_4 и Fe^{2+}O_4 находятся в диапазоне частот от 585 до 500 см^{-1} . На спектре так же наблюдается изменение интенсивности спектральных линий в данной области, что говорит об изменении концентрации железа в материале.



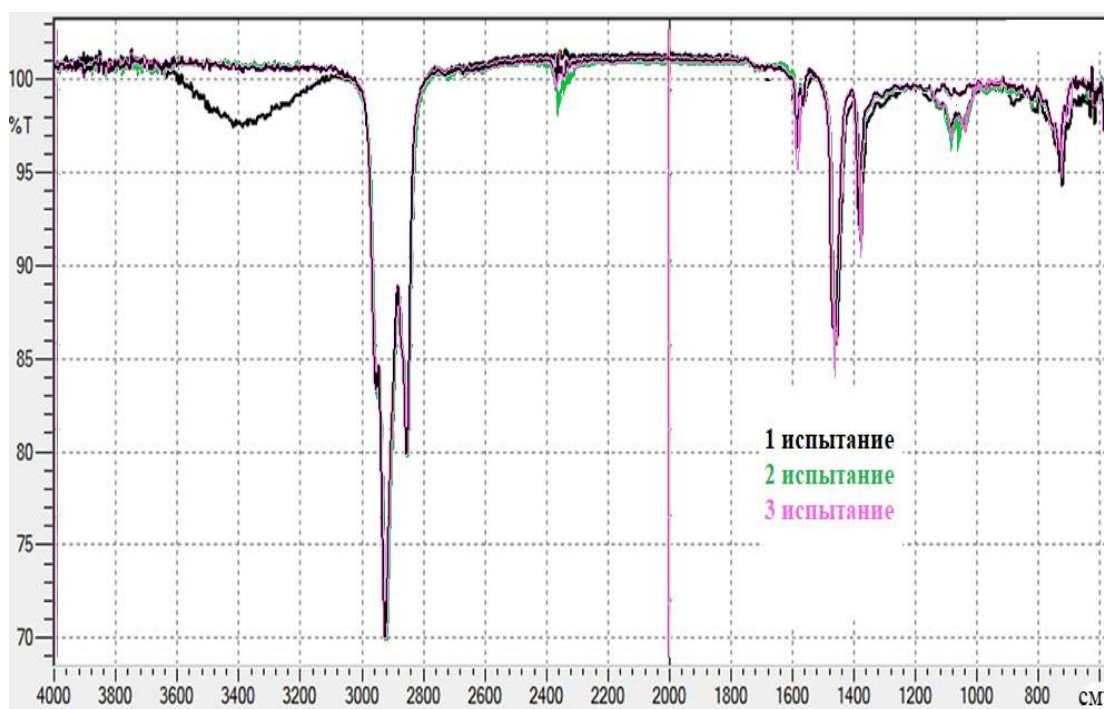
1 – ИК-спектр смазочного материала Пума без присадки



2 – ИК-спектр с фосфорорганической присадкой



3 – ИК-спектр с присадкой гидрохинона



4 – ИК-спектр с сульфоорганической присадкой

Рисунок – 4.7 ИК-спектр смазочного материала с присадками

Свободный тетраэдрический ион имеет четыре типа колебаний – $\nu_1(A_1)$, $\nu_2(E)$, $\nu_3(F_2)$, $\nu_4(F_2)$ значения которых равны 981, 451, 1104 и 613 см^{-1} соответственно. В ИК-спектрах активны только $\nu_3(F_2)$, $\nu_4(F_2)$. Группы SO_4^{2-} в кристаллах занимают общие положения, что приводит к снятию вырождения и

расщеплению колебаний на отдельные компоненты. В области деформационных колебаний группы появляются линии, которые с различной интенсивностью регистрируются для всех направлений возбуждения (см. рис.8). Для деформационных колебаний наблюдаются три линии - 604, 633.15 и 661.82 см^{-1} . Полуширина линий в спектрах для группы составляет 3÷5 см^{-1} и незначительно изменяется при рассмотрении спектров отработанного смазочного материала и с использованием сульфоприсадки. Полосы переменной интенсивности в области 1580.3 см^{-1} и 1659 см^{-1} относятся к колебаниям углеродного скелета сопряженных полиенов и ароматических групп. ИК-анализ спектральных линий характеристических частот исследуемого образца определяет наличие функциональных групп в СМ до и после испытаний, интенсивность спектральных линий позволит рассчитать концентрацию компонентов системы. Смещение спектральных линий по частоте так же отражает формы функциональных групп, которые могут образоваться после испытаний на трение. Можно заметить, что интенсивность и ширина полос изменяется в отработанном смазочном материале, что говорит о разрушении структуры базовых компонентов. В области 1376.9 и 1461.2 см^{-1} находятся колебания CH_2 групп твердых жирных кислот, число полос в этой области увеличивается на одну при увеличении числа атомов С на один в цепях C_{16} – C_{21} . Изменение интенсивности спектральных линий в области 1376.9 см^{-1} говорит об изменении концентрации базового масла в отработанном образце.

Анализ ИК спектров показал повышение концентрации металла в смазочном материале после испытаний. Интенсивность и ширина некоторых характеристических линий на ИК спектре говорит об изменении качественного состава масла, что может быть причиной возникновения новых соединений на поверхностях.

Для оценки влияния смазочного материала на поверхности трения, был проведен ряд испытаний на определение изменения характеристик структуры, состава и свойств материала пары трения.

4.3.3 Фрикционные свойства пары трения гребень колеса локомотива - рельс при использовании смазочного материала с присадками

Одной из важных характеристик смазочного материала является вязкость и адсорбционные свойства. Оценка смазочных свойств пластичных смазок происходит по результатам испытаний на маслоиспытательной машине КТ-2 по методике, аналогичной применяемой при испытании масел по ГОСТ 9490. Результаты представлены на рис.4.8.

Зависимость коэффициента трения от температуры носит неравномерный характер, что может быть обусловлено изменением химических свойств в процессе проведения испытаний. Как видно из рисунка, соединения смазочного материала Пума с фосфорорганической присадкой и гидрохинона колеблются и при температуре плавления смазочного материала. Средние значения коэффициента трения представлены в таблице 4.5.

Исходя из значений вязкости и коэффициента трения смазочного материала была получена зависимость коэффициента трения от вязкости (рис.4.9).

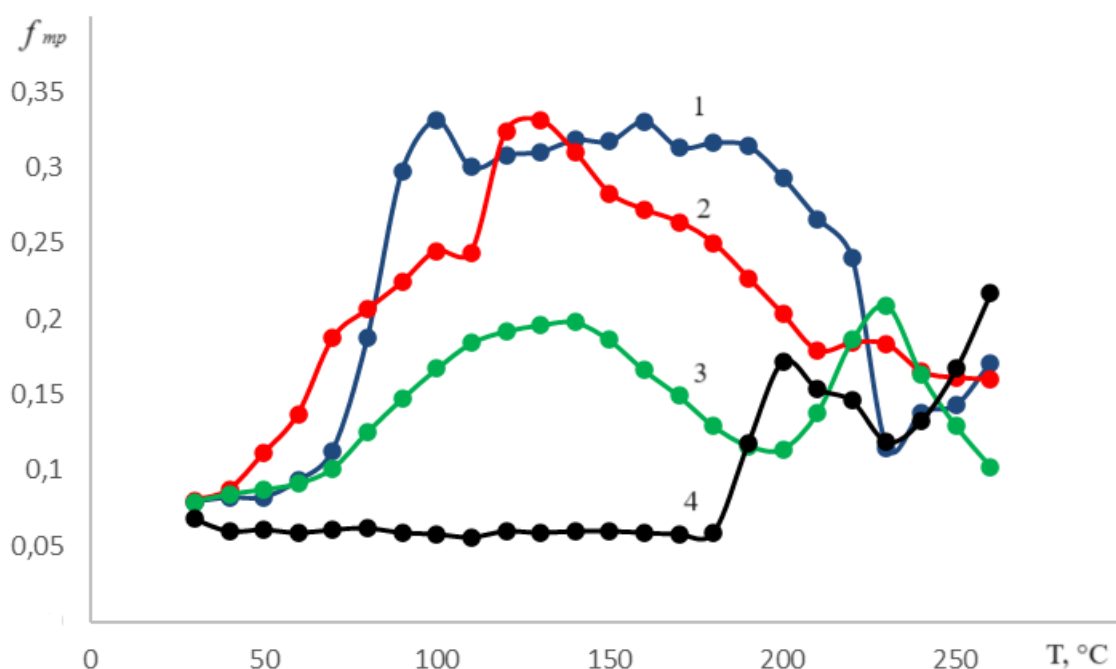


Рисунок – 4.8 Зависимость коэффициента трения от температуры проводимых испытаний:
1– без присадки; 2– фосфорорганическая присадка; 3– гидрохинон;
4– сульфоприсадка

Таблица 4.5 Средние значения коэффициента трения

t°С	Коэффициент трения			
	Без присадки	Фосфорорганическая присадка	Гидрохинон	Сульфоприсадка
30	0,079	0,080	0,079	0,068
40	0,082	0,087	0,084	0,060
50	0,082	0,111	0,087	0,061
60	0,093	0,137	0,091	0,059
70	0,113	0,187	0,101	0,061
80	0,187	0,206	0,125	0,062
90	0,297	0,224	0,147	0,059
100	0,331	0,245	0,167	0,058
110	0,300	0,244	0,184	0,056
120	0,308	0,324	0,192	0,060
130	0,310	0,331	0,196	0,059
140	0,318	0,310	0,198	0,060
150	0,317	0,283	0,186	0,060
160	0,330	0,272	0,166	0,059
170	0,313	0,264	0,149	0,058
180	0,316	0,250	0,129	0,059
190	0,314	0,227	0,116	0,118
200	0,293	0,203	0,114	0,172
210	0,266	0,179	0,138	0,154
220	0,240	0,184	0,186	0,146
230	0,115	0,183	0,209	0,119
240	0,138	0,165	0,163	0,133
250	0,143	0,161	0,129	0,167
260	0,171	0,160	0,102	0,217

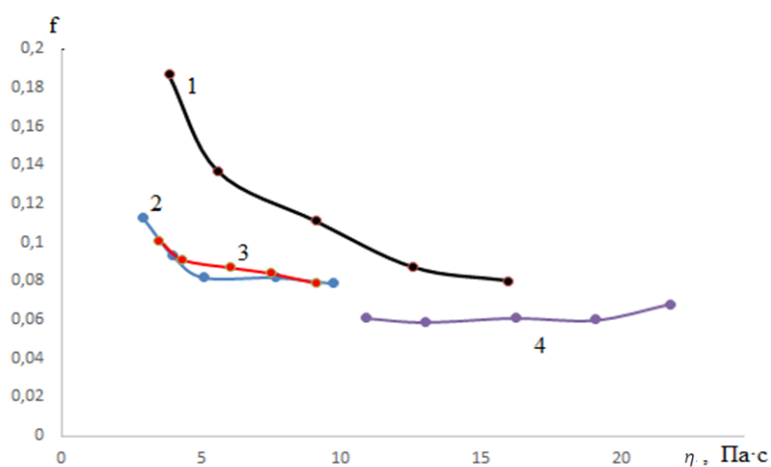


Рисунок – 4.9 Зависимость коэффициента трения от вязкости смазочного материала:

1– фосфорорганическая присадка; 2– без присадки; 3– гидрохинон; 4– сульфоприсадка

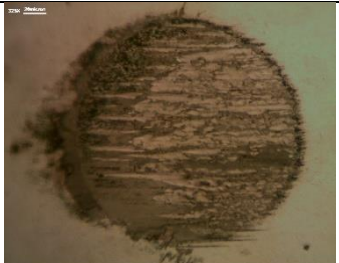
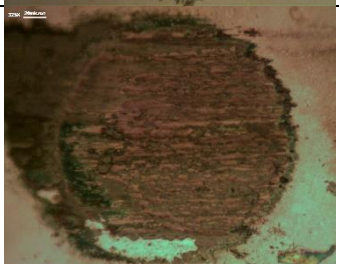
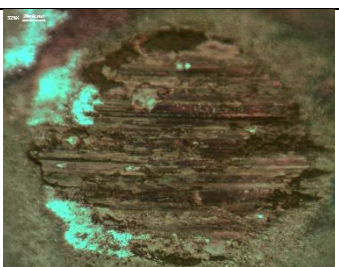
Анализ зависимости коэффициента трения от вязкости смазочного материала показал, что с увеличением вязкости коэффициент трения уменьшается.

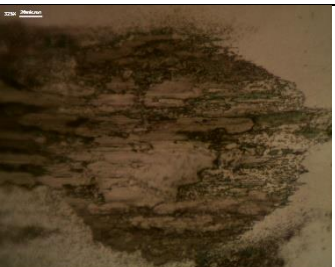
Для оценки влияния испытуемого смазочного материала Пума с присадками на изменение характеристик трения в условиях эксплуатации, были проведены замеры диаметра пятна износа после испытаний на маслоиспытательной машине КТ-2 при изменении температуры (табл.4.6).

У всех смазок наблюдается выделение масла при хранении, что говорит о низкой коллоидной стабильности смазок (рис.4.10). Наибольшее выделение масла наблюдалось у смазочного материала с присадкой сульфосоединения и фосфоприсадки (рис.4.10 б,г) [159].

Смазки начинают заметно плавиться примерно при 190-200 °С, примерно при 220 °С смазки плавятся полностью и переходят в жидкое состояние [161].

Таблица 4.6. Значения диаметра пятна износа при испытании на маслоиспытательной машине КТ-2 смазочного материала Пума с присадками

	260 °С	300 °С	Средний D _и , мкм
Без присадки			202
Фосфорорганическая присадка			215
Гидрохинон			201

Сульфоорганическая присадка			245
-----------------------------	---	--	-----

После проведения трибологических испытаний на маслоиспытательной машине КТ-2 смазочного материала Пума с присадкой гидрохинона на поверхности установки образовались белые кристаллы (рис.4.11).

В таблице 4.7 представлен внешний вид смазочного материала с исследуемыми присадками в процессе испытаний и изменения температурного режима [159].



а) без присадки



б) фосфоприсадка

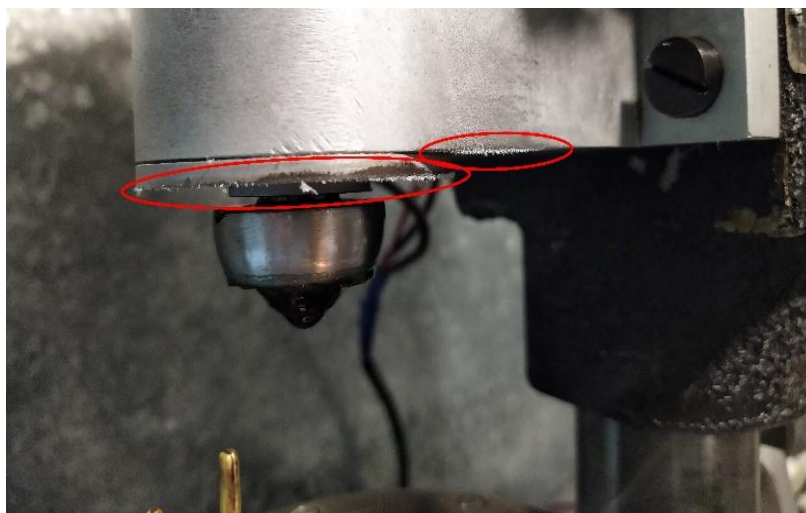


в) гидрохинон



г) сульфоприсадка

Рисунок– 4.10 Образцы смазочного материала с присадками



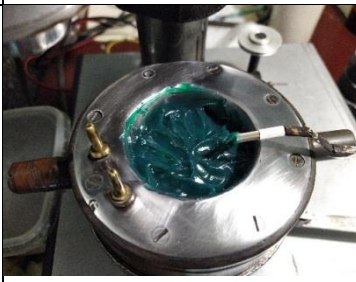
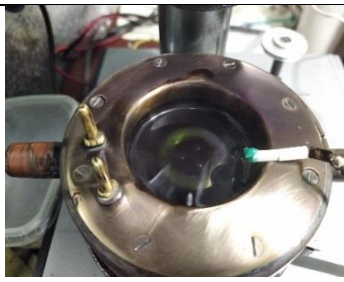
а) общий вид установки

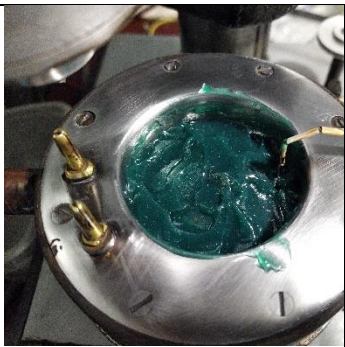
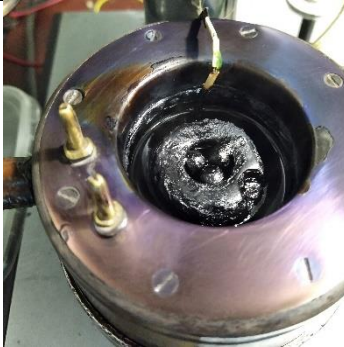


б) осадок белых кристаллов

Рисунок – 4.11 Результаты испытаний с присадкой гидрохинона

Таблица 4.7. Испытания смазочного материала Пума с присадками на
маслоиспытательной машине КТ-2

Смазочный материал и присадка	Перед испытанием	250-300°C	Остывшая
Без присадки			

Сульфопри- садка			
Фосфоприс- адка			
Гидрохи- нон			

4.4 Физико-механические свойства пары трения гребень колеса локомотива - рельс при использовании антифрикционных присадок

Для построения физической картины процесса смазывания и изнашивания, необходимо знать не только те изменения, которые происходят в смазочном материале (эти изменения определяют долговечность смазочного материала без потери его функциональности), но и те изменения, которые происходят на поверхностях трения.

4.4.1 Статические и химические свойства поверхностного слоя гребня колеса локомотива

Структурный и фазовый состав стальных поверхностей трения во многом определяет их фрикционные свойства. Исследование торца поверхности гребня проводилось на микроскопе Leica DM после травления в азотной кислоте. Результаты анализа показали (рис. 4.12), что на торце зеренная структура.

позволяет утверждать о допустимости практического применения фосфо-, сульфосоединения и гидрохинона на практике в качестве присадок к смазочному материалу Пума. Исследование состава поверхности рельса и гребня после испытаний проводилось на спектрометре Искролайн-100. Результат представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 Химический состав рельса, полученный после испытаний, соотнесенный с ГОСТ

Рельс Р65	C, %	Mn, %	Si, %	V, %	Ti, %	Zr, %	P, %	S, %
							Не более	
ГОСТ 24182-80	0,71-0,82	0,75-1,05	0,18-0,40	0,01-0,02	0,005-0,025	0,001-0,05	0,035	0,045
Экспериментальные значения	0,79	1	0,33	0,01	0,015	0,0034	0,03	0,043

Спектрометрический анализ на химический состав показал процентное соотношение химических элементов в образцах гребня колеса локомотива после испытаний, содержание которых приведено в таблице 4.9. Полученные данные соотносятся с ГОСТ.

Как видно из таблицы 4.9, показатели по хрому резко отличаются. Данные исследования подтверждаются исследованием поверхности гребня колеса локомотива до (рис.4.13) и после (рис.4.14) испытаний методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА).

Таблица 4.9. Экспериментальные данные

Гребень	C, %	Mn, %	Si, %	V, %	Ti, %	Cr, %	P, %	S, %	Ni, %	Cu, %	Mo, %	Nb, %
											Не более	
ГОСТ	0,44-0,52	0,8-1,2	0,4-0,65	0,08-0,15	0,005-0,025	0,3	0,03	0,02	0,3	0,3	0,08	0,05
Экспериментальные значения	0,52	1	0,6	0,1	0,0054	0,1	0,03	0,02	0,3	0,3	0,075	0,047

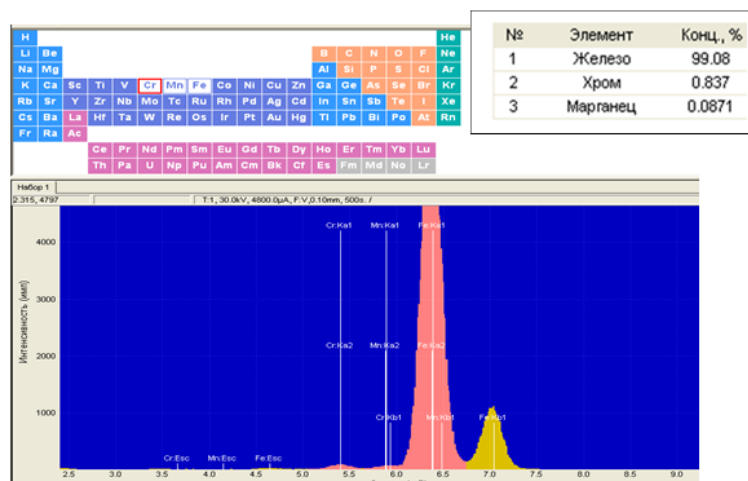


Рисунок – 4.13 РФА материала гребня колеса до испытаний.

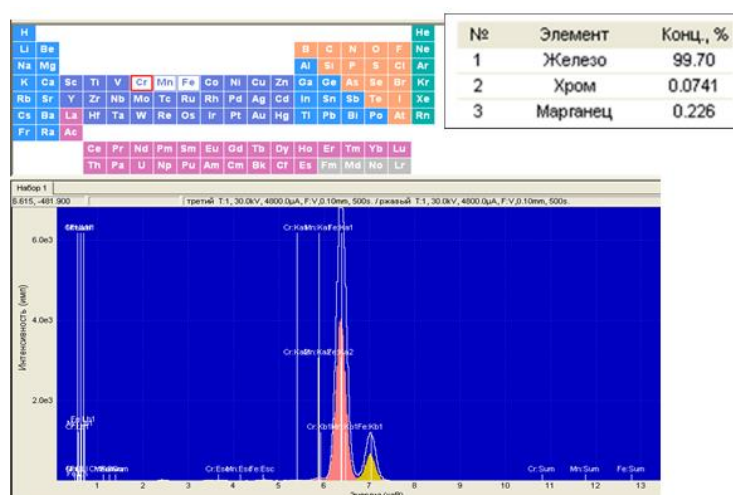
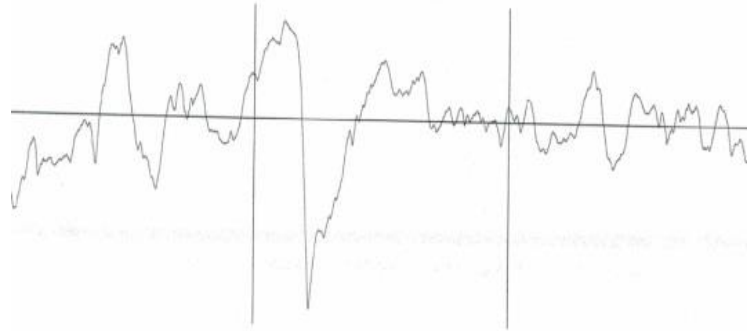


Рисунок – 4.14 РФА материала гребня колеса после испытаний.

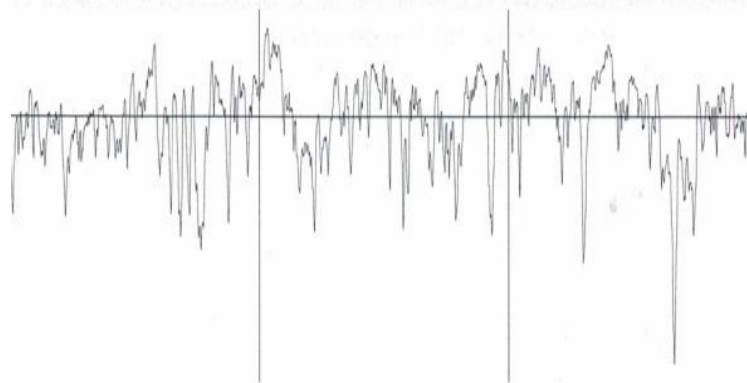
Атомы Cr могут проникать в пространство между плоскостями серы, что предотвращает попадание влаги в покрытие. Соединения MoS_2 -Cr сохраняют слоистую базовую структуру материала MoS_2 , поэтому они способны образовывать стабильный передаточный слой и обеспечивают хорошие трибологические свойства благодаря объемной структуре MoS_2 , в котором каждый слой MoS_2 состоит из стопок S–Mo–S толщиной в три атома, в атмосфере высокой влажности. Однако, при всех условиях, когда достигается предел растворимости соединения, Cr выпадет в осадок, образуя дискретный металл, что приведет к плохим трибологическим свойствам.

4.4.3 Неровности поверхности гребня колеса локомотива

Анализ профилограмм (рис.4.15) поверхности гребня до проведения испытаний на износ и после показал, что параметр R_a уменьшился в 8 раз с 3,492 мкм до испытаний до 0,437 мкм после испытаний по результатам обработки 3-х профилограмм для каждой поверхности снятых на базовой длине 0,8 мм.



а) до испытаний



б) после испытаний

Рисунок – 4.15 Профилограммы поверхностей

Параметры s и S_m также уменьшились с 0,017 мм и 0,108 мм до испытаний до 0,008 мм и 0,034 мм после испытаний соответственно. Это свидетельствует о приработке поверхностей в процессе трения. Однако, действие смазывающего материала гребня колеса локомотива основано не только на его адгезионной способности, но и на попадании смазывающего материала во впадины шероховатости, задержании его во впадинах и дальнейшем переносе на рельс при контакте гребня колеса и рельса. Следовательно, уменьшение шаговых параметров s и S_m негативно сказывается на адгезионной способности твердого смазывающего материала гребня колеса локомотива.

Результаты испытаний показали, что твердость материала до испытаний и

после не изменилась – исходная твердость рельса составила 75 HRC, после испытаний 75 HRC, исходная твердость гребня и после испытаний 54 HRC и 53 HRC соответственно. По полученным результатам можно определить предел текучести вещества, предел прочности, относительное сужение и истинное сопротивление разрушению.

Выводы к главе 4.

1. Анализ результатов исследования влияния присадок к смазочному материалу показал, что используя сульфоорганическую и фосфорорганическую присадки, износ поверхности бандажа колеса локомотива уменьшается. Использование фосфорорганической присадки уменьшает выделение диффузионно-активного водорода, что говорит о высокой химической активности присадки в реакции с выделяющимся водородом.

2. Для уменьшения износа бандажа колеса так же можно использовать систему присадок к смазочному материалу. Одновременное использование сульфоорганической и фосфорорганической присадки приведет к уменьшению износа поверхностей и понизит выделение диффузионно-активного водорода.

3. Исследование смазочного материала Пума с присадками физико-химическими методами показало, что структурные компоненты смазочного материала и добавленных присадок значительно изменяют свойства базового масла, меняется состав и свойства образующихся веществ. При этом трибологические функции не изменяются.

4. Анализ материала гребня колеса локомотива показал, что добавление присадок к смазочному материалу Пума не влияет на прочностные характеристики материала и не меняет его свойств.

ГЛАВА 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Совершенствование системы гребнесмазывателя

Целесообразно предположить, что для использования смазочного материала Пума с исследуемыми присадками, необходимо использовать системы смазывания гребня колеса локомотива в виде форсунки с жидким маслом, которая производит распыление в виде мелкодисперсного пара.

Одна из ключевых систем, обеспечивающих плавное и надежное передвижение по железным дорогам, – система смазывания гребня колеса. Эта система является важной частью железнодорожного транспорта, которая обеспечивает безопасность и эффективность движения поездов. Система смазывания гребня колеса работает по принципу нанесения специальной смазки на контактную поверхность колеса и рельса. Главная задача смазки – уменьшение трения и износа, что способствует длительной и бесперебойной эксплуатации локомотивов. Одной из основных составляющих системы смазывания гребня колеса является распределение смазки. Это осуществляется с помощью специального аппарата, который автоматически подает смазку на колеса. Также важным элементом системы является контроль за степенью износа гребня. Многообразие технологий и материалов, которые используются в системах смазывания гребня колеса, позволяют повысить эффективность работы и продлить срок службы локомотивов [122].

Система смазывания гребня колеса локомотива относится к железнодорожному транспорту, к устройствам для смазывания гребней колесных пар, боковых поверхностей головок рельсов и элементов стрелочных переводов для транспортных средств, таких как маневровые локомотивы, дрезины, автомотрисы. Система смазывания представляет собой резервуар, закрепленный на предступичной части оси колесного центра с бандажами. В резервуаре расположено несколько отсеков для подачи смазочного материала, присадки и катализатора, взаимодействие которых осуществляется через

нагнетательный трубопровод. Полученная смесь через патрубок поступает в мелкодисперсионную форсунку. Использование присадки из резервуара к смазочному материалу позволяет уменьшать износ гребня колеса, активация действия которой основана на добавлении катализатора [122][Приложение 2].

5.2 Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследований

Результаты исследований показали, что применение присадок к смазочному материалу Пума в системе смазывания форсунками приводит к увеличению износостойкости пары трения гребень колеса-рельс.

Необходимо определить себестоимость всех компонентов, входящих в состав смазочного материала, включая базовое масло, присадки, упаковку и другие материалы. Это включает в себя расходы на их приобретение, доставку и хранение. Стоимость труда персонала, занятого в процессе изготовления смазочного материала, также должна быть учтена. Это включает в себя оплату труда операторов, технологов, инженеров и других специалистов, а также накладные расходы, связанные с административными и управленческими функциями. Расходы на приобретение, обслуживание и эксплуатацию оборудования для производства смазочного материала также должны быть учтены, включая расходы на электроэнергию, воду, отопление и т. д. Если присадки для смазочного материала являются результатом исследований и разработок, то затраты на проведение этих работ также должны быть включены в общую стоимость производства. Расходы на амортизацию оборудования и других основных средств, используемых в процессе производства, должны быть учтены при расчете стоимости изготовления смазочного материала. Кроме основных затрат, также следует учесть прочие операционные и административные расходы, такие как расходы на рекламу, бухгалтерское обслуживание, страхование и прочее. При расчете стоимости изготовления 10 кг смазочного материала воспользуемся калькуляцией, представленной в табл.5.1.

Таблица 5.1. Калькуляция затрат на изготовление смазочного материала

Пума с присадками

Статьи затрат	Стоимость затрат, руб.			
	Без присадки	+присадка сульфосоединения 100 г	+присадка гидрохинона 100 г	+присадка фосфорорганическая 100 г
Сырье	3000	3300	3400	3360
Основная з\п	10000	10000	10000	10000
Общепр. расходы	8000	8000	8000	8000
Общехоз. расходы	9000	9000	9000	9000
Полная себестоимость	30000	30300	30400	30360
Всего	46800	47268	47424	47361,6

Количество систем смазывания (с учетом количества колесных пар локомотивов) на 1 локомотиворемонтное ДЕПО составляет $U_t = 168$ штук. Средняя стоимость перебандажировки одной колесной пары для локомотивов серии ТЭМ составляет 25 000 рублей. Тепловоз серии ТЭМ имеет 6 колесных пар (12 колес), а также принимая во внимание расчетный период в 4 года, необходимо выполнить 7 обточек и 2 замены бандажей за этот период. Затраты на содержание колес одного локомотива, таким образом, можно рассчитать по формуле:

$$З = (n \cdot O + k \cdot Б) \cdot \frac{12}{4} = (7 \cdot 12\,500 + 2 \cdot 25\,000) \cdot \frac{12}{4} = 412\,500 \text{ руб.}$$

где n – количество обточек; O – стоимость обточки одного колеса, руб; k – количество замен бандажа; $Б$ – стоимость замены бандажа одного колеса, руб; 12 – число колес локомотива; 4 – расчетный период (четыре года).

Использование смазывающей системы уменьшается количество обточек и в среднем составляет 2 раза за 4 года. Тогда, получаем годовые затраты на ремонт колесной пары:

$$З_{см} = n \cdot O \cdot \frac{12}{4} = 12\,500 \cdot \frac{12}{4} = 37\,500 \text{ руб.,}$$

где $Z_{см}$ – годовые затраты на содержание колес локомотива; n – число обточек; O – стоимость обточки одного колеса, руб; 12 – число колес локомотива; 4 – расчетный период.

Учитывая полученные значения, определим экономию на обточках при использовании смазочного материала с присадками:

$$Z - Z_{см} = 412\,500 - 37\,500 = 375\,000 \text{ руб.}$$

Определим расход дизельного топлива на локомотивах серии ТЭМ. Средний расход топлива в смену составляет 250 литров. Коэффициент использования тепловоза равен 0,8. Теперь можем найти фактический расход топлива на один тепловоз за смену, умножив средний расход на коэффициент использования:

$$F_{топл} = 250 \text{ л} \cdot 0,8 = 200 \text{ литров.}$$

Таким образом, фактический расход дизельного топлива на один тепловоз за смену, учитывая коэффициент использования, составляет 200 литров. Тогда годовой расход топлива составит:

$$P = p \cdot (365 \cdot 2) \cdot 0,8 = 250 \cdot (365 \cdot 2) \cdot 0,8 = 146\,000 \text{ литров,}$$

где p – расход топлива в смену; 0,8 – коэффициент использования; $365 \cdot 2$ – количество смен в году.

В среднем на один ремонт (1 локомотив) расходуется 5 кг смазочного материала Пума на ТО в ДЕПО. Техническое обслуживание, в которую входит проверка бандажей колесной пары, осуществляется 1 раз в 30 суток. Годовой расход на техническое обслуживание специальной смазки Пума на один локомотив в год составит около 60 кг. Для смазки Пума расход за год составит $152\,100 \cdot 6 = 912\,600$ руб.

Если сейчас ремонт проводится через каждые 200 тыс. км (в среднем 1 раз в год), то с использованием присадок может увеличиться до 280 тыс. км. Экономия от снижения расхода топлива составит 394 200 руб. Срок окупаемости составит около 10 месяцев.

Оценим экономию перебандажировки и обточек колесных пар локомотивов относительно скорости изнашивания с применением смазочного

материала Пума и с использованием рекомендуемой присадки. Значения скоростей изнашивания составляют: $v_{\text{пума}} = 8,564 \cdot 10^{-10}$ м/с, $v_{\text{сульф}} = 8,342 \cdot 10^{-10}$ м/с. В результате использования смазки Пума и Пума с присадкой сульфоорганического соединения, время до полного износа составляет:

$$dt = dh/v,$$

$$dt_{\text{пума}} = \frac{1}{1,399 \cdot 10^{-6}} = 324,357 \text{ ч.}$$

$$dt_{\text{сульф}} = \frac{1}{3,64 \cdot 10^{-6}} = 763 \text{ ч.}$$

Определим коэффициент улучшения ξ , который покажет, насколько увеличилась эффективность в результате использования смазки Пума с присадкой. Коэффициент улучшения можно определить как отношение времени до полного износа при использовании смазки Пума с присадкой ко времени до износа смазочного материала Пума. Формула для расчета коэффициента улучшения будет следующей:

$$\xi = \frac{763}{324} = 2,4$$

В среднем за год локомотив на заданном участке находится в эксплуатации 210 000 локомотиво часов (Е), состоящих из времени нахождения локомотивов в пути между станциями и времени простоя на каждой из станций. Определим количество раз износа, которое наступит за год с использованием смазочного материала Пума и с присадкой сульфоорганического соединения. Подставляя полученные значения, имеем:

$$\vartheta_{\text{пума}} = \frac{210\,000 \text{ ч}}{324 \text{ ч}} = 648 \text{ раз}$$

$$\vartheta_{\text{сульф}} = \frac{210\,000 \text{ ч}}{763 \text{ ч}} = 275 \text{ раз}$$

Пробег нового локомотива до износа гребней колес составляет $A=80\,000$ локомотиво часов. Определим на сколько сократится число ремонтных работ при использовании смазочного материала Пума с присадкой:

$$\varphi = A \cdot \xi = 80000 \cdot 2,4 = 192\,000$$

Стоимость перебандажировки колесной пары составляет 25 тыс.руб. Используя полученные значения, определим, что за пробег до износа $A=80$ тыс.локомотиво часов на ремонтном депо проведут одну перебандажировку стоимостью 25 тыс.руб. Учитывая коэффициент улучшения работы локомотива ТЭМ за год (в локомотиво часах) при использовании присадки сульфоорганического соединения, получаем, что с использованием сульфоорганической присадки перебандажировка наступит через 192 000 км.

Определим количество перебандажировок с использованием смазочного материала Пума относительно работы в локомотиво часах:

$$F_{\text{пума}} = \frac{E}{C} = \frac{210\,000}{25\,000} = 8,4$$

Аналогичным образом считаем для присадки сульфоорганического соединения, получаем: $F_{\text{сульф}}=3,2$. Округлим полученные значения до целых чисел, в результате имеем количество перебандажировок со смазочным материалом Пума 8, с присадкой сульфоорганического соединения 3.

Тогда экономия от использования присадки сульфоорганического соединения составит:

$$\mathcal{E} = 8 \cdot 25\,000 - 3 \cdot 25\,000 = 125\,000 \text{ руб.}$$

Полученные результаты применяются для вычислительного анализа эксплуатационных характеристик одного локомотива, входящего в парк, подвергаемого обслуживанию в депо Брянск-Льговский, где в настоящий момент эксплуатации функционирует 180 единиц транспортного средства. В результате, экономия в год для 1 депо составит:

$$\mathcal{E} = 180 \cdot 125\,000 = 22\,500\,000 \text{ руб.}$$

В среднем, 1 локомотиворемонтное депо может обслуживать 8 локомотивов одновременно, в таком случае экономия составит 1 000 000 рублей в год.

Выводы к главе 5.

1. Расчетный анализ по данным локомотиворемонтных депо показал, что применение присадки, уменьшающей износ, приводит к экономии дизельного топлива на локомотивах типа ТЭМ.

2. Экономический эффект от использования присадки сульфоорганического соединения к смазочному материалу для 1 локомотиворемонтного депо, одновременно обслуживающему 8 локомотивов, составляет 1 000 000 рублей в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В научно-квалификационной работе изложены совокупности новых решений, направленных на повышение износостойкости гребня бандажа колеса локомотива – решение важной проблемы эксплуатации железнодорожного транспорта.

1. На основе приведенных экспериментальных исследований установлено, что сульфоорганическая присадка способствует наименьшему износу $I_h^{\text{сульфо}} = 1,592 \cdot 10^{-6}$.

2. Разработана модель изнашивания гребня бандажа колеса локомотива с учетом физико-механических свойств поверхностей трения и свойств смазочного материала, таких как вязкость, интенсивность выделения водорода, ударная вязкость, напряжение сдвига, коэффициент трения, давление, на основании которой получено выражение определения скорости изнашивания гребня. Выявлено определяющее влияние на износ гребня вязкости смазочного материала и интенсивности выделения водорода.

3. Разработана методика прогнозирования межремонтного пробега локомотива на основе физико-математической модели скорости изнашивания. Получены прогнозные значения времени эксплуатации бандажа локомотива до критического износа гребня верификацией средних значений по эксплуатации локомотива, показывающие корреляцию скорости изнашивания с коэффициентом трения, вязкостью, интенсивностью выделения водорода, ударной вязкостью, напряжением сдвига, давлением, выделением водорода в процессе трения. Разность расчетного значения износа и экспериментальных данных составляет 17%.

4. Значения коэффициента трения при 260 °С смазочного материала Пума 0,171, введение присадок сульфосоединения показывает значение коэффициента трения 0,217, присадка фосфорорганического соединения 0,160, с добавлением присадки гидрохинона 0,102, введение гидрохинона увеличивает термическую стабильность смазочного материала, что связано со строением полиэфира гидрохинона.

5. На основании экспериментальных данных фосфорорганическая присадка значительно уменьшает интенсивность выделения диффузионно-активного водорода с $H_2^{\text{пума}}=67$ ppm до $H_2^{\text{фосф}}=8$ ppm за счет влияния активного центра молекулы, являющейся акцептором протонов.

6. Доработана конструкция системы смазывания гребня колеса локомотива, позволяющая наносить смазочный материал с учетом добавления исследуемых присадок, заключающаяся в введении катализатора.

7. Расчетный экономический эффект от использования смазочного материала с исследуемой присадкой составит 1 млн. рублей в год для одного локомотиворемонтного депо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа состоит из 3 частей.

Первая часть включает первую и вторую главу. В первой главе анализируется состояние вопроса повышения износостойкости пары трения гребень колеса – рельс. Проанализированы существующие модели, учитывающие особенности тележки вагона и ее динамические характеристики. повышения износостойкости деталей пар трения битумных шестеренных насосов. Во второй главе приведена теоретическая и экспериментальная методика исследования с учетом выбранных присадок, материалы и экспериментальные установки, используемые в исследованиях.

Вторая часть работы состоит из третьей и четвертой глав. Третья глава отражает математическое моделирование процесса скорости изнашивания и учетом вводимых критериев на примере железной дороги Забайкалья. Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований, на основании которых была построена математическая модель и определены критерии значимости, а также установлено влияние факторов на процесс изнашивания по результатам дисперсионной модели. Третья часть работы включает пятую главу, в которой описаны перспективы использования результатов исследований и приведен расчет экономического эффекта от применения результатов исследований в промышленности.

Дальнейшее исследование вопроса повышения износостойкости пар трения с использованием пластичного смазочного материала включает в себя перспективные направления: железнодорожный транспорт/транспорт метрополитена, повышение износостойкости высоконагруженных узлов трения с учетом режима эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ накопленных данных об износе гребня и бандажа локомотивных колесных пар // Гудок.–2015. –№ 170.
2. Андреев А.И. Износ рельсов и колёс подвижного состава / А.И. Андреев, К.Л. Комаров, Н.И. Карпущенко // Железнодорожный транспорт. – 1997. – № 7. – С. 31 – 36.
3. Анисимов В. А., Анисимов В. В. Тяговые расчеты: монография. Хабаровск.–2013.–79с.
4. Аппель П. Теоретическая механика, т. I. / П.Аппель. – Физматгиз». – 1960. – 515 с.
5. Аппель П. Теоретическая механика, т. II. / П.Аппель. – Физматгиз». – 1960. – 487 с.
6. Ахметзянов Р.Р., Твердые смазочные материалы и их применение / Р.Р. Ахметзянов, Х.С. Фасхутдинов, И.Х Гималтдинов, Р.С. Шайхетдинова, Т.Н. Вагизов // Вестник Казанского технологического университета. Казань КНИТУ. – 2014. – Т.17. – №13. – С.306.
7. Балановский А.Е., Глазков В.С., Мороз Б.А. и др. Плазменное упрочнение гребней колесных пар подвижного состава / Сб. тр. СГУПС «Новые технологии на ВСЖД». – Новосибирск: СГУПС. – 1999. – с. 57– 65.
8. Балановский А.Е., Хаяси С.М. Проблема износа пары трения колесо–рельс (краткий анализ и предложения). – Иркутск: Плазмопротек. – 1997. – 56 с.
9. Блохин, М. А. Методы рентгеноспектральных исследований / М. А. Блохин. – Москва : Государственное издательство физико–математической литературы. –1959. – 390 с.
10. Богданов В.М. Снижение интенсивности износа гребней колёс и бокового износа рельсов // Железнодорожный транспорт. – 1992. – №12. –30 с.
11. Богданов В.М. Моделирование процессов контактирования, изнашивания и накопления повреждений в сопряжении колесо – рельс / В.М. Богданов // Трение и износ: международный научный журнал. – 1996. –№ 1. –С. 12–26.
12. Бондаренко Г.В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ пленок, слоев и покрытий // Препринт ИФСО–16Ф. Красноярск. –Институт физики им. Л.В. Киренского СО АН СССР. –1974. –41 с.
13. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. Перевод с англ. Н. М. Михина и А. А. Силина ; Под ред. д–ра техн. наук И. В. Крагельского. – Москва : Машиностроение. – 1968. – 543 с.
14. Браун Э. Д., Петрова И. М., Москвитин Г. В. Критерии для оценки долговечности элементов трибосопряжения //Трение и износ. – 1998. – Т. 19. – №. 2. – С. 176–181.

15. Буйносов А.П. Влияние условий эксплуатации на износ бандажей // Локомотив. –1995. –№ 1. –С. 33– 34.
16. Буйносов А.П. Износ бандажей и рельсов: причины и возможности сокращения // Железнодорожный транспорт. – 1994. – № 10. – С. 39–41.
17. Буйносов А.П., Наговицын В.С. Система бесконтактного измерения бандажей // Локомотив. –1995. –№ 12.–С. 27– 28.
18. Буйносов А. П. Разработан бортовой локомотивный гребнесмазыватель "твердого" типа / А. П. Буйносов, И. М. Пышный // Научно–технический вестник Поволжья. – 2011. – № 3. – С. 92– 96.
19. Буйносов А.П. Влияние разности диаметров колёсных пар на их износ с учётом средств технической диагностики / А.П. Буйносов, К.А. Стаценко // Сборник трудов "Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте", ЧИПС УрГУПС. Челябинск. –2002. – С. 24 – 33.
20. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава. – Екатеринбург: УрГУПС. –2009. – 224 с.
21. Буйносов А.П., Мишин Я.А. Повреждение электрическим током роликовых подшипников грузовых электровозов // Новая наука: Современное состояние и пути развития. – 2015. – № 6–2. – С. 149–154.
22. Буйносов А.П., Денисов Д.С. Исследование нагруженности бандажа электровоза с учетом реализации предельных тяговых усилий // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 2 – 2 (63). – С. 134–14.
23. Буйносов А.П., Умылин И.В. Выбор конфигурации профиля бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Новая наука: Стратегии и векторы развития. – 2015. – № 6 – 2. – С. 78–83.
24. Буйносов А.П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава: Монография. – М.: Изд-во «УМЦ образования на ж.д. тр-те». –2010 – 224с.
25. Буше Н.А. Тодер И. А. Об образовании вторичных структур при трении металлополимера со сталью //Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – №. 2. – С. 38–45.
26. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах //М.: Транспорт. – 1987. – Т. 223. – С. 6.
27. Буяновский И. А., Игнатьева З. В., Левченко В. А., Матвеев В. Н. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел / И. А. Буяновский, З. В. Игнатьева, В. А. Левченко, В. Н. Матвеев // Трение и износ. – 2008. – Т. 29. –№ 4. – С. 375–381.
28. Буяновский И. А., Дроздов Ю. Н., Игнатьева З. В.. Влияние покрытий–ориентантов на кажущуюся энергию активации разрушения

граничного слоя / И. А. Буяновский, Ю. Н. Дроздов, З. В. Игнатьева [и др.] // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 1. – С. 15–20.

29. Буяновский И. А. Граничная смазка адсорбционным слоем / И. А. Буяновский // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 1. – С. 48–67.

30. Буяновский И. А., Левченко В. А., Игнатьева З. В., Матвеев В. Н. Наноструктурированные углеродные покрытия–ориентанты и их взаимодействие с граничными смазочными слоями / И. А. Буяновский, В. А. Левченко, З. В. Игнатьева, В. Н. Матвеев // Трение и износ. – 2009. – Т. 30. – № 6. – С. 569–574.

31. Буяновский И. А., Игнатьева З. В., Большаков А. Н. Механизм повышения смазочного действия масел при трении сталей с углеродным покрытием–ориентантом / И. А. Буяновский, З. В. Игнатьева, А. Н. Большаков [и др.] // Физика, химия и механика трибосистем. – 2011. – № 10. – С. 156–161.

32. Буяновский И. А., Левченко В. А., Большаков А. Н., Матвеев В. Н. Монокристаллическое углеродное покрытие и смазочная способность масел / И. А. Буяновский, В. А. Левченко, А. Н. Большаков, В. Н. Матвеев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – № 3. – С. 97–101.

33. Буяновский И. А., Лашхи В. Л., Доценко А. И., Самусенко В. Д. Оценка антифрикционных свойств растворов сульфонатов кальция в полиальфаолефиновом масле / И. А. Буяновский, В. Л. Лашхи, А. И. Доценко, В. Д. Самусенко // Поликомтриб–2015: Тезисы докладов международной научно–технической конференции, Гомель, 23–26 июня 2015 года / Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель: Государственное научное учреждение Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси.–2015. – С. 177.

34. Вальран О. Исследование механических систем методами динамического моделирования / О. Вальран, А. Яшинский // Железные дороги мира. – 1987. – № 12. – С. 36–45.

35. Ващишина А. П. Разработка системы смазывания гребня колеса вагона на основе технологии масляного пара и использования противодеструкционных присадок с целью увеличения межремонтного пробега / А. П. Ващишина // Исследования по приоритетным направлениям современной науки для создания инновационных технологий : материалы XI Региональной научно–практической конференции молодых исследователей и специалистов, Брянск, 31 октября – 01 2019 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2019. – С. 17–20.

36. Ващишина А. П. Повышение износостойкости пары трения колесо–рельс локомотива использованием антифрикционных присадок / А. П. Ващишина // XXXIII Международная инновационная конференция молодых

ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС – 2021) : Труды конференции, Москва, 30 ноября – 02 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 214–220.

37. Ващишина А. П. Исследование свойств смазочного материала Пума с присадками в системе гребень колеса–рельс / А. П. Ващишина, С. П. Ващишин // Трибология – машиностроению: Труды XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова, Москва, 12–14 октября 2022 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук. –2022. – С. 73–76.

38. Вериго М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган / под общ. ред. М.Ф. Вериго. – М.:Транспорт. – 1986. – 559 с.

39. Вериго М.Ф. Анализ методов математического моделирования динамических процессов в исследованиях интенсивности развития бокового износа рельсов и гребней колес / М.Ф. Вериго // Вестник Всесоюз. н.– и. института ж.– д. транспорта. – М. –1997. – № 6. – С. 24– 32.

40. Вериго М.Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава / М.Ф. Вериго // Науч. труды Всесоюз. н.– и. ин–та ж.–д. транспорта. – М.:Трансжелдориздат. – 1955. – Вып.97. – 228 с.

41. Вериго М.Ф. Имитационное моделирование сил взаимодействия экипажа и пути / М.Ф. Вериго, Г.И. Петров, В.Д. Хусидов // Бюллетень ОСЖД. – Варшава. –1993. – № 4. – С. 3– 8.

42. Вериго М.Ф. К вопросу о процессах взаимодействия необрессоренных масс и пути / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган // Вестник Всесоюз. н.– и. ин–та ж.д. транспорта. – Москва. –1969. – Вып.6. – С.22– 25.

43. Вершинский С.В. Динамика вагона / С.В Вершинский., В.Н. Данилов, И.И.Челноков. – М.: Транспорт. –1978. – 352 с.

44. Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е. Создание и моделирование новых смазочных композиций для лубрикации из отходов химического производства // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. –2011. –№ 1. –С. 148– 156.

45. Винокуров Д.И., Гозбенко В.Е., Якимова Г.А., Корчевин Н.А. Трибохимические реакции в зоне трения колесо-рельс при использовании нетрадиционных смазочных композиций // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. –2011. –№ 2. –С. 190– 193.

46. Воробьев А. А. Контактное взаимодействие колеса и рельса // Вестник Иркутского государственного технического университета. –2009. –№3(39). –С.42– 47.

47. Воробьёв А. А., Погудин В. Г. Роль лубрикации и структуры поверхностного слоя в увеличении ресурса железнодорожного колеса при взаимодействии с рельсом // Транспорт Поволжья. –2010, № 4. –С. 26 – 30.

48. Патент 2318013 Рос. Федерация. № 2006131639/04. Воротилкин А.В., Гозбенко В.Е., Каргапольцев С.К., Хоменко А.П., Корчевин Н.А. Композиция для снижения износа в паре трения колесо – рельс. // Патент 2318013 Рос. Федерация. № 2006131639/04, 2008.

49. Голего Н.Л., Шелест Б.П. и др. Амплитуда взаимного перемещения как фактор, определяющий процессы на контакте трения в условиях вибрации // Проблемы трения и изнашивания. –Киев: Техника. –1974. –№ 5. –С. 43–46.

50. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. –Киев.: Техника. –1965. – 231с.

51. Голутвина Т.К. Влияние на износ материалов рельсов и гребней колес, удельного давления в контакте / Т.К. Голутвина // Вестник ВНИИЖТ. –1961. – № 3. – С. 21–23.

52. Горский А.В. Анализ износа бандажей / А.В. Горский, А.П. Буйносов //Железнодорожный транспорт. – 1991. – №1. – С. 46–47.

53. Горский А.В. Об износе бандажей электровозов ЧС2 и ЧС3 / А.В. Горский, А.П. Буйносов // Железнодорожный транспорт. – 1992. – № 5. – С.45–47.

54. Горячева И.Г. Моделирование изнашивания деформируемых тел на разных масштабных уровнях // Физическая мезомеханика. –2007. –Т. 10. –№ 5. –С. 31–39.

55. Грачева Л. О. Показатели динамики и воздействия на путь грузовых четырехосных вагонов при различных износах тележек и отступления от норм содержания в прямых участках пути / Л. О. Грачева, В. О. Певзнер, П. С. Анисимов // Тр./ ВНИИЖТ. –1976. – Вып. 549. – С. 4 – 25.

56. Григорьев А.В., Лепов В.В. Всесезонная модель оценки ресурса локомотивного колеса и рельса на основе анализа интенсивности бокового износа // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. –Т.21. –№8. С. 186–192.

57. Данилов В. Н. Динамические расчетные характеристики железнодорожного пути в линейчатых схемах для вертикальной плоскости / В. Н. Данилов, В. Ф. Яковлев, В. И. Полетаев, А. И. Саутин // Вестник ВНИИЖТ. –1974. – № 16. – С. 37 – 41.

58. Данилов В. Н. Железнодорожный путь и его взаимодействие с подвижным составом / В. Н. Данилов. – М.: Трансжелдориздат. –1961. – 112 с.

59. Данович В.Д. Влияние способа определения сил псевдоскольжения на результаты решения задачи взаимодействия пассажирского вагона и пути / В.Д. Данович, Т.Ф. Мокрый, Е.В. Трубицкая. – Днепропетровск. – 1983. – 16 с.

60. Денисова Н.Е., Воячек Т.А. Исследование механизма избирательного переноса при использовании металлоплакирующих пластичных смазок // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. –2011. –Т.2. –С. 136–138.
61. Докшанин С.Г. Повышение свойств пластичных смазочных материалов применением ультрадисперсного наполнителя // Новые материалы и технологии машиностроения. –2012. –№ 15. –С. 33–36.
62. Дружинина О.В. Алгоритм анализа устойчивости модели динамического взаимодействия поезда и железнодорожного пути при сейсмических воздействиях / Дружинина О.В., Климова Д.В., Мулкиджан А.С. // Наука и техника транспорта. – 2011. –№4. – С. 24– 32.
63. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.:Наука.–1980. –228 с.
64. Евдокимов Ю.А. Проблема триботехники на железнодорожном транспорте // Железнодорожный транспорт. –1989. – №6. с. 43– 45.
65. Иванов В.Н. Конструкция и динамика тепловозов / Под ред. Иванова В.Н. 2–е изд., доп. – М.:Транспорт. –1974. – 336с.
66. Жаров И.А. Влияние различных факторов на боковой износ рельсов через углы набегания и боковые силы при движении тележки в кривой/ Жаров И.А., Захаров С.М.// Вестник Всесоюз.н.–и. ин–та ж.–д. транспорта. –М. –1999. – №5. –С.3–7.
67. Жаров И.А., Захаров С.М. Зависимость типа изнашивания колес и рельсов от параметров их контакта и ширины колеи / И.А.Жаров, С.М.Захаров // Вестник научно–исследовательского института железнодорожного транспорта. –2010. –№2. – С. 46– 49.
68. Жуковский Н.Е. Трение бандажей железнодорожных колес о рельсы // Собр. соч. –М.–Л.: Госиздат. –1950. – Т. 7. – С. 426– 478.
69. Захаров С.М. Трибологические аспекты взаимодействия колеса и рельса / Захаров С.М., Жаров И.А., Комаровский И.А. // Сб. докладов Межд. конф. ассоциации тяжеловесного движения «Проблемы взаимодействия колеса и рельса». –М. –1999. – Т.1. – С. 221–228.
70. Зернин М. В. Гидродинамический анализ подшипников скольжения. часть 1: учёт нецилиндричности рабочих поверхностей //Трение и износ. – 2014. – Т. 35. – №. 5. – С. 584–595.
71. Иванова Т.В., Петровых В.А., Налабордин Д.Г. Определение износа гребня колеса грузового вагона // Сборка в машиностроении, приборостроении. –2017.–№ 1.–с. 27-29.

72. Исаев И.П. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами [Текст] / Исаев И.П., Лужнов Ю.М. – М.: Машиностроение. –1985. – 238 с.
73. Казанский Л. П., Торченкова Е. А., Спицын В. И. Структурные принципы в химии гетерополисоединений // Успехи химии. — 1977. –№46. –вып. 7. –С.1137—1159.
74. Калкер И.И. Обзор теории локального скольжения в области упругого контакта с сухим трением / Калкер И.И., де Патер А.Д. // Прикладная механика. –1971. –Т. 7. – №5. –С. 9– 20.
75. Карпущенко Н. И., Величко Д. В., Бобовникова Н. А. Влияние ширины колеи и состояния ходовых частей подвижного состава на интенсивность износов в системе «Колесо—рельс» и безопасность движения //Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №. 22. – С. 91–101.
76. Касаткин Г.Н. Водород в конструкционных сталях. / Г.Н. Касаткин – М:Интермет Инжиниринг. –2003. – 336 с.
77. Кислик В.А. Износ бандажей колесных пар магистрального электроподвижного состава постоянного тока / В.А. Кислик, М.А. Вдовин // Повышение сроков службы рельсов и колес: Труды РИИЖТ. – М.: Транспорт. – 1967. – Вып. 63. – С.170–172.
78. Кислик В.А. Износ углеродистой бандажной стали / В. А. Кислик, инж.–металлург, кандидат техн. наук.–Москва: Изд. и 1 тип. Трансжелдориздата. –1938. –144 с.
79. Кармазин А. И. Износ и повреждение поверхности катания колес грузовых вагонов / Кармазин А. И., Кислик В. А. // Тр. РИИЖТа / РИИЖТ. – М.: Транс. жел. дориздат. –1958. –Вып.23. – С. 5–169.
80. Ключкова, Е.А. Промышленная, пожарная и экологическая безопасность на железнодорожном транспорте: Учеб. пособие / Е.А. Ключкова. – М.: ГОУ «Учебно–методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». –2007. – 456 с.
81. Ковалев Н.А. Боковые колебания подвижного состава. –М.: Трансжелдориздат. –1957. – 248 с.
82. Коган А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь // Науч. труды Всесоюз. н.–и. ин–та ж.–д. транспорта. –М.: Транспорт. –1969. – Вып.402. – 206 с.
83. Коган А.Я. Поперечные горизонтальные силы, действующие на железнодорожный путь в прямых участках / Коган А.Я. [и др.] // Науч. труды Всесоюз. н.–и. ин–та ж.–д. транспорта. – М.: Транспорт. –1979. – Вып. 619. 88 с.

84. Комаровский И. А. Моделирование изнашивания пары гребень колеса – рельс на роликах при поперечном проскальзывании / И.А. Комаровский, И.А. Жаров // Трение и износ. – 1997. – №2. – Т.18. – С. 174– 180.
85. Кононов В. Е. Пути снижения износа гребней колесных пар локомотивов // Локомотив. — 2005, №2. — С. 7 – 9.
86. Кораблёв А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. –М.: Машиностроение. –1968. –288с.
87. Коссов В.С. Влияние лубрикации рельсов на динамические качества и износ гребней колес при движении локомотива в кривых // Вопросы транспортного машиностроения: сб. – Брянск: БГТУ. –2000. – С. 31– 39.
88. Коссов В.С., Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю., Галичев А.Г. Математическая модель пространственных колебаний грузового тепловоза для исследования движения в режиме тяги и выбега// Научные труды Всероссийского научно-исследовательского тепловозостроительного института. –1999. –№ 79. –с. 143–158.
89. Коссов В.С. Снижение бокового воздействия на путь как результат применения комбинированной лубрикации рельсов / В.С. Коссов, Ю.А. Панин, А.В. Трифонов // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тез. докл. LXVI Междунар. науч.– практ. конф. –Днепропетровск. – 2006. – С.64– 65.
90. Коссов В.С. Улучшение условий взаимодействия колес локомотивов с рельсами // Железные дороги мира. – 2000. – № 4. – С. 22– 29.
91. Коссов В.С., Михальченко Г.С., Погорелов Д.Ю., Галичев А.Г. // Труды ВНИТИ, Коломна. –1999. – Вып.79. – С.143– 158.
92. Костецкий Б.И., Колесниченко Н.Ф. Качество поверхности и трение в машинах. Техника. –1969. –216с.
93. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. – М.:Машиностроение. –1977. – 526 с.
94. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение. –1968. – 479 с.
95. Крагельский И.В., Алесин В.В. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. Кн. 1. – М.: Машиностроение. –1978. – 400 с.
96. Кужаров А.С. Концепция безызносности в современной трибологии // Известия ВУЗов. Северо– Кавказский регион. 2014. № 2. С. 23– 31.
97. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безызносности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. –2011. –Т.13. –№ 4. –С. 772–775.
98. Кумар С. Эффективность лубрикации рельсов: лубрикация рельсов // Железные дороги мира. – 2011. – №1. – С. 65– 68.

99. Куценко С. М., Блейхер А. И., Елбаев Э. П. Динамика установившегося движения локомотивов в кривых / и др.; Под ред. д-ра техн. наук, проф. С.М. Куценко. – Харьков: Вища школа: Изд-во при Харьк. ун-те, 1975. – 131 с.

100. Ларин Т.В. Износ и пути продления срока службы бандажей железнодорожных колёс // Труды ЦНИИ МПС. вып.165. М.: Трансжелдориздат. –1958. –167с.

101. Лесничий В. С. Компьютерное моделирование задач динамики железнодорожного подвижного состава. Ч. 3: Моделирование динамики грузовых вагонов в программном комплексе MEDYNA: учеб. пособие / В. С. Лесничий, А. М. Орлова. – СПб.: ПГУПС. –2002. – 35 с.

102. Либхавски Х.А. Применение поглощения и испускания рентгеновских лучей: Рентгеновский спектроскопический анализ / Х.А. Либхавски и [др.]. Пер. с англ. [Под ред. М.А. Блохина, К.И. Нарбута]. –М.: Металлургия. –1964. –391 с.

103. Лосев Н.Ф.Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ М.: Наука. –1969. –336 с.

104. Лужнов Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности. – М.: ИНТЕКСТ. –2003. – 144 с.

105. Лукашев Е. А. Трибохимия водородного износа: монография / Е. А. Лукашев, М. Е. Ставровский, А. В. Олейник, В. М. Юдин, С. Г. Емельянов. – Курск: Курск ГТУ. –2007. – 279 с.

106. Лукашев Е. А., Сидоров М. И., Юрцев Е. С. Анализ связи процессов водородного изнашивания и образования гидридов // Современные материалы, техника и технологии. –2017. –№ 2 (10), 2017. –С. 84–90.

107. Лукашев П.Е. Математическое моделирование трибохимической кинетики водородного износа: диссертация ... кандидата технических наук: 05.17.08 / Лукашев Павел Евгеньевич; [Место защиты: Рос. гос. ун-т туризма и сервиса]. – Москва, 2008. – 250 с.: ил. РГБ ОД, 61 09–5/694.

108. Лысюк В. С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. 2– е изд., перераб. и доп / Ю. М. Лужнов. — М.: Транспорт. –2002. – 215 с.

109. Любимов Д.Н., Колесников В.И., Гершман И.С., Колесников И.В. Критерий выбора материалов трибосопряжения, основанный на теории адгезионного взаимодействия Лифшица–Гамакера // Физ. мезомех. – 2020. – Т. 23. – № 1. – С. 56– 61.

110. Манг Т., Дрезель У. Смазки. Производство, применение, свойства. Справочник: Пер. с англ. 2– го изд. / Под ред. В.М. Школьников. — СПб.: ЦОП «Профессия». –2010. — 944 с.

111. Марков Д.П. Задир боковых поверхностей рельсов и гребней колес / Д.П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2004. – № 4. – С. 5–18.

112. Марков Д.П. Испытания рельсовых смазочных материалов на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» // Промышленный транспорт XXI век. – 2012. – № 1. – С.49– 52.

113. Мартышова О. А. Мобильные рельсосмазыватели на комбинированном ходу / О. А. Мартышова // Актуальные вопросы науки и техники: Студенческая международная научно–практическая конференция.– Воронеж: Федеральное Государственное Бюджетное Образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет путей сообщения. Воронежский филиал. –2014. – С. 132– 133.

114. Матвеевский Р.М. Исследование температурной стойкости смазочных слоёв при трении // Трение и износ. – 1980. – №11. – с. 126–136.

115. Микалюнас Ш., Лингайтис Л.П., and Подвезько В. Вероятностные оценки влияния лубрикаторов на износ колесных пар // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. –2004. –№ 4. –С. 74– 80.

116. Мобильный рельсосмазыватель [Электронный ресурс] // Группа компаний ТВЕМА– URL:http://www.tvema.ru/ru/productList_4794.html

117. Мороз Б.А., Марютин К.А., Балановский А.Е. Комплексная система ресурсосбережения колес и рельсов (опыт Восточно–Сибирской железной дороги) // Локомотив. –1998. –№ 19. –с. 19– 22.

118. Муравьев И.Б., Корнеев А.А. Проблемы использования и перспективы применения металлоплакирующих смазочных материалов // Сервис в России и за рубежом. –2014. –№ 1 (48). –С. 12–20.

119. Никитин Д.Н. Моделирование кинематических параметров колес железнодорожного подвижного состава / Д.Н. Никитин, Р.В. Коблов, Я.А. Новачук, В.Г. Григоренко // Вестник науч.–исслед. ин. ж.–д. трансп. – 2012. – № 4. – С. 30–34.

120. Никитин Д.Н. Повышение ресурса колесных пар локомотивов с тележками поводкового типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 17.02.16: утв. 11.07.16 / Никитин Дмитрий Николаевич. – СПб., 2016. – 142 с. – 13/5– 1408 К 19.04.2016.

121. Орлова А.М., Лесничий В.С., Артамонов Е.И. Исследование влияния состояния тележек грузовых вагонов на боковой износ гребней колес по результатам математического моделирования и обследования вагонов в эксплуатации // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского

национального университета железнодорожного транспорта. –2008. – №23. –С. 69– 75.

122. Патент на полезную модель № 213676 U1 Российская Федерация, МПК В61К 3/02 Ващишина А. П. Система смазывания гребня колеса локомотива: № 2022103341: заявл. 09.02.2022: опубл. 21.09.2022.

123. Патент на полезную модель № 206935 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 Шалыгин М. Г., Ващишина А. П.. Машина трения: № 2020142642: заявл. 22.12.2020: опубл. 01.10.2021.

124. Петров Н.П. Давление колес на рельсы железных дорог, прочность рельсов и устойчивость пути. – Петроград. –1915. – 327 с.

125. Петрушин А.Д., Игнатьев О.Л., Глазунов Д.В. Устройство для смазывания открытых узлов трения // Вестник Научно– исследовательского института железнодорожного транспорта. –2017. –№76(6). –С.348–353.

126. Прогнозируемый ремонт // Гудок.–2015.– № 170.

127. Прокопенко А.К. Повышение срока службы деталей машин и инструмента металлоплакированием: монография / А.К. Прокопенко и др. –М.: ИИЦ МГУДТ. –2010. –86 с.

128. Рыбакова Л.М. Структура и износостойкость металла / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова. – М.: Машиностроение. –1982. – 209 с.

129. Савенкова М. А., Мардиросова И. В., Полетаев Э. В. // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. –1975. –вып. 1. –С.34–37.

130. Савинкин С. В. Мониторинг отказов оборудования электровозов серии 2ЭС6 / С. В. Савинкин, С. Г. Шантаренко // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы научной конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения. –2021. – С. 100– 112.

131. Семёнов А.П. Схватывание металлов. М.: Машгиз. –1958. – 280с.

132. Семенов С. А. Определение длины пути трения гребня по боковой грани головки рельса // СНУ ім. В. Даля. –2018.

133. Семенов С. О. Зниження опору руху рейкових екіпажів за рахунок удосконалення конструкції ходової частини: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / С. О. Семенов; СНУ ім. В. Даля. - Сєверодонецьк, 2018. – 200 с.

134. Смазочные материалы для лубрикации зоны контакта колес и рельсов: Технические требования. – М.: ОАО «РЖД», 2010. – 88 с.

135. Ставровский М.Е. Исследование технологических мероприятий по снижению наводораживания материалов / М.Е. Ставровский, М.И. Сидоров, С.Г. Емельянов, С.П. Посеренин, И.М. Константинов // Известия юго–западного государственного университета. Серия: техника и технологии. — 2016. — №2. — С. 20– 25.

136. Ставровский М.Е. Исследование эксплуатационного наводораживания материалов деталей / М.Е. Ставровский, М.И. Сидоров, С.Г. Емельянов, С.Г. Посеренин // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – №2. – С. 59– 65. 204.

137. Ставровский М.Е. Моделирование адгезии при контактном взаимодействии металлов / М.Е. Ставровский, А.Ю. Албагачиев, М.И. Сидоров // Современные материалы, техника и технологии. –2016. – № 7. – С. 168–173.

138. Ставровский М.Е. Технологические методы защиты деталей узлов машин от водородного изнашивания / М.Е. Ставровский, А.В. Олейник, С.Г. Емельянов // Технология машиностроения. –2009. –№ 9. – С. 39– 41.

139. Старикова Г.В, Белый Д.В., Стариков В.Н. Антифрикционная металлоплакирующая смазка: а. с. 827538 СССР, МПК C10M 5/02/; заявл. 14.08.78; опубл. 07.03.81, Бюл. № 17.

140. Стратегические направления научно-технического развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г. – М.: Белая книга. 2008.

141. Тимошенко С.П. К вопросу о вибрациях рельсов. О динамических напряжениях в рельсах / С.П. Тимошенко // Вестник инженеров. –1915. – т. 1. – № 4. – С. 143– 152.

142. Тувшинтура Б., Винокуров Д.И., Якимовас Г.А., Гозбенко В.Е. Применение смазки для системы «колесо – рельс». Решение проблемы износа с использованием отходов производства // Системы. Методы. Технологии. –2015. –№ 3 (27). –с. 23– 31.

143. Фейзов Э.Э. Увеличение ресурса колесных пар подвижного состава железных дорог: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.07: защищена 17.04.16: утв. 21.10.16 / Фейзов Эмин Эльдарович. – Ростов-на-Дону, 2016. – 188 с. – 10201601746.

144. Харрис У. Д., Захаров С. М., Ландгрэн Д. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Д. Харрис, С. М. Захаров, Д. Ландгрэн [и др.]. – Москва: Интекст. – 2002. – 408 с.

145. Холодецкий А.А. Исследование влияния внешних сил на верхнее строение пути // Инженер. – 1898. – № 9. –С. 177– 202.

146. Холодецкий А.А. К вопросу о влиянии скорости и неправильного вида колес на динамические прогибы рельсов. – М.. –1915. – 93 с.

147. Хрущёв М.М. Лабораторные методы испытания на изнашивание материалов зубчатых колёс. М.: Машиностроение. –1966.– 185 с.

148. Цеглинский К.Ю. Железнодорожный путь в кривых. – М.. –1903. – 155 с.

149. Цеглинский К.Ю. Курс железных дорог // Общие сведения о железных дорогах. Подвижной состав и условия прохождения его по рельсовой

колес. Проектирование железнодорожной линии. –М.–1913. –Т.1. –вып. 1. – 263 с.

150. Чичинадзе А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. 2–е изд. М.: Машиностроение. –2001. –664 с

151. Шалыгин М.Г., Ващишина А.П. Недостатки систем смазывания гребня колесной пары локомотива // В сборнике: Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники. материалы Международной научно– технической конференции. Брянский государственный технический университет. –2020. С. 67– 70

152. Шалыгин М. Г. Обзор причин интенсивного износа гребня колесной пары и способов его уменьшения / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Механики XXI века. – 2020. – № 19. – С. 202–207.

153. Шалыгин М. Г. Антифрикционные присадки к смазочному материалу гребня колеса локомотива / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Проблемы прикладной механики: Сборник материалов и докладов международной конференции, Брянск, 01–03 декабря 2020 года / Под общей редакцией М.Г. Шалыгина. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 195–200. – DOI 10.30987/conferencearticle_5fd1ed04995088.17668015. – EDN TLQYIX.

154. Шалыгин М. Г. Эффективность фосфорорганических присадок в системе смазывания гребня колеса локомотива / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 9. – С. 410–413. – DOI 10.36652/0202–3350–2021–22–9–410–413. – EDN CXZRAV.

155. Шалыгин М. Г. Повышение износостойкости бандажа колеса локомотива улучшением антифрикционных свойств смазочного материала / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(83). – С. 45–53. – DOI 10.46973/0201–727X_2021_3_45. – EDN CJNMPS.

156. Шалыгин М. Г. Повышение триботехнических характеристики смазывающего материала, предназначенного для смазывания гребня колеса магистрального локомотива / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 12(109). – С. 19–25. – DOI 10.30987/1999–8775–2021–12–19–25. – EDN SBPPXB.

157. Шалыгин М. Г. Методика испытаний на износ при низких температурах / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина, А. В. Васильев // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: Сборник научных статей 7–й Всероссийской научно–технической конференции с международным участием, Курск, 10–11 февраля 2022 года / Редколлегия:

Разумов М.С. (отв. ред.). – Курск: Юго–Западный государственный университет, 2022. – С. 215–219. – DOI 10.47581/2022/МТО–62/Shaligin.01.

158. Шалыгин М. Г. Технология восстановления шейки оси активного колеса локомотива / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 10(10). – С. 36–41. – DOI 10.30987/2782–5957–2022–10–36–41. – EDN EUGDPS.

159. Шалыгин М. Г., Буяновский И. А., Самусенко В. Д., Ващишина А. П. Фрикционные свойства присадок к смазочному материалу гребня бандажа локомотива / М. Г. Шалыгин, И. А. Буяновский, В. Д. Самусенко, А. П. Ващишина // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 1. – С. 37–39. – DOI 10.36652/0202–3350–2023–24–1–37–39.

160. Шалыгин М. Г. Математическое моделирование скорости изнашивания пары трения колесо локомотива–рельс / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 1. – С. 34–40. – DOI 10.32864/0202–4977–2023–44–1–34–40.

161. Шалыгин М. Г., Буяновский И. А., Самусенко В. Д., Ващишина А. П. Трибологические свойства полужидкого смазочного материала с присадками поверхностно–активных веществ / М. Г. Шалыгин, И. А. Буяновский, В. Д. Самусенко, А. П. Ващишина // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – № 5. – С. 418–426. – DOI 10.32864/0202–4977–2023–44–5–418–426.

162. Шаповалов, В.В. Повышение эффективности системы «Путь – подвижной состав» / В.В. Шаповалов, И.А. Майба, П.Н. Щербак // Локомотив. – 2011. – № 6. – С. 40–41.

163. Щедрин А.В., Зинин, М.А., Гаврилов, С.А. Влияние металлоплакирующей присадки Валена на показатели комбинированной обработки // Вестник машиностроения. – 2011. – №9. – С. 77–80.

164. Юбелакер Г. Исследование движения локомотивов на тележках в кривых участках/ Г. Юбелакер. «Organ fd F»: Beilage. – 1903.

165. Abbasi S., Jansso A., Sellgren U., Olofsson U. Particle emissions from rail traffic: A literature review // Critical reviews in environmental science and technology. –2013. –№43. –P.2511–2544.

166. Amiri M, Khonsari M.M. On the thermodynamics of friction and wear—a review // Entropy. –2010. –12. –P.1021–1049.

167. Arias–Cuevas O., Li Z., Lewis R., Gallardo–Hernández E.A. Rolling–sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel–rail contacts // Wear 268. –2010. –P.543–551.

168. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces / J. F. Archard // J. Appl. Phys. – 1953. – Vol. 24. – № 8. – P. 981– 988.

169. Baek K.S., Kyogoku K., Nakahara T. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions // *Wear* 263. –2007. –P.169–179.
170. Barcroft P.T., Park D. Interactions of heated metal surfaces between Zinc Dialkyldithiophosphates and other lubricating oil additives // *Wear*. –1986. – P.108–213.
171. Bucher F., Dmitriev A.I., Ertz M., Knothe K., Popov V.L., Psakhie S.G., et al. Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact // *Wear* 261. –2006. – P. 874–884.
172. Carter F.W. On the action of locomotive driving wheel /F.W. Carter // *Proc. Roy. Soc. – Ser. A. – 1926. – V. 112. – P. 151– 157.*
173. Chen H., Ban T., Ishida M., Nakahar T.: Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions // *Wear* 265. –2008. –P. 1504–1511.
174. Daniel S., Cuhaudhury M.K., Chen J.C. Fast drop movements resulting from the phase change on a gradient surface // *Science*. –2001. P. –291:633–636.
175. Deryaguin B.V., Karassev V.V., Zakhavaeva N.N., Lazarev V.P. The Mechanism of Boundary Lubrication and the Properties of the Lubricating Film. Short– and Long– Range Action in the Theory of Boundary Lubrication. // *Wear* 1. –1958. – P.277–290.
176. Eadie D.T., Elvidge D., Oldknow K., Stock R., Pointner P., Kalousek J., et al. The effects of top of rail friction modifier on wear and rolling contact fatigue: Full–scale rail– wheel test rig evaluation, analysis and modelling // *Wear* 265. – 2008. –P.1222–1230.
177. Fusaro R.L. Preventing spacecraft failures due to tribological problems // *NASA/TM*. – 2001–210806.
178. Gao N., Dwyer–Joyce R.S. The effects of surface defects on the fatigue of water– and oil–lubricated contacts // *P I Mech Eng. J–J Eng* 214. –2000. –P.611–626.
179. Hardy H.B., Doubleday I. Boundary lubrication – the paraffin series // *Proc Roy Soc Lond A*100. –1922. –P.550–757.
180. Hardy W.B. *Collected Scientific Papers of Sir William Bate Hardy* // Cambridge University Press, Cambridge. –1936. –P. 639–644.
181. Kawamura M, Fujita K. Organic sulphur and phosphorus compounds as extreme pressure additives // *Wear* 72. –1981. –P.45–53.
182. Khalladi A., Elleuch K. Tribological Behavior of Wheel–Rail Contact Under Different Contaminants Using Pin–On–Disk Methodology // *Journal of Tribology*. – 2016. – P.139, 011102.

183. Klingel H. Über den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn. Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens in technischer Beziehung // Neue Folge. XX Band. – 1883. – № 4. – P. 113–123.

184. Langmuir I. The mechanism of the surface phenomena of flotation // Trans. Farad. Soc. –1920. –№15. –P.62–74.

185. Larsson R., Kassfeldt E., Byheden A., Norrby T. Base fluid parameters for EHL and friction calculations and their influence on lubrication capability // Proceedings of the Tribology Plus. 12th International Colloquium, Technische Akademie Esslingen. –2000. –Vol. II. –P.2000:1525–1536.

186. Lewis S., Lewis R., Richards P., Buckley–Johnstone L. Investigation of the isolation and frictional properties of hydrophobic products on the rail head, when used to combat low adhesion // Wear 314. –2014. –P.213–219.

187. Liebhafsky H.A. X-Ray Absorption and Emission in Analytical Chemistry / H.A. Liebhafsky et [al]. N. Y. // Wiley. –1960. –357 p.

188. Lyu, Y., Bergseth E., Olofsson U., Lindgren, A., Höjer, M. On the relationships among wheel–rail surface topography, interface noise and tribological transitions // Wear. –2015. –P.338–339, 36–46.

189. Lyu Y., Zhu Y., Olofsson U. Wear between wheel and rail: A pin–on–disc study of environmental conditions and iron oxides // Wear 268. –2015. P–277–285.

190. Moumen N, Subramanian R.S., McLaughlin J.B. Experiments on the motion of drops on a horizontal solid surface due to a wettability gradient // Langmuir. –2006. –P.22:2682–2690.

191. Müller C. T. Dynamische Probleme des Bogenlaufes von Eisenbahnfahrzeugen// ZEV–Glaser's Annalen. – 1956. – V. 80. – № 8. – P. 233–241.

192. Nakahara T., Baek K.–S., Chen H., Ishida M. Relationship between surface oxide layer and transient traction characteristics for two steel rollers under unlubricated and water lubricated conditions // Wear 271. –2011. –P. 25–31.

193. Olofsson U., Zhu Y., Abbasi S., Lewis R., Lewis S. Tribology of the wheel–rail contact – aspects of wear, particle emission and adhesion // Vehicle Syst Dyn 51. –2013. –P.1091–1120.

194. Papay A.G. Antiwear and extreme–pressure additives in lubricants // Lubrication Sci. –1998. –№10(3). –P.209–24.

195. Parks I. R. and Van Wazer I. R. Principles of Phosphorus Chemistry // J. Amer. Chem. Soc. – 1977. –№99. –P.4890.

196. Petrov N.P. Friction in machines and the effect on the lubricant // Inzh. Zh. St. Petersburg. –1992. P.– 277–279; 377–436; 535–564.

197. Roberts E.W., Todd MJ. Space and vacuum tribology // Wear 136. –1990. –P. 157–167.

198. Smith A.J., Cameron, A. Rigid Surface Films // *Proc. Roy. Soc. Lond.* A328. –1972. –P.541–560.
199. Shalygin M. G. Anti-frictional lubricant additives for locomotive wheel flange / M. G. Shalygin, A. P. Vashchishina // *AIP Conference Proceedings: Proceedings international conference "Problems of applied mechanics"*, Bryansk, 01–03 декабря 2020 г. Vol. 2340. – Bryansk: Published by AIP Publishing, 2021. – P. 060003. – DOI 10.1063/5.0047297.
200. Shalygin M. G. Mathematical Modeling of the Wear Rate of the Friction Pair of a Locomotive Wheel–Rail / M. G. Shalygin, A. P. Vashchishina // *Journal of Friction and Wear.* – 2023. – Vol. 44. –No. 1. – P. 18–22. – DOI 10.3103/s1068366623010117.
201. Stock R., Eadie D.T., Elvidge D., Oldknow K. Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application – A full scale wheel–rail test rig study // *Wear* 271. –2011. –P.134– 142.
202. Spikes H.A. Boundary lubrication and boundary films // *Proc. 19th Leeds–Lyon Symposium on Tribology, Leeds. Thin. Films in Tribology.* –1993. –P.331–346.
203. Sumner L.B.S. Lubrication analysis of thermocapillary– induced nonwetting // *Physics of Fluids.* –2003. –P.15:2923–2933.
204. Subramanian R.S., Moumen N., McLaughlin J.B. Motion of a drop on a solid surface due to a wettability gradient // *Langmuir.* –2005. –P. 21:11844–11849.
205. Trillat J.J. The Adsorption of Oils in Relation to Lubrication // *I. Mech. E. Proceedings of the General Discussion on Lubrication and Lubricants.* –1957. –P.55–59.
206. Uebelacker G. Untersuchungen uber die Bewegung von Lokomotiven mit Drehgestellen in Bahnkrummungen // *C.W. Kreidel's Verlag.* – 1903. –P. 26.
207. Yu H.W., Wang X.L., Zhou F. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces // *Tribology Letters.* – 2010. –P.37:123–130.
208. Yuan S.H., Huang W., Wang X.L. Orientation effects of micro– grooves on sliding surfaces // *Tribology International.* –2011. –P. 44:1047–1054.
209. Zakharov S. Simulation of mutual wheel/rail wear / S.Zakharov, I.Zharov // *Wear.* –2002. –№253. – P. 100– 106.
210. Waara P. Lubricant influence on flange wear in sharp railroad curves // *Industrial lubrication and tribology.* –2001. –№53. –P.161–168.
211. Wang W., Shen P., Song J., Guo J., Liu Q., Jin X. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions // *Wear* 271. – 2011. – P.2699–2705.

212. Wang W., Wang H., Wang H., Guo J., Liu Q., Zhu M., et al. Sub-scale simulation and measurement of railroad wheel/rail adhesion under dry and wet conditions // Wear 302. –2013. –P. 1461–1467.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1





УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Рэйл Про»
Корякин М. Н.


«8» апреля 2024 г.

АКТ
внедрения результатов
диссертационного исследования «Повышение износостойкости гребня
бандажа колеса локомотива улучшением антифрикционных свойств
пластичного смазочного материала»

Настоящий акт составлен о том, что производственные рекомендации по теме, выполненной Брянским государственным техническим университетом: «Повышение износостойкости гребня бандажа колеса локомотива улучшением антифрикционных свойств пластичного смазочного материала» приняты к внедрению на предприятии ООО «Рэйл Про», имеющем парк локомотивов ТГМ4 в/и, ТГМ6 в/и, ТЭМ15.

Предприятию были предоставлены рекомендации по составу и концентрации присадок к смазочному материалу, а также технология его производства.

Назначение внедряемой разработки - повышение износостойкости пары трения путем применения присадок к пластичному смазочному материалу.

По полученным результатам производственных испытаний была установлена технико-экономическая эффективность предложенной рецептуры смазочного материала с присадками, сводящаяся к следующему:

1. Применение пластичного смазочного материала с предложенными присадками позволит увеличить срок службы гребня подвижного состава, имеющегося на предприятии в 1,5 раза.
2. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов научно-исследовательской работы составит более 1,5 млн. рублей.

Главный специалист
локомотивного хозяйства
ООО «Рэйл Про»



Гнеушев И. С.