

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)



На правах рукописи

Зиновьев Никита Владимирович

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ В
СОСТАВЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

2.5.3 – Трение и износ в машинах

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
П. В. Харламов

Ростов-на-Дону

2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ И ПАТЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ	11
1.1 Анализ условий эксплуатации открытых тяжело нагруженных узлов трения ..	11
1.2 Результаты внедрения лубрикационной системы в трибологическую пару «колесо – рельс»	13
1.3 Обзор смазочных материалов, применяемых в открытых тяжело нагруженных узлах трения	17
1.4 Анализ состава и свойств смазочных материалов, применяемых в открытых тяжело нагруженных узлах трения	39
1.5 Выводы по главе	53
2 РАЗРАБОТКА И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ТЯЖЕЛО НАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ	57
2.1 Разработка и изготовление опытных образцов наноструктурированного смазочного материала	57
2.1.1 Подбор компонентов наноструктурированного смазочного материала .	58
2.1.2 Расчёт пропорций составляющих наноструктурированной смазки	79
2.2 Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала	89
2.2.1 Физико-математическое моделирование процессов трения и изнашивания в контакте «колесо – рельс»	91
2.2.2 Методика проведения лабораторных исследований опытных образцов по сравнению трибологических характеристик и стойкости к истиранию ...	108
2.2.3 Результаты лабораторных исследований опытных образцов по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию	122
2.2.4 Метод проведения лабораторных исследований опытных образцов по сравнению температурной стойкости	135

2.2.5 Лабораторные исследования опытных образцов по сравнению температурной стойкости	139
2.3 Выводы по главе	140
3 СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	142
3.1 Оптимизация состава наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения	142
3.2 Выводы по главе	157
4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ТЯЖЕЛО НАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ	159
4.1 Этапы изготовления наноструктурированного материала	159
4.2 Технология подачи смазки в зону контакта	162
5 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	170
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	171
ПРИЛОЖЕНИЕ А	185

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт является одним из ключевых элементов транспортной системы Российской Федерации, обеспечивающим массовые перевозки грузов и пассажиров на значительные расстояния. В современных условиях развития экономики особую актуальность приобретают вопросы повышения эффективности и безопасности железнодорожного транспорта, снижения эксплуатационных затрат и негативного воздействия на окружающую среду.

Проблема износа узлов трения в железнодорожной отрасли остаётся одной из наиболее острых. Интенсивное взаимодействие колёсных пар с рельсами приводит к ускоренному износу как подвижного состава, так и верхнего строения пути, что влечёт за собой значительные экономические потери и угрозу безопасности движения. Существующие смазочные материалы не в полной мере решают проблему снижения трения и износа в условиях высоких нагрузок и скоростей.

Актуальность темы исследования. Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью разрешения противоречия между растущими требованиями к ресурсу подвижного состава и ограниченными триботехническими возможностями существующих смазочных сред. Создание новых высокоэффективных материалов, способных под воздействием сверхвысоких нагрузок формировать на поверхностях трения самоорганизующиеся защитные нанослои (сервовитные плёнки), является актуальной научно-технической задачей.

Цель исследования заключается в повышении износостойкости тяжелонагруженных трибосистем на основе разработки высокоэффективных смазочных материалов (в частности, в контакте гребня железнодорожного колеса с боковой поверхностью головки рельса). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

1 Подбор компонентов для повышения триботехнических свойств смазочного материала на основе применения наноструктурированных добавок.

2 Разработка технологии изготовления наноструктурированного смазочного материала, позволяющей получить заданные физико-механические свойства и трибологические характеристики материала.

3 Установление схемы подачи смазочного материала в зону трения открытых тяжело нагруженных узлов трения.

4 Проведение сравнительной оценки эксплуатационной эффективности методами разномасштабного моделирования, а также эксплуатационной проверки эффективности применения наноструктурированных добавок для повышения износостойкости элементов в трибосопряжении «гребень колеса – боковая поверхность головки рельса».

Объектом исследования являются триботехнические процессы трения и изнашивания, протекающие в зонах высоконагруженного контакта открытых узлов железнодорожного подвижного состава. В качестве такого узла выбран наиболее тяжело нагруженный узел трения подвижного состава – контакт «колесо – рельс». Актуальность выбора именно такого объекта продиктована тем, что в этих условиях (давление до 3,5 ГПа) традиционные гидродинамические теории смазки перестают работать и система переходит в режим граничного или сухого трения.

Предметом исследования являются научно обоснованные закономерности управления трением с помощью наноструктурирования, механизм формирования износостойкой структуры, способной выдерживать повышенное число циклов нагружения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Установлены закономерности влияния наличия наноструктурированных частиц на физико-механические и трибологические характеристики тяжело нагруженного узла.

2 Проведена оценка совместимости компонентов смазочных материалов и их стабильности.

3 Установлено и экспериментально подтверждено снижение интенсивности износа в модельном представлении на поверхности трения контакта «боковая поверхность головки рельса – гребень колеса».

4 Представлен механизм подачи смазочного материала в контактную зону трения «колесо – рельс».

Теоретическая значимость исследования:

1 Показана расчетная схема сил, действующих на смазочный материал для реализации условий его самоподачи, определяющая схему установки гребнерельсосмазывателей кассетного типа с учетом обеспечения стабильного объема подаваемого материала.

2 На основе метода трибоспектральной идентификации предложен метод оценки основных триботехнических характеристик смазочного материала, позволяющий осуществить оценку эффективности применения смазок различного агрегатного состояния с высоким уровнем достоверности.

3 Установлено, что обеспечение заданных физико-механических и трибологических характеристик смазочного материала для фрикционного контакта «боковая поверхность головки рельса – гребень колеса» обеспечивается концентрацией наноструктурированной добавки в объеме 10 %.

Практическая значимость исследования:

1 Установлено, что предложенный метод позволяет обеспечить достаточное количество массы разрабатываемого материала в зоне трения.

2 Предлагаемый способ подачи обеспечивает эффективность применения разработанного смазочного материала за счет стабильности его подачи в контактную зону «боковая поверхность головки рельса – гребень колеса», что обеспечивает износостойкость трибосопряжения.

3 Показано, что предлагаемый компонентный состав смазочного материала обладает стабильными трибологическими характеристиками, что сокращает расход смазки при подаче в контактную зону трения.

4 Предложен способ изготовления наноструктурированного смазочного материала, обеспечивающий получение требуемых механических, физико-химических и трибологических характеристик.

Методология исследования базируется на комплексном подходе, включающем теоретические и экспериментальные методы исследования, в том

числе проведение полнофакторного эксперимента, современные методы анализа материалов и обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1 Рецепттура смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения, разработанная автором на основе применения наноматериалов и нанокomпонентов.

2 Технология изготовления наноструктурированного смазочного материала, обладающего заданными характеристиками.

3 Метод повышения износостойкости контактной поверхности «колесо – рельс».

4 Результаты физико-механических и трибологических исследований смазочных материалов оригинальной рецептуры.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности:

Диссертация Зиновьева Н.В. соответствует научной специальности 2.5.3. «Трение и износ в машинах» и охватывает области исследования, связанные с разработкой новых смазочных материалов, исследованием триботехнических свойств материалов и покрытий, а также физическим и математическим моделированием процессов трения и изнашивания:

- п. 2. Механика и физика контактного взаимодействия при трении покоя, трении скольжения, трении качения и качения с проскальзыванием с учетом строения, качества и свойств поверхностных слоев;

- п. 8. Триботехнические свойства смазочных материалов;

- п. 10. Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем;

- п. 16. Материалы трибологического назначения. Исследования и разработка.

Степень достоверности и апробация результатов:

Достоверность полученных в диссертационном исследовании результатов подтверждается корректностью применения математического аппарата,

сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, что подтверждено допустимой сходимостью полученных результатов.

Достоверность теоретических результатов исследований подтверждена не только лабораторными испытаниями опытных образцов наноструктурированного смазочного материала, но и практической апробацией в ходе эксплуатационных испытаний разработанного смазочного материала на базе локомотивов серии ВЛ-80 на полигоне Северо-Кавказской дирекции по ремонту тягового подвижного состава – Дирекции по ремонту тягового подвижного состава – филиала ОАО «РЖД». В результате испытаний было установлено наличие гарантированного переноса смазочного материала в достаточном объеме на гребнях колесной пары, оборудованной бортовыми гребнесмазывателями кассетного типа.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ:

1 **Зиновьев, Н. В.** Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для сравнения трибологических свойств и ресурса к истиранию / Н. В. Зиновьев, П. В. Харламов, Я. К. Склифус // Бюллетень результатов научных исследований. – 2026. – № 1. – С. 196–207. – DOI 10.20295/2223-9987-2026-1-196-207.

2 **Зиновьев, Н. В.** Определение компонентов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения / Н. В. Зиновьев, П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 205–213. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_205.

3 Зиновьев, В. Е. Анализ способов обеспечения надежности, качества и экономической эффективности наземной техники в различных условиях эксплуатации / В. Е. Зиновьев, **Н. В. Зиновьев** // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2024. – № 4. – С. 5–12. – DOI 10.15593/24111678/2024.04.01.

4 Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала / М. А. Мукутадзе, Х. Н. Абдулрахман, В. Е. Шведова, Г. А. Бадахов, **Н. В. Зиновьев** // Омский научный вестник. – 2023. – № 3 (187). – С. 3–14. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14.

5 Разработка математической модели течения ферромагнитного смазочного материала в высоконагруженной клиновидной опоре скольжения / М. А. Мукутадзе, В. М. Приходько, В. Е. Шведова, Г. А. Бадахов, **Н. В. Зиновьев** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 8 (134). – Порядковый номер : 7. – DOI 10.23670/IRJ.2023.134.15.

6 Разработка расчетной модели модифицированного металлополимерного радиального подшипника с учетом зависимости вязкости от давления и температуры / М. А. Мукутадзе, В. М. Приходько, Г. А. Бадахов, В. Е. Шведова, **Н. В. Зиновьев** // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 9 (135). – Порядковый номер : 6. – DOI 10.23670/IRJ.2023.135.57.

7 Зиновьев Н.В., Харламов П.В., Склифус Я.К. Подбор компонентов наноструктурированного смазочного материала для тяжело нагруженных узлов трения // Инновационные транспортные системы и технологии. - 2026. - Т. 12. - №2. - С. 253-267. doi: 10.17816/transsyst705277

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science

8 Calculation model for lubrication of bearings with unconventional support surface profile and fusible shaft surface coating / G. Badakhov, **N. Zinoviev**, M. Mukutadze, V. Shvedova // E3S Web of Conferences. Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering (ERSME-2023). – 2023. – Vol. 376. – Article no. 01084. – DOI 10.1051/e3sconf/202337601084.

9 Calculated model of a lubricant in a bearing with a non-standard support profile of a sleeve and a metal-coated shaft / Kh. Abdurahman, M. Mukutadze, G. Badakhov, **N. Zinoviev**, V. Shvedova // E3S Web of Conferences. Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023). – 2023. – Vol. 383 (1-12). – Article no. 04031. – DOI 10.1051/e3sconf/202338304031.

10 Increase of wear resistance of tribocontact with low-melting metal and porous coating / E. Lagunova, M. Mukutadze, G. Badakhov, **N. Zinoviev**, V. Shvedova // E3S Web of Conferences. Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023). – 2023. – Vol. 383 (1). – Article no. 04033. – DOI 10.1051/e3sconf/202338304033.

11 Zinovev, V. Investigation of factors affecting adhesion strength of adhesive layer to substrate surface / V. Zinovev, **N. Zinovev**, E. Fomichenko // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 953–958. – DOI 10.4028/p-20u919.

12 Analysis of factors affecting the strength of fixed bonds assembled using metal-polymer compositions / V. E. Zinoviev, P. V. Kharlamov, **N. V. Zinoviev**, R. A. Kornienko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 900 (1). – Article no. 012009. – DOI 10.1088/1757-899X/900/1/012009.

Публикации в других изданиях:

13 Актуальные проблемы проектирования посадок с натягом подъемно-транспортных машин / **Н. В. Зиновьев**, В. Е. Зиновьев, И. А. Корякин, П. В. Харламов // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта.: VI Всероссийская научно-практическая конференция (Екатеринбург, 13 декабря 2024 г.). – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2025. – С. 181–185.

14 Зиновьев, В. Е. Анализ способов определения износа в узлах трения транспортно-технологических машин / В. Е. Зиновьев, **Н. В. Зиновьев** // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (ТрансПромЭк-2024) : сборник научных трудов

Международной научно-практической конференции. Т. 2. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2024. – С. 147–150.

15 Зиновьев, В. Е. Анализ факторов, оказывающих доминирующее влияние, на работоспособность и надежность наземной техники / В. Е. Зиновьев, **Н. В. Зиновьев** // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2024. – С. 240–243.

16 Study of wear resistance in a bearing with a metal coating when the working gap is not fully filled / M. A. Mukutadze, V. I. Kirishchieva, G. A. Badakhov, V. E. Shvedova, **N. V. Zinoviev** // Science. Education. Practice : Proceedings of the International Science Conference, Delhi, 2023. – Уфа : Инфинити, 2023. – Р. 178–184.

17 Зиновьев В.Е., **Зиновьев Н.В.** Анализ способов определения износа в узлах трения транспортно-технологических машин // ТрансПромЭк-2024. Ростов-на-Дону, 2024. С. 147-150.

18 Зиновьев, В. Е. Проблемы импортозамещения материалов для технического обслуживания и ремонта дорожной техники / В. Е. Зиновьев, **Н. В. Зиновьев** // Транспорт: наука, образование, производство : сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2023. – С. 65–68.

19 Буракова, М. А. Методы повышения надежности тяжелонагруженных узлов транспортных машин / М.А. Буракова, **Н. В. Зиновьев**, Ю. С. Зиновьева // Транспорт: наука, образование, производство : сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – С. 33–36.

20 Зиновьев, В. Е. Выбор браковочных показателей для горюче-смазочных материалов / В. Е. Зиновьев, **Н. В. Зиновьев** // Транспорт: наука, образование, производство : сборник трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 327–330.

Структура и объем диссертации:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 99 наименований и приложения. Работа изложена на 184 страницах, содержит 32 рисунка, 18 таблиц.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ И ПАТЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1.1 Анализ условий эксплуатации открытых тяжелонагруженных узлов трения

Одной из главных триботехнических задач, стоящей перед современной промышленностью, является повышение надежности и долговечности машин и механизмов. Срок службы любого механизма зависит от работы отдельных узлов и контактирующих пар трения. Определяющим признаком потери работоспособности различного класса машин является износ. Проблема повышения износостойкости тяжелонагруженных деталей машин приобретает всё большую актуальность в связи с увеличением нагруженности, силовой и тепловой напряжённости работы агрегатов и необходимостью уменьшения габаритов.

Особенно остро проблема изнашивания стоит перед открытыми тяжелонагруженными узлами трения, эксплуатация которых происходит в экстремальных неблагоприятных условиях.

Примерами таких узлов трения могут служить тяжелонагруженные зубчатые передачи открытого типа, которые распространены на горно-обогатительных комбинатах, в портах и грузоподъёмных механизмах промышленных предприятий, узлы трения с негерметичными подшипниковыми узлами, крестовины автомобилей, тяговые редукторы локомотивов, пятниковые узлы вагонов, контакт железнодорожного колеса и рельса и другие.

Функционирование узлов трения происходит в крайне неблагоприятных условиях окружающей среды. Эксплуатация характеризуется экстремальными температурными режимами – от минус 50 до плюс 120 градусов Цельсия. Дополнительно негативное влияние оказывают высокая концентрация абразивных частиц в воздухе и избыточная влажность, усугубляемая атмосферными осадками и возможным затоплением.

Специфика работы открытых узлов трения определяется несколькими ключевыми факторами: постоянной вибрацией, частыми циклами запуска и

остановки механизмов, а также существенными динамическими нагрузками переменного характера. Эти факторы провоцируют резкие колебания условий трения. При этом контактные напряжения демонстрируют значительные колебания, достигая максимальных значений в 3,5 ГПа.

Проведённые исследования убедительно демонстрируют прямую зависимость срока службы оборудования от качества используемого смазочного материала. При выборе смазки необходимо всесторонне учитывать особенности эксплуатации техники, чтобы гарантировать её стабильную и безотказную работу в заданных условиях.

В процессе эксплуатации смазочных материалов в открытых подшипниковых узлах различного подземного оборудования возникает необходимость соблюдения особых технических условий. Это касается механизмов, задействованных в шахтных подъёмных системах с вертикальными стволами, оборудовании наклонных магистральных выработок, а также компрессорных и насосных установок, функционирующих в подземных условиях.

К смазочным материалам в подобных условиях эксплуатации предъявляются особые требования. Они должны формировать надёжный защитный барьер, предотвращающий проникновение в зону трения различных загрязняющих веществ – от влаги и пыли до абразивных частиц, таких как песок или угольная крошка. Кроме того, смазочный материал обязан сохранять свою консистенцию и не покидать зону трения независимо от пространственного положения узла относительно горизонтальной плоскости [6].

Эксплуатация тяговых редукторов в локомотивах протекает аналогично, в весьма специфических условиях. Основными характеристиками такого режима работы являются экстремально высокие контактные напряжения, достигающие отметки в 3,11 кПа, а также значительные скорости скольжения со средним показателем 16 метров в секунду. Особую сложность представляет требование к редукторам эффективно функционировать при существенных температурных колебаниях – от критически низких до значительно высоких значений (± 50 °C). Кроме этого, вследствие конструкционных особенностей трансмиссионных

передач локомотивов через неплотности кожуха в тяговые редукторы при эксплуатации попадают влага и грунтовая пыль, что способствует абразивному износу и коррозии трущихся элементов редуктора [8].

Таким образом, для смазывания тяжело нагруженных узлов трения, таких как редукторы, трансмиссии и т. п., необходимо, чтобы используемый смазочный материал создавал прочный слой, обеспечивающий защиту зубчатых колёс от износа.

На железнодорожном транспорте, линиях метрополитена, грузонапряжённых рельсовых путях проблемой является повышение срока службы пары трения гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса.

1.2 Результаты внедрения лубрикационной системы в трибологическую пару «колесо – рельс»

В современных условиях проблема энергоэффективности и рационального использования энергоресурсов приобретает всё более важное значение. Государственная политика, ориентированная на повсеместное внедрение энергосберегающих технологий [4–6] во всех отраслях экономики, находит активное отражение в деятельности предприятий ОАО «РЖД». На железнодорожном транспорте реализуется комплекс мер, направленных на оптимизацию потребления ресурсов и снижение энергозатрат [7, 8].

Масштабы энергопотребления железнодорожного транспорта впечатляют. Ежегодно железные дороги потребляют существенную долю энергетических ресурсов страны: 5–6 % от общего объёма производимой электроэнергии и около 6 % дизельного топлива. В абсолютных цифрах это составляет:

- более 40 миллиардов киловатт-часов электроэнергии;
- одного миллиона тонн дизельного топлива;
- 4,5 миллиона тонн угля;
- около 1 миллиона тонн мазута;
- почти 1 миллиард кубических метров природного газа;
- 170 тысяч тонн бензина;

– до 250 миллионов кубических метров воды.

При этом большая часть энергоресурсов расходуется на обеспечение движения поездов: на тягу составов во всех видах перевозок приходится порядка 82 % потребляемой электроэнергии и 85 % дизельного топлива [9].

В фокусе стратегии развития ОАО «РЖД» находится задача по максимальному использованию потенциала железнодорожных перевозок. При этом компания уделяет первостепенное внимание обеспечению надёжности и безопасности движения, а также рациональному потреблению топливно-энергетических ресурсов. Ключевым фактором достижения этих целей служит совершенствование координации между службами, отвечающими за состояние путей и подвижного состава.

Существенная роль в решении этой комплексной задачи отводится взаимодействию между железнодорожным полотном и составом. Контакт колеса с рельсом представляет собой фундаментальный физический процесс, лежащий в основе функционирования всей железнодорожной системы. От качества этого взаимодействия зависят не только показатели безопасности, но и целый ряд критически важных параметров: допустимая масса составов, предельная скорость движения и общая эффективность эксплуатации.

Особую сложность представляют участки пути с малыми радиусами кривизны – менее 350 метров. При прохождении таких участков в зоне контакта колеса с рельсом развиваются значительные механические напряжения, достигающие 3,5 гигапаскалей, при относительно невысокой скорости скольжения 0,2–0,8 метра в секунду. Дополнительную проблему создаёт трение между гребнями колёсных пар и боковыми поверхностями рельсов, которое провоцирует ускоренный износ как колёсных пар, так и самого пути.

Подобный износ несёт в себе серьёзные риски: он не только угрожает безопасности движения, но и приводит к увеличению сопротивления движению. В результате существенно возрастают расходы на энергопотребление – примерно на 10–15 %, что неизбежно влечёт за собой рост общих затрат на эксплуатацию железнодорожного транспорта [10].

Расход энергии на преодоление сил трения в зоне контакта колеса с рельсом при движении железнодорожного состава определяется множеством триботехнических факторов. На этот процесс существенно влияют такие параметры, как степень нагруженности контактной зоны и скорость относительного скольжения колеса, которая зависит от углов, под которыми колёсные пары набегают на рельсы.

Не менее важными факторами выступают температурные условия эксплуатации, тип и режим движения локомотива, воздействие внешней среды, а также физико-химические изменения поверхностей в процессе трения. Особое значение имеют характеристики материалов, из которых изготовлены трущиеся элементы, свойства приповерхностных слоёв и реологические характеристики смазочных материалов, а также способ их нанесения.

В связи с этим наиболее эффективным и быстро реализуемым способом снижения трения между гребнями бандажей колёсных пар и боковыми поверхностями рельсов признана смазка. Применение смазки позволяет существенно уменьшить сопротивление движению состава, что приводит к ряду положительных эффектов: снижается потребление топливно-энергетических ресурсов, увеличивается срок службы колёс и рельсов, уменьшается риск вкатывания колеса на головку рельса. Кроме того, смазка способствует улучшению экологических показателей, в частности, значительно снижает уровень шума на железнодорожных путях.

Вопрос негативного воздействия трения между гребнями бандажей колёсных пар и боковыми поверхностями рельсов представляет собой глобальную проблему, над решением которой работают исследователи по всему миру. Анализ международной практики убедительно демонстрирует, что применение систем смазки гребней и рельсов существенно повышает энергоэффективность железнодорожного транспорта, позволяет значительно оптимизировать работу железнодорожной инфраструктуры и снизить энергозатраты при эксплуатации подвижного состава [11–17].

Так, компания MPL Technology на протяжении двух десятилетий специализируется на разработке и поставках систем лубрикации для железнодорожных гребней колёсных пар. К концу 2024 года их оборудование было успешно внедрено на более чем 10 000 локомотивах в различных странах Северной и Южной Америки, включая США, Канаду, Бразилию и Мексику.

Эффективность разработанных систем была тщательно проверена в Центре транспортных технологий (ТТС) в Пуэбло. Испытания проводились в условиях, максимально приближённых к реальным эксплуатационным.

MPL Technology провела детальный анализ результатов исследований ТТС, чтобы оценить влияние систем лубрикации на экономию топливно-энергетических ресурсов. Исследования охватили железные дороги нескольких операторов: Burlington Northern Santa Fe в США, Duluth, Missabe & Iron Range в США и ALL в Бразилии.

Все проведённые испытания подтвердили высокую эффективность систем лубрикации. При этом экономия топливно-энергетических ресурсов варьировалась в диапазоне от 20 до 40 %, что демонстрирует значительный потенциал данной технологии для оптимизации железнодорожных перевозок [11–12].

На Белорусской железной дороге внедрение систем смазывания дало заметный эффект: боковой износ рельсов уменьшился в полтора раза, их срок службы вырос с 5 до 7,5 лет. Боковой износ гребней колёсных пар снизился в 1,5–2 раза и держится на уровне 0,3–0,4 мм на 10 000 км пробега [13].

Успешная реализация программы ресурсосбережения на Московской железной дороге показала, что системы лубрикации увеличивают срок службы рельсов и колёсных пар в 2–3 раза, а расход топливно-энергетических ресурсов снижается на 30–50 %. Например, на станции Москва-пассажирская – Павелецкая замена рельсов из-за износа теперь производится один раз в год вместо шести [14].

Руководство ОАО «РЖД» определило ключевые показатели эффективности для железнодорожного транспорта. Компания стремится увеличить пробег вагонных колёс до 1,3 миллиона километров, а ресурс бандажей колёсных пар локомотивов – как минимум до 1 миллиона километров [8, 9]. Кроме того,

планируется существенно сократить энергозатраты: на электрической тяге – на 10–12 %, а на тепловозной – на 12–15 %.

Достичь этих амбициозных целей поможет грамотное использование систем смазки. Особенно важным фактором является применение научно обоснованных смазочных материалов в системах гребне- и рельсосмазывания, что позволит комплексно решить поставленные задачи.

1.3 Обзор смазочных материалов, применяемых в открытых тяжелонагруженных узлах трения

Анализ данных, полученных в процессе патентного поиска и обзора научных публикаций, показал, что на сегодняшний день существуют тысячи различных смазочных композиций, разработанных для использования в конкретных условиях работы узла трения. Так, согласно [18] в России только пластичных смазочных материалов вырабатывается примерно 150 наименований в количестве 45–50 тыс. т/год.

По своей физической природе смазочные материалы делятся на три основные группы. К ним относятся жидкие составы, известные как масла, а также твёрдые вещества и пластичные материалы, которые могут быть представлены в виде консистентных, мажеобразных или желеобразных субстанций [19, 20].

Жидкие смазочные материалы. Базовые масла служат основой для производства жидких смазочных материалов. Для улучшения их эксплуатационных характеристик в состав вводятся специальные добавки – присадки. Эти дополнительные компоненты наделяют смазочные материалы необходимыми рабочими свойствами.

Масла, обогащённые такими присадками, получили название легированных.

Классификация масел по происхождению включает четыре основных типа: нефтяные, синтетические, растительные и смешанные (композиции нефтяных и синтетических компонентов).

По способу производства различают несколько категорий масел [19, 20, 21]:

- дистилятные – полученные путём вакуумной перегонки мазута;
- остаточные – изготовленные из гудрона;
- компаундированные – смеси дистилятных и остаточных масел;
- загущённые – базовые масла с полимерными присадками.

Присадки играют ключевую роль в формировании эксплуатационных характеристик масел. Они обеспечивают моющее действие, диспергирующий эффект, защиту от окисления, противоизносные свойства, предотвращение пенообразования, снижение температуры застывания и другие важные функции.

Смазочный эффект масел реализуется через различные механизмы:

- при жидкостной смазке действуют гидродинамический и гидростатический эффекты, а также эффект вязкоупругости;
- при граничной смазке работают процессы физической и химической адсорбции, включая образование защитных плёнок.

Основные эксплуатационные свойства масел охватывают [19–21]:

- смазочные характеристики (антифрикционные, противоизносные, защитные);
- физико-химические параметры (вязкость, плотность, теплостойкость);
- стабильность состава и антикоррозионные свойства;
- совместимость с материалами и экологическую безопасность.

Преимущества жидких смазочных материалов: простота нанесения, высокая проникающая способность и эффективность смазывания.

Основные недостатки такого типа смазки [19–25]:

- риск развития микротрещин при попадании в них смазочного материала;
- низкая эргономичность (загрязнение поверхностей, сложность удержания на наклонных поверхностях);
- недостаточная защита при высоких нагрузках;
- потеря смазочных свойств при высоких скоростях;
- ухудшение характеристик при загрязнении абразивными частицами
- чувствительность к температурным колебаниям.

Исследования показывают, что жидкостная смазка не обеспечивает оптимального смазывания контакта между гребнем колеса и боковой поверхностью рельса. Тем не менее жидкие смазочные материалы продолжают применяться благодаря их доступности, простоте использования, экологической безопасности и быстрому разложению в окружающей среде. В качестве примера можно привести использование дизельного масла как в чистом виде, так и в составе различных смесей [26–38].

Для устранения недостатков жидких смазок разрабатываются специальные смазочные композиции с добавлением различных компонентов. Одним из таких материалов является рельсовая смазка РС-6, рекомендованная ОАО «РЖД» для смазывания контакта «колесо – рельс» [23]. Этот состав включает полимерный плёнкообразователь и мелкодисперсный графит, растворённые в бензине А-76.

Однако использование такой смазки имеет ряд ограничений: повышенная пожароопасность при приготовлении и применении, необходимость вентиляции помещений, а также недостаточная стабильность состава, требующая постоянного перемешивания во время работы, что увеличивает затраты и усложняет процесс смазывания.

Пластичные смазочные материалы. История пластичных смазочных материалов началась практически одновременно с появлением первых механизмов. Сегодня эти вещества, которые также известны как консистентные, мажеобразные, пастообразные и гелеобразные смазки, занимают важное место в промышленности. Мировой объём производства пластичных смазочных материалов достигает более миллиона тонн ежегодно [19–22].

Пластичные смазки представляют собой особый класс смазочных материалов, занимающих промежуточное положение между твёрдыми и жидкими веществами. Их уникальные свойства проявляются в различных условиях эксплуатации.

При нормальных температурах и умеренных нагрузках эти материалы ведут себя как твёрдые тела: они не стекают под действием собственного веса, надёжно

удерживаются на вертикальных поверхностях и не сбрасываются с движущихся деталей инерционными силами.

Однако при превышении определённого порога температурно-силового воздействия происходит интересное явление. Когда внешнее воздействие достигает предела прочности структурного каркаса (предела текучести), пластичные смазки начинают проявлять свойства жидкости. Этот процесс называется тиксотропным превращением: материал разрушается и течёт подобно пластичному телу, сохраняя при этом свою целостность.

Примечательно, что после прекращения воздействия пластичные смазки способны восстанавливать свои первоначальные свойства твёрдого тела через определённый промежуток времени [38].

Пластичные смазки представляют собой сложную коллоидную систему, состоящую из двух основных компонентов. Основу (75–96 % массы) составляет жидкая среда, а оставшуюся часть (5–25 %) занимает дисперсная фаза – загуститель в виде твёрдых частиц.

Особенность структуры заключается в способности загустителей образовывать пространственную сеть. Под действием молекулярных сил мельчайшие частицы загустителя соединяются в хаотичные цепочки, формируя трёхмерный каркас.

В этом пористом каркасе удерживается жидкая составляющая. Около 60–80 % масла сохраняется благодаря капиллярным эффектам и силам адсорбции, а оставшаяся часть остаётся в структуре механически. Такое распределение обеспечивает стабильность и эффективность работы пластичной смазки [39].

Жидкая основа пластичных смазочных материалов, известная как дисперсионная среда, преимущественно (до 95 % от общего объёма производства) изготавливается из нефтяных масел. Кроме того, в производстве применяются синтетические и растительные масла. Для достижения определённых характеристик возможно использование смесей масел разного происхождения [27].

Характеристики пластичной смазки определяются особенностями её структурного каркаса. Важную роль играют такие факторы, как природа

загустителя, степень его дисперсности, анизотропия свойств, форма частиц и характер энергетических связей между ними.

Именно загуститель выступает главным фактором, формирующим ключевые свойства смазки и определяющим её поведение в условиях трения и взаимодействия деталей [39].

Загуститель играет решающую роль в формировании свойств смазочного материала. Благодаря его воздействию жидкая основа приобретает характеристики, схожие с твёрдым телом: она сохраняет форму под действием собственного веса и начинает течь только при приложении определённой нагрузки.

Помимо традиционных пластичных смазок, широкое применение нашли полужидкие смазочные материалы, в составе которых содержится от 2 до 7 % загустителя.

По типу загустителя различают несколько основных групп пластичных смазок [19–21]:

- мыльные смазки – в их составе дисперсной фазой выступают соли высших карбоновых кислот. Применяются различные виды мыл: кальциевые, литиевые, натриевые, бариевые, свинцовые, магниевые, серебряные, цинковые и другие;
- углеродные смазки – содержат в качестве загустителей твёрдые парафины, различные виды восков (пчелиные, шерстяные, минеральные), а также полимерные компоненты;
- неорганические смазки – в их состав входят бентонитовые глины, силикагель, асбест, слюда, сажа, графит, стекловолокно и прочие неорганические материалы;
- органические смазки – включают в себя различные пигменты, производные мочевины, хелатные комплексы и другие органические соединения.

Для улучшения эксплуатационных характеристик в состав пластичных смазок обычно вводят различные добавки: присадки, наполнители и модификаторы структуры.

Присадки представляют собой поверхностно-активные вещества, которые оказывают существенное влияние на формирование структурного каркаса смазки. Важно отметить, что они не являются загустителем (дисперсной фазой).

Отличительной особенностью присадок является способ их введения в состав смазки – они растворяются в дисперсионной среде (например, в нефтяных маслах). Это принципиально отличает их от наполнителей, которые используются в смазочных материалах [39].

В состав пластичных смазочных материалов включаются специальные добавки, которые выполняют различные функции. Эти присадки представляют собой органические соединения с активными атомами серы, хлора и фосфора, а также структурообразующие компоненты.

Для усиления защитных и антикоррозионных характеристик смазочных материалов в их состав вводятся различные химические соединения, среди которых можно выделить амины, амиды, имиды, сульфонаты, а также соли нафтенowych, сульфоновых и диалкилдитиофосфорных кислот.

Особую роль играют загустители, которые помимо основной функции модификации консистенции смазочных материалов также обеспечивают противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства. К таким загустителям относятся мыла, пигменты, сажа, олеофильный графит и различные полимеры [19–21].

Наполнители (также известные как твёрдые добавки) представляют собой тонкодисперсные вещества, которые не растворяются в маслах и не формируют коллоидную структуру. В составе пластичных смазочных материалов они образуют самостоятельную дисперсную фазу, значительно улучшающую эксплуатационные характеристики смазки.

Эти компоненты находят широкое применение в тяжелонагруженных машинах и механизмах, где требуется работа при высоких давлениях и температурах. В экстремальных условиях эксплуатации наполнители играют критически важную роль, обеспечивая:

- высокую смазочную способность;

- химическую стабильность;
- термическую устойчивость смазочного материала.

Для создания эффективных пластичных смазок используются различные материалы в качестве наполнителей. К ним относятся:

- соединения молибдена (дисульфид и диселенид);
- графит;
- природные минералы (слюда, тальк, вермикулит);
- нитрид бора;
- оксиды и металлические порошки;
- различные пудры;
- полимерные материалы, среди которых особое место занимает политетрафторэтилен (ПТФЭ) [39, 40].

Такое разнообразие наполнителей позволяет создавать смазочные материалы с оптимальными характеристиками для решения самых сложных технических задач [39, 40]

Совместное использование добавок и наполнителей в составе пластичных смазочных материалов открывает широкие возможности для формирования оптимального комплекса эксплуатационных характеристик.

В современной железнодорожной отрасли пластичные смазочные материалы стали основным решением для смазывания открытых узлов трения, испытывающих значительные нагрузки.

На предприятиях ОАО «РЖД» для обеспечения эффективной работы контактной зоны «колесо – рельс» используются различные смазочные материалы [15]:

- смазка СР-К;
- смазка СР-КУ;
- смазка СПЛ;
- рельсовая смазка МС-27;
- смазка «КР-400»;

– металлоплакирующие полужидкие смазки для передвижных рельсосмазывателей серии «Пума» (Пума-МГ, Пума-МЛ, Пума-МР).

Смазка СР-К – смазочный материал защищает гребни колесных пар и рельсов от износа, наносится на боковую грань рельса передвижными рельсосмазывателями при температурах от -45 до $+50$ °С. В зависимости от сезона выпускается в зимнем и летнем вариантах.

По техническим условиям материал должен соответствовать:

- однородной жидкой системе тёмно-серого или чёрного цвета;
- условной вязкости при 80 °С: для зимних вариантов $1,0-3,5^{\circ}$, для летнего $-4,0^{\circ}$ (ГОСТ 6258-85);
- отсутствию коррозии на стали (ГОСТ 9.080-77);
- содержанию воды не более $3,0$ % (ГОСТ 2477-65);
- температуре застывания: для зимних вариантов от -5°C до -35 °С, для летнего не ниже $+5$ °С (ГОСТ 20287-91);
- смазывающим свойствам: нагрузка не менее 700 Н, диаметр пятна износа не более $0,7$ мм (ГОСТ 9490-75);
- температуре вспышки не менее 135 °С (ГОСТ 4333-87).

Смазка СР-К относится к 4-му классу малоопасных веществ (ГОСТ 12.1.007-76). При её производстве выделяются газообразные вещества с индексом А.13.01 (ГОСТ 17.2.1.01-76).

Смазка СР-КУ предназначена для защиты от износа гребней колесных пар и рельсов. Смазочный материал наносится на боковую грань рельса с помощью передвижных рельсосмазывателей в диапазоне рабочих температур от минус 45 до плюс 50 °С. С учётом сезонных и суточных колебаний рабочих температур смазочный материал классифицируется по вязкостно-температурным свойствам и подразделяется на зимний и летний варианты. В соответствии с ТУ 0254-070-07621060-2008 смазочный материал должен соответствовать следующим требованиям и нормам:

- внешний вид – однородная жидкая система от тёмно-серого до чёрного цвета;

- условная вязкость при температуре 80 °С, градусы условные, не менее – для зимнего варианта (СР-КУ1) смазочного материала – 4,0; для летнего варианта (СР-КУ2) – 4,0. Испытания в соответствии с ГОСТ 6258-85;
- коррозионное воздействие на металлы (сталь) – выдерживает. Испытания в соответствии с ГОСТ 9.080-77;
- массовая доля воды, %, не более – 3,0. Испытания в соответствии с ГОСТ 2477-65;
- температура застывания, °С, – для зимнего варианта (СР-КУ1) смазочного материала не выше минус 20; для летнего варианта (СР-КУ2) не выше плюс 5. Испытания в соответствии с ГОСТ 20287-91;
- трибологические характеристики на четырёхшариковой машине трения при температуре (25 °С): критическая нагрузка не менее 700 Н; диаметр пятна износа не более 0,5 мм. Испытания в соответствии с ГОСТ 9490-75;
- температура вспышки – не менее 135 °С. Испытания в соответствии с ГОСТ 4333-87.

Смазочный материал «Смазка СР-КУ» по степени опасности для человека относится к четвёртому классу малоопасных соединений по ГОСТ 12.1.007-76. Изготовление СР-К сопровождается попаданием в атмосферу газообразных веществ, характеризующихся по ГОСТ 17.2.1.01-76 индексом А.13.01.

Смазка СПЛ предназначена для защиты гребней бандажей колесных пар и рельсов от износа и эксплуатируется при температурах от плюс 60 до минус 30 °С.

Смазочный материал изготавливается на основе смеси индустриального и веретённого масла АУ, загущённой водонерастворимыми мылами высших жирных кислот, и содержит антифрикционную, адгезионную, гидрофобную и антикоррозионную присадки. В соответствии с ТУ 32 ЦТ 2186-93 смазочный материал должен соответствовать следующим требованиям и нормам:

- внешний вид – однородная гладкая мазь чёрного цвета;
- коллоидная стабильность – не более 30 % выд. масла. Испытания в соответствии с ГОСТ 7142-74;

- пенетрация при 25 °С с перемешиванием – в пределах 280–350 мм·10⁻¹. Испытания в соответствии с ГОСТ 5346-78;
- предел прочности при 20 °С – не менее 200 Па. Испытания в соответствии с ГОСТ 7143-73;
- вязкость при температуре 30 °С – не более 600. Испытания в соответствии с ГОСТ 7163-73;
- коррозионное воздействие на металлы (сталь) – выдерживает. Испытания в соответствии с ГОСТ 9.080-77;
- содержание воды – следы. Испытания в соответствии с ГОСТ 2477-65.

По показателям токсичности согласно ГОСТ 121.007-76 смазочный материал является малоопасным и относится к четвёртому классу опасности. Изготовление СПЛ сопровождается выбросами в атмосферу газообразных веществ, характеризующихся по ГОСТ 17.2.1.01-76.

Смазка рельсовая МС-27 применяется для уменьшения износа рельсов и гребней колёсных пар путём нанесения на боковую грань рельса с помощью передвижных рельсосмазывателей.

Состав смазки включает индустриальное масло, органические и минеральные загустители, адгезивы и пакет присадок для обеспечения высоких трибологических характеристик. Физико-химические показатели:

- однородная масса чёрного цвета;
- эффективная вязкость при 20 °С – не менее 0,1 Па·с;
- отсутствие воды;
- температура вспышки – не ниже 200 °С;
- температура сползания (слой 0,5 мм) – не менее 50 °С;
- совместимость с металлами и полимерами;

Трибологические характеристики:

- диаметр пятна износа ≤ 0,6 мм, критическая нагрузка ≥ 921 Н, нагрузка сваривания ≥ 3920 Н.

Эксплуатационные требования:

- нанесение при скоростях 5–140 км/ч и давлении до 15 МПа;
- расход до 350 г/км;
- работа при температурах от –45 до +50 °С;
- распределение в полосе 15–40 мм без выдавливания;
- устойчивость к смыванию осадками;
- коэффициент трения: после нанесения $\leq 0,15$, после 15 000 осей $\leq 0,25$.

Безопасность: смазка относится к 4-му классу малоопасных веществ (ГОСТ 12.1.007). Температуры: вспышки – 237 °С, воспламенения – 265 °С, самовоспламенения – 366 °С.

Смазочный материал «КР-400» разработан для использования в системах рельсосмазывания АРС и РС-2. Основное назначение – снижение износа рельсов и колёсных пар транспортных средств на участках пути с криволинейными участками.

Температурный диапазон эксплуатации смазки варьируется от –20 до +60 °С. В основе состава лежит минеральное масло, загущённое литиевым мылом стеариновой кислоты, дополненное антифрикционными, адгезионными и антикоррозионными присадками.

Согласно техническим условиям ТУ 0254-213ОП-01124323-2006, продукт соответствует следующим параметрам:

- консистенция: однородная мягкая мазь чёрного цвета;
- коррозионная стойкость: соответствует нормам (по ГОСТ 9.080);
- температура сползания: не ниже 70 °С (по ГОСТ 6037);
- пенетрация при 25 °С с перемешиванием: 400–440 мм⁻¹ (по ГОСТ 5346 метод «В»);
- степень перетира: не более 50 мкм (по ГОСТ 6589);
- трибологические характеристики на ЧШМ (по ГОСТ 9490):
- критическая нагрузка заедания: не менее 940 Н;
- диаметр пятна износа (при нагрузке 19,6 Н): не более 0,7 мм.

По классификации опасности (ГОСТ 12.1.007) готовая смазка относится к 4-му классу (малоопасные вещества) при вдыхании. В процессе производства возможно выделение в атмосферу следующих веществ:

- предельные алифатические углеводороды;
- оксид углерода;
- аэрозоли минеральных масел;
- пыль углерода (графита).

Концентрация загрязняющих веществ на границе санитарно-защитной зоны должна соответствовать гигиеническим нормативам ГН 2.1.6.1338-03 и ГН 2.1.6.1339-03 с учётом рассеивания.

Смазка металлоплакирующая полужидкая для передвижных рельсосмазывателей Пума-МР (ТУ 0254-006-17368431-07) предназначена для снижения износа гребней колесных пар и рельсов. Смазка может также применяться в других типах лубрикаторов. Смазка работоспособна в интервале температур от -40 до $+110$ °С. Данный смазочный материал производится путём загущения минерального масла с помощью литиевого мыла, полученного из стеариновой кислоты. В состав также входят специальные металлоплакирующие добавки, которые значительно улучшают характеристики трения и существенно снижают износ деталей при работе.

Смазка соответствует следующим физико-химическим требованиям:

- внешний вид: однородная мазь от светло-зелёного до зелёно-коричневого цвета. При хранении в металлической таре возможно покраснение из-за восстановления меди;
- вода: отсутствует (по ГОСТ 2477-65);
- вязкость при -30 °С: не более 100 Па·с (по ГОСТ 7163-84);
- пенетрация при 25 °С: 360–440 мм·10⁻¹ (по ГОСТ 5346-78);
- коррозия на стали 40, 45: отсутствует (по ГОСТ 9.080-77);
- износ при нагрузке 196 Н за 1 час: не более 0,7 мм (по ГОСТ 9490-75).

По токсичности смазка относится к 4-му классу опасности (малоопасная). При работе требуется спецодежда, спецобувь, маслостойкие рукавицы, защитные очки и противопылевой респиратор.

Пожароопасность: температура самовоспламенения – не ниже 400 °С. При производстве возможны выбросы в атмосферу, но при эксплуатации смазка не загрязняет воздух. Концентрация аэрозоля в санитарно-защитной зоне – 0,05 мг/м³.

Металлоплакирующая смазка Пума-МЛ (ТУ 0254-005-17368431-07) – полужидкий смазочный материал для рельсосмазывателей, снижающий износ гребней колёсных пар и рельсов. Подходит для различных лубрикаторов, работает при температурах от –40 до +110 °С.

Производится на основе минерального масла с литиевым загустителем из стеариновой кислоты и металлоплакирующими присадками, улучшающими антифрикционные и противоизносные свойства.

Физико-химические характеристики:

- внешний вид: однородная мазь от светло-зелёного до тёмно-зелёно-коричневого цвета (возможно покраснение при хранении);
- вода: отсутствует (ГОСТ 2477-65);
- вязкость при –30 °С: ≤100 Па·с (ГОСТ 7163-84);
- пенетрация при 25 °С: 280–360 мм·10^{–1} (ГОСТ 5346-78);
- коррозия на стали 40, 45: отсутствует (ГОСТ 9.080-77);
- износ при нагрузке 196 Н за 1 час: ≤0,7 мм (ГОСТ 9490-75).

Безопасность: относится к 4-му классу опасности (малоопасная). Требуется спецодежда, спецобувь, маслостойкие рукавицы, защитные очки и противопылевой респиратор.

Пожароопасность: температура самовоспламенения – не ниже 400 °С. При производстве возможны выбросы в атмосферу, но при эксплуатации смазка не загрязняет воздух. Концентрация аэрозоля в санитарно-защитной зоне – 0,05 мг/м³.

Металлоплакирующая смазка Пума-МГ (ТУ 0254-004-17368431-07) разработана для защиты от износа гребней колёсных пар и рельсов в системах рельсосмазывания. Материал эффективен в передвижных рельсосмазывателях и

других типах лубрикаторов, сохраняет рабочие характеристики в температурном диапазоне от -40 до $+110$ °С.

Состав смазки базируется на минеральном масле с литиевым загустителем из стеариновой кислоты. В формулу включена специальная композиция металлоплакирующих присадок, которая значительно улучшает антифрикционные и противоизносные свойства продукта.

Основные физико-химические параметры:

- консистенция и цвет: однородная мазь от светло-зелёного до тёмно-зелёно-коричневого оттенка. При длительном хранении в металлической таре возможно покраснение из-за восстановления меди;
- влажность: полное отсутствие воды (по ГОСТ 2477-65);
- вязкость при 20 °С: не менее 1,0 Па·с (по ГОСТ 7163-84);
- пенетрация при 25 °С: около $470 \text{ мм} \cdot 10^{-1}$ (по ГОСТ 5346-78);
- коррозионная активность: не оказывает негативного воздействия на сталь марок 40 и 45 (по ГОСТ 9.080-77). Медная плёнка на металле не считается браком;
- износостойкость: диаметр пятна износа при нагрузке 196 Н за час не превышает 0,7 мм (по ГОСТ 9490-75).

Безопасность смазки Пума-МР согласно ГОСТ 12.1.007-76 соответствует 4-му классу опасности (малоопасное вещество).

Пожароопасность и экологичность: температура самовоспламенения не ниже 400 °С. При производстве возможны выбросы в атмосферу. При эксплуатации не загрязняет воздух (низкая упругость паров). Концентрация аэрозоля в санитарно-защитной зоне $0,05 \text{ мг/м}^3$ (по ГН 2.1.6.1339-03).

Преимущества пластичных смазок [20–22, 39]:

- удерживаются в негерметичных и открытых узлах трения;
- не стекают с вертикальных поверхностей;
- сохраняются на движущихся деталях;
- имеют увеличенный срок службы по сравнению с маслами;
- консервируют открытые поверхности;
- работают в широком диапазоне температур и скоростей;

- устойчивы к воде и агрессивным средам;
- обладают высокими противозадирными свойствами;
- меньше загрязняют окружающую среду.

Недостатки пластичных смазок:

- низкая эффективность при реверсивном движении на высоких скоростях;
- слабая охлаждающая способность;
- склонность к окислению;
- ограничения применения. При разработке смазок для системы «колесо – рельс» не всегда учитываются специфические условия эксплуатации и особенности контактного взаимодействия [22, 23, 25].

Смазочные материалы поступают в зону контакта между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса посредством распыления через форсунку. Однако из-за недостаточного сцепления с обрабатываемыми поверхностями, особенностей реологических характеристик смазки, использования тормозных колодок, а также влияния ветра и воздушных потоков, возникающих при движении состава, значительная часть смазочного материала рассеивается и теряется сразу после распыления.

Это приводит к ухудшению смазывающих свойств и снижению эффективности процесса лубрикации. Чтобы компенсировать потери, приходится увеличивать количество наносимого материала, что вызывает повышенный расход жидких и пластичных смазок.

Точность нанесения смазки в зону контакта гребня колеса с головкой рельса существенно страдает от резких перепадов температуры, особенно характерных для весеннего и осеннего периодов. При использовании жидких и пластичных смазочных материалов для лубрикации контакта «колесо – рельс» их остатки загрязняют детали подвижного состава, элементы верхнего строения пути и прилегающую территорию.

Необходимо учитывать, что пластичные смазочные материалы представляют собой многокомпонентные системы, которые не способны к биоразложению. Это

приводит к ухудшению экологической обстановки и загрязнению окружающей среды [22–24].

В процессе движения подвижного состава происходит смена типов взаимодействия между колесом и рельсом. Изначально антифрикционное взаимодействие, когда гребень колеса соприкасается с боковой поверхностью головки рельса, трансформируется во фрикционное взаимодействие – контакт поверхностей катания колеса и головки рельса.

Крайне важно, чтобы антифрикционная смазка не попадала в зону фрикционного контакта. При нарушении этого условия существенно падает коэффициент сцепления между колёсами состава и рельсами, что может спровоцировать боксование. Такая ситуация особенно критична при движении на крутых подъёмах и участках с большим уклоном [22–24].

Кроме того, замасленные поверхности, рельсы или колеса могут загрязняться пылью и мелкими твёрдыми частицами, образующими абразивный материал, вызывающий быстрый износ несущих поверхностей [22–24].

Жидкие и консистентные смазочные материалы нашли чрезвычайно широкое применение в обычных условиях эксплуатации многих машин, механизмов и приборов. Гидродинамический и граничный режимы трения обеспечивают в большинстве случаев нормальную эксплуатацию трущихся элементов машин. Однако в связи с развитием новой техники, а также необходимостью работы машин при сверхвысоких нагрузках создаются условия, не позволяющие использовать жидкие, полужидкие или пластичные смазочные материалы. Возникшая проблема решается путём применения твёрдых смазочных материалов.

Твёрдые смазочные материалы

В области разработки и применения твёрдых смазочных материалов развернуты широкие теоретические и практические исследования. Был создан ряд твёрдых материалов, используемых в качестве добавок и заменителей обычных жидких и пластичных смазочных материалов. Уже в настоящее время многие сложнейшие инженерные задачи успешно решаются благодаря использованию этих материалов.

Теоретической основой развиваемой концепции о смазочном действии твёрдых материалов являются данные об их внутреннем строении и физико-химическом взаимодействии с металлом и газовой средой в зоне трения. Целью применения твёрдых смазочных материалов являются расширение области механических нагрузок, при которых имеет место нормальное трение без повреждаемости; оптимизация сил трения и минимизация скорости изнашивания в этой области [40, 41].

Твёрдые смазочные материалы находят широкое применение в различных технических решениях: их используют как тончайшие покрытия, включают в состав сплавов, применяют в конструкционных материалах и для пропитки слоистых пластиков.

Для доставки твёрдых смазочных материалов в зону трения применяют два основных метода: нанесение тончайшего покрытия непосредственно на трущиеся поверхности или использование суспензий этих материалов в различных жидкостях. Важное преимущество таких материалов заключается в том, что они демонстрируют существенно меньшее сопротивление сдвигу по сравнению с материалами, из которых изготовлены детали [40–42].

При выборе подходящего смазочного материала учитывается множество факторов: давление в зоне контакта, скорость движения деталей, тип трения, характеристики окружающей среды, температурный режим и радиационное воздействие.

В качестве твёрдых смазочных материалов используются различные материалы: металлы, мыла, а также структурированные и полимерные соединения.

Порошковые смазочные материалы являются самым древним и простым видом твёрдых смазочных веществ. Их главная задача – снижение трения и износа поверхностей, на которые они наносятся.

Процесс применения таких материалов достаточно прост: их наносят на металлическую поверхность в порошкообразном состоянии, часто используя метод натирания.

В современной промышленности для создания порошкообразных смазок используются различные вещества, среди которых можно выделить графит, тальк, слюду, серу, свинцовые белила, серпентин, серпентинит, хлорит, дисульфиды и диселениды молибдена, вольфрама и ниобия, нитрид бора, оксид свинца, фториды кальция и бария, а также политетрафторэтилен (ПТФЭ) и многие другие современные материалы [23, 40, 41].

Твёрдые смазочные покрытия со связующими компонентами представляют собой композитные материалы, состоящие из двух основных элементов: порошкообразного смазочного пигмента и связующего вещества. В качестве органических связующих применяются различные смолы, включая фенол- и мочевиноформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические, аминокамидные и полиамидоимидные.

Неорганические связующие компоненты включают термически устойчивые керамические материалы, антикоррозионные органические пластмассы, силикат натрия и некоторые металлы. В качестве твёрдых смазочных материалов используются дисульфиды и диселениды молибдена, вольфрама и ниобия, нитрид бора, графит, оксид свинца, фториды кальция и бария, а также политетрафторэтилен.

Металлические смазочные материалы представлены мягкими металлами и сплавами, которые характеризуются низким сопротивлением сдвигу. Они эффективно снижают износ и трение между более твёрдыми металлическими поверхностями. В качестве металлических смазочных материалов применяются золото, серебро, свинец, индий, барий и кадмий.

Толщина металлического покрытия варьируется от 0,0001 до 0,3 мм. Важное свойство таких покрытий заключается в способности локализовать сдвиговые деформации в металле, что приводит к снижению коэффициента трения и уменьшению износа контактирующих поверхностей.

Покрытия, наносимые газопламенным распылением. Выполняются при помощи плазменных горелок и аналогичных приспособлений. Таким методом,

например, могут наноситься на рабочую поверхность износостойкие керамические покрытия.

Износостойкие антифрикционные металлические покрытия. Сюда относятся многие твёрдые смазочные материалы. Часто такие покрытия рассматривают не как твёрдые смазочные материалы, а как антифрикционные конструкционные материалы. Твёрдыми смазочными материалами их считают в связи с тем, что они фактически играют роль смазочного материала.

Износостойкие антифрикционные неметаллические покрытия. По назначению не отличаются от металлических покрытий. Сюда относятся керамические покрытия, которые могут выполнять функции жидких смазочных материалов в соответствующих условиях применения.

Химические и гальванические покрытия. Используются для уменьшения трения и износа трущихся поверхностей. В качестве примера можно привести фосфатирование и хромирование поверхностей. Часто применяются в сочетании с жидкими смазочными материалами, однако могут использоваться и без смазочных материалов обычных типов.

Твёрдые смазочные плёнки, наносимые из газовой среды. Образуются на поверхности при реакции газообразных соединений с поверхностью металла. Могут образовываться на поверхности подшипников полимерных смазочных пленок из газообразной реакционной смеси.

Аэрозольные смазочные системы представляют собой технологию доставки порошкообразных твёрдых смазок к трущимся поверхностям с помощью газового носителя, например азота. В этой системе порошковый материал выполняет смазочную функцию, а газ служит транспортирующим агентом.

Структурированные смазочные материалы характеризуются особой слоистой (ламеллярной) структурой, где плоскости базиса располагаются параллельно направлению трения. К таким материалам относятся:

- графит;
- тальк;
- слюда;

- гексагональный нитрид бора;
- дихалькогениды тугоплавких металлов (дисульфиды, диселениды, дителлуриды молибдена, вольфрама, ниобия).

Особенность этих материалов заключается в их гексагональной структуре, где межатомные связи прочнее межплоскостных ван-дер-ваальсовых связей, что делает их эффективными в качестве смазочных материалов. Аналогичную слоистую структуру имеет политетрафторэтилен (фторопласт-4), широко применяемый в различных смазочных составах. Другие полимеры, такие как полиэтилен, нейлон и капрон, используются в узлах трения значительно реже.

Важное свойство структурированных твёрдых смазок – *самосмазываемость*, т. е. способность обеспечивать смазывание контактирующих поверхностей без дополнительного внесения смазочного материала [19–21, 40, 41]. Этот эффект может достигаться несколькими способами:

- пропиткой пористых материалов маслом;
- капсулированием масел в твёрдом веществе;
- введением в состав смазочного материала веществ, которые при повышенных температуре и давлении реагируют между собой или с поверхностью деталей, образуя защитные плёнки (например, соединения хлора и серы).

Так, на предприятиях ОАО «РЖД» для лубрикации открытых тяжело нагруженных узлов трения (контакта боковой поверхности головки рельса и гребней колёсных пар подвижного состава) в качестве твёрдых смазочных материалов применяются смазочные стержни РАПС и СС-1.

Смазочные стержни РАПС предназначены для снижения износа боковой грани рельсов и гребней колёсных пар железнодорожного и другого рельсового подвижного состава. Стержни используются в гребнесмазывателях ГРС конструкции РГУПС.

Смазочные стержни РАПС представляют собой твёрдые смазочные элементы, состоящие из оболочки, заполненной твёрдым, пластичным или вязкопластичным смазочным материалом, или безоболочные стержни, применяемые в бортовых гребнесмазывателях.

Согласно с ТУ 0254-001-01116006-2006 смазочные стержни РАПС соответствуют следующим требованиям:

- испытание на коррозионное воздействие на металл: выдерживает по ГОСТ 9.080-77 на пластинах из стали 40, 45 (ГОСТ 1050-88) при температуре 100 °С в течение 3 часов;
- температура размягчения основы, °С: не менее 95 согласно ГОСТ 11506-88;
- стойкость к истиранию (число циклов до потери смазки смазочного действия): $18\,000 \pm 1500$;
- основные размеры (длина, мм / диаметр, мм): РАПС-1 – $400 \pm 50 / 20 \pm 5$, РАПС-2 $200 \pm 50 / 20 \pm 5$;
- масса смазочного стержня, г (стандартная оболочка / износостойкая оболочка): РАПС-1 $145 \pm 25 / 200 \pm 50$; РАПС-2 $70 \pm 5 / 100 \pm 30$;
- смазочные свойства на четырёхшариковой машине трения: критическая нагрузка P_k , Н, не менее – 980 по ГОСТ 9490-75.

Смазочные стержни РАПС токсичных соединений в воздушной среде, почве и сточных водах в присутствии других веществ не образуют. Смазочные стержни РАПС являются невзрывоопасным, горючим веществом.

Смазывающий стержень СС-1 разработан для обеспечения эффективной смазки гребней колёсных пар железнодорожного подвижного состава и боковых поверхностей головок рельсов. Основное назначение изделия – минимизация износа контактирующих элементов в широком диапазоне температур: от –50 до +50 °С.

Согласно техническим условиям ТУ 0254-064-07621060-2004 смазочные стержни СС-1 полностью отвечают установленным стандартам качества и эксплуатационным требованиям:

- внешний вид – цилиндрический стержень чёрного цвета без видимых трещин, пустот и механических повреждений;
- основные размеры (диаметр, мм / длина, мм): $30 \pm 0,5 / 160 \pm 1,0$;
- водопоглощение, %: не более 0,2 по ГОСТ 10315-75;

- набухание в воде, %: не допускается по ГОСТ 10315-75;
- диаметр пятна износа ($D_{\text{изн}}$), мм: при нагрузке 20 кгс, 5 мин – не более 0,8 по ГОСТ 9490-75.

Анализ специализированной технической документации позволяет выделить ряд существенных достоинств твёрдых смазочных материалов [19–21, 40, 42]:

- обеспечивают значительную экономическую эффективность;
- не ухудшают усталостные характеристики материалов в зоне контакта;
- демонстрируют превосходную несущую способность по сравнению с жидкими и пластичными аналогами;
- показывают высокую работоспособность как при малых (до гидродинамических), так и при сверхвысоких скоростях;
- характеризуются отличной термостойкостью;
- подходят для всесезонного применения;
- не аккумулируют абразивные частицы;
- отличаются удобством хранения и применения;
- позволяют точно дозировать количество материала в зависимости от особенностей узла трения;
- не загрязняют поверхность катания.

Ограничения при использовании твёрдых смазочных материалов:

- слабое сцепление с обрабатываемой поверхностью
- сложность нанесения и последующего удаления с защищаемых элементов
- проблемы при комбинировании материалов разного состава
- риск выдавливания жидкой составляющей под действием высоких нагрузок
- быстрое разрушение защитной плёнки из-за её малой толщины (1,0–1,5 мкм).

1.4 Анализ состава и свойств смазочных материалов, применяемых в открытых тяжело нагруженных узлах трения

Технический прогресс создал обширный парк машин и оборудования, без которых невозможно представить современную промышленность и быт. Ключевым фактором работоспособности любой техники является состояние её узлов трения, от которого зависят общий ресурс и безотказность механизмов. В связи с этим научное сообщество ведёт интенсивные исследования в области трибологии – изучает механизмы трения, износа и смазки, создаёт инновационные материалы и совершенствует существующие смазочные составы.

Продлить жизнь подвижных узлов можно различными методами, среди которых особое место занимает совершенствование смазочных материалов. Качественные смазочные составы не только защищают механизмы от износа, но и позволяют существенно сократить расход энергоресурсов.

Современный рынок предлагает широкий ассортимент смазочных материалов для узлов трения с высокими нагрузками. При их разработке учитываются строгие критерии качества [5, 15–17]:

- результативность смазывающего действия;
- удобство применения;
- адгезия к рабочим поверхностям;
- оптимальное соотношение цены и качества;
- безопасность в пожарном отношении;
- минимальное влияние на экологию;
- устойчивость в различных условиях.

Достичь такого сочетания свойств удаётся благодаря использованию комплексных смазочных композиций, в которых каждый компонент выполняет определённую функцию.

Особую популярность приобрели солидолы – синтетические и жировые антифрикционные материалы общего назначения на основе промышленных масел. Параллельно с этим перспективным направлением исследований становится

использование побочных продуктов нефтепереработки (вакуумного газойля, гидроочищенного газойля, нефтяных дистиллятов), которые не только дешевле традиционных масел в 1,5–2 раза, но и демонстрируют хороший потенциал для создания эффективных смазочных композиций [43].

Также в качестве жидкого компонента, придающего смазочной композиции необходимую консистенцию, используют минеральные масла или другие продукты переработки нефти [29].

В источнике [36] рассматривается возможность применения кубового остатка ректификации стирола (КОРС) в составе смазочных композиций. Этот материал представляет собой смесь ароматических углеводородов, что обеспечивает его отличные растворяющие свойства при взаимодействии с другими компонентами смазочного состава.

Особенность КОРС заключается в том, что содержащиеся в нём ненасыщенные и ароматические углеводороды способствуют надёжному прилипанию смазки к металлической поверхности. При работе тяжело нагруженных узлов трения, где периодически возникают резкие скачки температуры и давления, происходит полимеризация компонентов КОРС. В результате на трущихся поверхностях формируется тонкая защитная полимерная плёнка.

Важное преимущество данного материала заключается в том, что он является побочным продуктом производства, что делает его доступным по цене на российском рынке. Кроме того, варьируя количество КОРС в составе, можно регулировать итоговую вязкость смазочной композиции.

В [33, 43–45] предлагается введение в состав смазочного материала в качестве несущей основы битума или его смеси с минеральными маслами, что позволит улучшить адгезию чешуек графита к поверхности трения, заполнить микротрещины на металлической поверхности, увеличивая при этом срок службы пар трения. Применение битума в составе смазочных материалов позволяет добиться необходимой консистенции материала, повышает антифрикционные противоизносные свойства. Важнейшим свойством битумов является высокая

адгезия, обуславливающая способность битумов сцеплять в монолит минеральные зерна заполнителей, что позволяет смазочному материалу удерживаться в контактирующих поверхностях при высоких нагрузках и скоростях. Битумы способны также придавать гидрофобные свойства материалам, обработанным битумом. Кроме того, битум относится к недорогим широко распространённым нефтепродуктам.

Использование калиевого жидкого стекла [26, 46–48] в качестве дисперсионной среды оправдано комплексом его ценных свойств. Это вещество отличается превосходными противоизносными качествами, абсолютной экологической безопасностью и отличной способностью к прилипанию к поверхностям. Благодаря этим характеристикам значительно повышается устойчивость смазочного материала к смыванию водой, что делает его более эффективным в эксплуатации.

Также удерживающая способность смазывающего материала путем введения калиевого жидкого стекла (силикатного клея) подтверждена результатами испытаний в [26], а антифрикционные свойства – в [49]. Жидкое стекло обладает превосходными антифрикционными характеристиками, однако имеет существенный недостаток – оно подвержено разложению на воздухе. В процессе этого разложения формируется карбонатная плёнка, что приводит к высыханию раствора и его затвердеванию [50].

Для решения этой проблемы исследователи предлагают инновационный подход: использовать выпаренное жидкое стекло в комбинации с веретённым маслом. При тщательном перемешивании масло создаёт защитную оболочку вокруг гелеобразных частиц жидкого стекла, предотвращая их слипание и взаимодействие с воздухом.

Индустриальное масло также рассматривается как эффективная дисперсионная среда благодаря своим известным смазочным свойствам. Оно не только обеспечивает надёжную работу механизма, но и защищает состав от высыхания, особенно предотвращая нежелательное взаимодействие жидкого

стекла с атмосферным воздухом [46]. Это значительно продлевает срок службы смазочного материала в реальных условиях эксплуатации.

Введение в состав смазочного материала глицерина позволяет понизить испаряемость основы при повышении температуры и препятствует ее застыванию при отрицательных температурах [51]. А применение глицерина в качестве дисперсионной среды обусловлено его противоизносными свойствами [46].

Применение хлорпарафина в качестве дисперсионной среды в соответствии с [52] способствует образованию на контактах металлических поверхностей пленок хлорида железа, стойких задиров. Кроме того, хлорпарафин выполняет антибактерицидную функцию, препятствует окислению смазочного материала. Совместное присутствие хлорпарафина и растительного экстракта в одном смазочном материале придаёт ему высокие антизадирные и антифрикционные свойства, снижает коэффициент трения в тяжело нагруженных узлах.

Помимо рационального выбора базовой основы для придания смазочным материалам необходимых свойств в их состав вводят загустители и добавки (присадки и наполнители).

Одним из эффективных методов увеличения ресурса узлов трения является добавление специальных присадок в смазочные материалы. Эти добавки способны изменять как трибологические характеристики самой смазочной среды, так и свойства поверхностей, которые подвергаются трению.

В последние годы особую популярность приобрели геотрибомодификаторы – присадки, созданные на основе природных материалов. В отличие от традиционных добавок они воздействуют не на смазочный материал, а непосредственно на структуру и свойства твёрдых поверхностей, участвующих в процессе трения.

Особую роль в этой области играют минералы со слоистой структурой, такие как слюда, каолин, ревдинскит, серпентин и серпентинит. Эти природные материалы успешно применяются как загущающие компоненты и противоизносные добавки в различных смазочных составах [40, 53–56].

Интерес к этим материалам подтверждается стремительным ростом числа патентов: только с 1992 по 1999 год было зарегистрировано более 60 патентов, связанных с применением серпентинитов. В настоящее время количество подобных патентов увеличилось вдвое.

Анализ работ, посвящённых применению минеральных модификаторов трения в качестве присадок к смазочным материалам, указывает на то, что в большинстве случаев их основным компонентом являются мелкодисперсные (размер зерна от 1 до 10 мкм) порошки группы серпентинита. Применение этих материалов обеспечивает повышение противоизносных и антифрикционных свойств и в ряде случаев восстановительный эффект – заживление изношенных участков трущихся поверхностей и тем самым увеличение ресурса работы смазываемых узлов трения. Эти материалы обеспечивают формирование на поверхностях трения серповитной плёнки, обладающей тиксотропными свойствами, обеспечивающей низкий коэффициент трения и стабильность смазочного материала в условиях пиковых нагрузок. При использовании смазочных композиций с геомодификаторами трения значительно снижаются потери энергии на трение в подвижных соединениях, значительно повышается усилие схватывания, т. е. задиростойкость узлов трения и долговечность деталей.

Особенностью серпентинита является то, что он является горной породой с очень широкими вариациями минерального и химического состава, что влияет на характер его применения. Это не позволяет однозначно судить об антифрикционном эффекте данного компонента. В первую очередь это касается сведений о структуре и кинетике формирования смазочных слоев.

Проблемой при разработке эффективных смазочных материалов с геомодификаторами трения является отсутствие чёткого представления о закономерностях взаимодействия данных компонентов с поверхностями трения и, соответственно, адекватной физической модели их функционирования.

Кроме того, возникают трудности при получении необходимого гранулометрического состава серпентинита. Этот процесс является весьма материало- и энергоёмким.

Слоистые минералы – хлориты, тальк, гидроталькит и другие железомagneзиальные силикаты – демонстрируют сходие с пластинчатыми серпентинами химический состав и структурные характеристики. Эти природные материалы способны значительно улучшать свойства смазочных составов.

Уникальность их структуры заключается в особом характере связей между атомами: внутри одной плоскости действуют прочные ковалентные связи, тогда как между параллельными слоями эти связи существенно ослабевают. Это приводит к тому, что усилие, необходимое для сдвига слоёв минерала, оказывается меньше силы его сцепления с металлической поверхностью.

Высокая спайность этих минералов обеспечивает надёжное прилегание частиц к металлической поверхности благодаря силам междукристаллического взаимодействия. При этом повышенная твёрдость слоистых силикатов вдоль α -плоскости (по направлению чешуек) создаёт эффективное сопротивление процессу изнашивания, что делает их ценными компонентами современных смазочных материалов [40, 57].

В качестве загустителя смазочных материалов предусматривается использование фторированного углерода [58]. Однако такой загуститель в сотни раз удорожает смазочный материал. Наиболее выгодным было бы использование в качестве загустителя мазута, как это предлагают авторы [34, 35, 59]. В свою очередь мазут обладает значительной вязкостью и лучшей адгезией к поверхности трения, обеспечивает эффективные противоизносные показатели и может использоваться одновременно и как эффективный жидкий загуститель, и как качественный смазывающий компонент.

Фуллерены представляют собой крайне перспективные материалы для использования в качестве загустителей смазочных составов благодаря их уникальной структуре и выдающимся физико-механическим характеристикам.

Фуллероидные наномодификаторы (ФНН) включают в себя разнообразные углеродные структуры:

- фуллерены C_{60} и C_{70} ;
- одно- и многослойные нанотрубки;

- астралены;
- фуллереновую сажу;
- фуллеренсодержащие шунгиты;
- упорядоченные углеродные кластеры.

Эти материалы занимают особое промежуточное положение между молекулами и твёрдым телом. Они обладают:

- высокой поверхностной активностью, схожей с поверхностно-активными веществами;
- отличной теплопроводностью;
- хорошей электропроводностью.

Примечательной особенностью ФНН является их способность к самоорганизации в узлах трения. Наночастицы могут объединяться в упорядоченные структуры, формируя трёхмерный каркас в объёме смазочного слоя и фрактальные сети на поверхностях трения. Это свойство особенно важно для сохранения работоспособности смазочного материала в тяжёлых условиях эксплуатации.

ФНН оказывают пластифицирующее воздействие на металлические поверхности, что ускоряет процесс приработки и способствует формированию оптимального рельефа. Исследования показывают, что фуллереновые добавки:

- улучшают механическую и коллоидную стабильность смазочных материалов;
- повышают противозадирную стойкость трибосопряжений;
- эффективно работают в качестве загустителей (согласно исследованиям [60–62]).

Применение гидратированного кальциевого мыла олеиновой кислоты в качестве загустителя смазочного материала обусловлено хорошей водостойкостью кальциевых смазок и высокой загущающей способностью олеиновой кислоты. Введение в состав кальциевого мыла олеиновой кислоты придаёт смазочному материалу необходимую консистенцию [46].

Использование отстоя, который образуется при щелочной очистке растительных масел, в составе смазочных материалов открывает новые возможности для их применения. Этот компонент существенно изменяет консистенцию смазки, придавая ей пластичные свойства, что позволяет эффективно использовать её в разнообразных узлах и механизмах, значительно расширяя сферу применения [46].

Экспериментальные исследования подтвердили ряд важных преимуществ такого решения:

- существенное усиление защитных свойств, особенно влагоустойчивости;
- снижение температуры потери подвижности смазки;
- улучшение коллоидной стабильности за счёт оптимальной растворимости компонентов в смеси с нефтяным маслом [63].

Особую ценность представляет экологическая безопасность данного решения. При производстве и эксплуатации такого смазочного материала не происходит выделения вредных веществ, что делает его экологически чистым. Дополнительным преимуществом является низкая себестоимость конечного продукта, обусловленная доступной стоимостью исходного сырья.

Авторы [52] описывают применение крахмала в качестве уплотнителя и загустителя смазочных материалов.

Обеспечение высоких эксплуатационных характеристик смазочных материалов в тяжёлых условиях достигается, в частности, использованием в качестве загустителей минеральных глин, которые по сравнению с другими загустителями обладают рядом уникальных свойств. Среди глин наибольшее значение в качестве загустителей имеют бентониты, в основном монтмориллонитовой группы. Они характеризуются слоистым строением кристаллической решётки, обладают способностью к обмену катионами, что используется для их олеофилизационной обработки. Продукт такой обработки – органобентонит (бентон) – получают при взаимодействии естественных монтмориллонитовых бентонитов с олеофилизаторами, в частности в четвертичными аммониевыми солями; он является универсальным

структурообразователем смазочных материалов [64]. Bentonитовые смазочные материалы сравнительно новые и в данный момент занимают незначительное место на международном рынке смазочных материалов. Но благодаря незначительной стоимости и таким преимуществам, как термостойкость и радиационная стойкость, бентонитовые смазки получают широкое распространение в технике.

Слоистые материалы, такие как слюда, дисульфид молибдена и тальк, давно зарекомендовали себя как эффективные противоизносные загущающие добавки в смазочных составах. Их высокая эффективность объясняется уникальной способностью формировать на поверхностях трения особые защитные слои.

Механизм действия этих веществ основан на образовании тонких плёнок из чешуйчатых частиц, которые выстраиваются параллельно рабочей поверхности. Созданные таким образом защитные слои выполняют несколько важных функций:

- эффективно разделяют контактирующие поверхности;
- выравнивают микронеровности;
- при сухом трении трансформируют его во внутреннее, где смещение происходит внутри самого слоя частиц.

Благодаря этим свойствам обеспечивается надёжная механическая защита взаимодействующих поверхностей от износа и повреждений.

Слюда является материалом с ярко выраженным свойством расщепления. Плоскость спайности представляет собой матрицу из окиси кремния, в которой укреплены поляризованные атомы калия. При расщеплении на одной поверхности остается половина атома калия, на другой – соответствующее число отрицательных вакансий. По плоскостям спайности слюды наблюдаются значительные силы адгезии, которые снижаются после длительного воздействия атмосферы. Уменьшается адгезионное взаимодействие при добавке на поверхности скольжения талька, который резко снижает коэффициент трения, что связано со снижением поверхностной энергии.

Так, автором [50] для образования структурного каркаса и стабилизации структуры смазочного материала предлагается использовать в качестве загустителя

графит. Природный графит – чёрное с блеском жирное инертное жаростойкое вещество, хорошо проводит тепло и электричество. Графит антистатичен, некоррозионный, смазывающий, устойчив к высоким давлениям. Благодаря наличию всех этих качеств, графит издавна считается универсальным компонентом в смазочных материалах.

Помимо качеств загустителя графит, согласно [1, 33, 40, 46, 49, 51, 65–69], может применяться в качестве антифрикционной противоизносной плакирующей добавки. Смазочная способность графита связана со снижением уровня поверхностной энергии, которое происходит при адсорбции газов. В соответствии с [46] использование графита в композитах оправдано принципиальным снижением износа, а также количества задиров на рабочей поверхности.

При эксплуатации деталей с высоким нагревом (до температуры 900 °С) хорошие результаты даёт использование смеси графита с нитридом бора. Графитовые плёнки обеспечивают смазывание до температуры 500 °С, а нитрид бора – в интервале температур 500–900 °С.

Путём введения графита в состав смазочного материала достигается необходимая нагрузочная способность и долговечность покрытия при высоких удельных нагрузках [67], т. к. он является достаточно прочным на сжатие материалом и плохо сопротивляется сдвигу. Кроме того, в качестве антифрикционной добавки может применяться мелкодисперсный искусственный графит с размерами частиц менее 90 мкм [70].

Также известен способ повышения триботехнической эффективности смазочных материалов путём использования твёрдых порошковых присадок на основе графита, частицы которого покрыты одним или двумя слоями мягкого металла [41].

Исследователи [29, 31] предлагают инновационную замену традиционному графиту – диспергированный нефтяной кокс с ультрамелкими частицами (менее 0,100 мм). В отличие от графита нефтяной кокс представляет собой сложную

пористую структуру, где графитоподобные кристаллы формируют систему с пористостью до 50 %.

Уникальные свойства этого материала раскрываются при его измельчении и добавлении гидрофобных углеводородных молекул. Особенно ярко проявляются его антифрикционные характеристики при работе в условиях высоких нагрузок.

Оптимальным вариантом считается нефтяной кокс, полученный методом замедленного коксования, так как он содержит минимальное количество примесей. Для процесса диспергирования рекомендуется использовать мелкую коксовую крошку с размером частиц менее 6 мм, которая часто остаётся невостребованной в производстве.

Интересно, что существует возможность комбинированного применения нефтяного кокса совместно с графитом, что может обеспечить синергетический эффект в работе смазочных материалов.

Дисульфид молибдена обладает, так же как и графит, хорошими смазочными свойствами [27, 48, 68, 72]. Низкое трение дисульфида молибдена обеспечивается очень слабым взаимодействием между плоскостями спайности. В отечественных смазочных материалах для тяжелонагруженных узлов трения часто используют дисульфид молибдена. Так, в 25 из 75 патентов группы одним из компонентов смазочного материала предлагается использовать дисульфид молибдена, который в зависимости от условий может выполнять функцию антифрикционного наполнителя, загустителя и противозадирной присадки. По способности внедряться в металл и образовывать поверхностную плёнку синтетический дисульфид молибдена превосходит все известные противоизносные присадки. Плёнка имеет высокое сопротивление продавливанию. Введение в состав смазочного материала дисульфида молибдена позволяет усилить противозадирные свойства. Сочетание дисульфида молибдена с другими компонентами смазочной композиции позволяет повысить термостабильность смазочной композиции.

По мнению авторов [35, 44–46, 51, 68], сочетание таких компонентов, как графит и дисульфид молибдена, обеспечивает смазочному материалу стабильные

антифрикционные противозадирные свойства, а смазочному слою – стойкость к истиранию.

Автором [50] описано применение в качестве дисперсной фазы аэросила, который представляет собой высокодисперсный чистый диоксид кремния. Аэросил – химически инертное вещество, пожаро- и взрывобезопасное, не оказывает общетоксического действия. Аэросил выполняет функцию стабилизатора, предотвращая оседание взвешенных частиц в дисперсионной среде. Аэросил обладает способностью модифицировать поверхности трения с образованием силикатных структур, которые повышают работоспособность и ресурс плёнки смазочного материала.

Современные разработки в области создания смазочных материалов базируются на инновационной технологии металлоплакирования. Этот метод защиты поверхностей трения реализуется путём добавления в состав смазочных композиций тонкоизмельчённых металлических порошков и сплавов.

Суть технологии заключается в формировании на контактирующих поверхностях специального защитного слоя, который обеспечивает:

- повышенную износостойкость деталей;
- снижение потерь на трение;
- улучшение эксплуатационных характеристик механизмов.

Такой подход позволяет значительно продлить срок службы узлов трения и повысить эффективность работы смазочных материалов за счёт создания на поверхностях контакта особой металлической плёнки.

Согласно [40, 73–75] вводимые в качестве твёрдого смазочного материала металлы (Al, Cu, Zn, Sn и др.) или их окислы в виде порошков придают смазочной плёнке необходимые прочности и твёрдость, что препятствует разрушению покрытия, микросхватыванию поверхностей и износу. Кроме того, они образуют на поверхностях трения плакирующий слой, обладающий контактной прочностью, что также способствует снижению износа. Смола, входящая в состав сухого смазочного концентрата, является адгезивом, повышающим прочность сцепления покрытия с поверхностью трения, а также противоизносной добавкой.

Эффективность современных смазочных материалов обеспечивается сложным взаимодействием различных компонентов. Комплексная медная соль играет ключевую роль в формировании защитной металлоплакирующей плёнки на поверхностях трения. В процессе работы происходит разложение комплекса и восстановительная реакция между ионами меди и железа, что существенно улучшает противоизносные характеристики смазки.

Значительный вклад в повышение надёжности смазочного слоя вносит нанопорошок железа, который увеличивает его прочность и защищает поверхности от усталостного разрушения [46, 51]. Наночастицы никеля и цинка способствуют образованию защитных плёнок с высокими противоизносными свойствами, причём цинк дополнительно обеспечивает антикоррозионную защиту.

В процессе эксплуатации формируется уникальная металлокерамическая плёнка со сложной гетерогенной структурой. Металлические частицы, встроенные в керамический слой, не только улучшают теплоотвод и антифрикционные свойства, но и предотвращают окисление масла. Особую роль играют соли металлов диалкилдитиофосфорной кислоты – они снижают коэффициент трения, обеспечивают постоянное пополнение металлических частиц для восстановления плёнки и поставляют в зону трения твёрдые антифрикционные вещества (фосфиды и сульфиды) [56]. Благодаря этим компонентам удаётся минимизировать количество металлического наполнителя при сохранении высоких эксплуатационных характеристик, а также предотвратить заедание сопряжённых поверхностей.

Полимерные материалы нашли широкое применение в создании смазочных материалов и покрытий вследствие их удовлетворительных прочностных свойств и долговечности, которые напрямую связаны с топологической структурой молекул. В работах [42, 77–79] проведены исследования возможности улучшения трибологических и эксплуатационных свойств смазочных материалов для открытых тяжело нагруженных узлов трения путём использования неорганических полимерных присадок фосфоромолибдатов натрия, никеля и лития. Установлено, что использование смазочных материалов с фосфоромолибдатами указанных

металлов позволяет эффективно формировать поверхность микросопряжения с заданными параметрами, повышать стабильность смазочной плёнки и триботехнические характеристики. Смазочная плёнка с присадкой на поверхности трения содержит соединения, которые способны функционировать несколько часов, постоянно возобновляясь в плёнке за счет химических реакций при трении. Различные полимерные материалы, в том числе фосфоромолибдаты, легируют оксидные плёнки сталей и увеличивают их протекторные свойства по отношению к воздействию высоких локальных температур в зоне фрикционного контакта и по отношению к воздействию окислителей окружающей среды.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) представляет собой синтетический полимер, получаемый в результате полимеризации тетрафторэтилена. Этот материал широко применяется для улучшения антифрикционных характеристик механизмов и защиты от коррозии. Благодаря своим уникальным свойствам ПТФЭ эффективно снижает трение между деталями и обеспечивает надёжную антикоррозионную защиту поверхностей [54]. Плакирование металлических поверхностей смазывающими частицами политетрафторэтилена микронного размера создаёт скользкую поверхность. Ультрадисперсный политетрафторэтилен значительно улучшает противозадирные и противоизносные свойства смазочного материала, его термическую и химическую стабильность. В России этот продукт выпускается под названием фторопласт-4, или фторлон-4.

Однако фторопласт обладает и такими качествами, как низкая прочность, плохая теплопроводность, высокий коэффициент теплового расширения и низкая способность сопротивляться трению при высоких скоростях и повышенном тепловыделении. Поэтому в чистом виде фторопласт не используется.

Современные исследования демонстрируют впечатляющие возможности *наноматериалов* и *нанофункциональных присадок*. Благодаря их исключительной дисперсности (от 1 до 100 нанометров) и огромной удельной поверхности (до 600 м²/г), состоящей из мельчайших морфологических элементов, удаётся достичь уникальных свойств, недостижимых при использовании традиционных материалов [80, 81].

Введение нанокomпонентов в состав смазочных материалов кардинально меняет характер работы трибосопряжений. Большое количество сверхмалых частиц существенно влияет на свойства смазочной плёнки и взаимодействие трущихся поверхностей [80, 81].

Присутствие наночастиц в зоне трения создаёт целый комплекс положительных эффектов:

- заполнение микронеровностей поверхности;
- формирование замкнутых жидких линз;
- упрочнение поверхностного слоя;
- активное участие в процессе приработки;
- устранение микродефектов сопрягаемых поверхностей.

Благодаря сильной природной поляризации наномолекул на поверхностях трения формируется самоорганизующаяся плёнка оптимальной толщины (40–80 нм). Это значительно повышает несущую способность сопряжений, обеспечивает надёжное разделение трущихся поверхностей и практически полностью устраняет адгезионные явления. В результате компенсируется износ деталей и повышается точность кинематических пар [80, 81].

Сформированная наноплёнка эффективно пропитывается смазочным материалом, который невозможно выдавить с поверхности. Это открывает широкие возможности для управления качеством работы трибосопряжений. Регулируя концентрацию и состав наночастиц, а также используя поверхностно- и химически-активные вещества, можно эффективно решать задачи по минимизации трения и износа в различных трибологических системах, включая такие ответственные узлы, как контакт гребня колеса с боковой поверхностью рельса [80, 81].

1.5 Выводы по главе

Тщательное изучение патентных документов и обширного массива научной литературы [1–81] демонстрирует растущую актуальность исследований в области

разработки смазочных материалов для тяжело нагруженных узлов трения открытого типа. Наблюдается устойчивый научный и практический интерес к данной проблематике, что подтверждается многочисленными публикациями и патентными заявками в этой сфере.

Заметное число патентов и научных публикаций говорит о достаточной широте научных исследований в этом направлении среди зарубежных и отечественных научных групп и промышленных предприятий. Разработке новых компонентов и оптимальному подбору состава смазочных материалов посвящено более 6000 отечественных и 300 зарубежных патентов, полученных в период с 1994 по 2025 год.

Тем не менее анализ отечественного ассортимента смазочных материалов позволяет сделать выводы о том, что большинство смазочных материалов массового применения морально устарело еще 20–30 лет назад, ассортимент практически не обновляется.

Разнообразие тематики представленных патентов свидетельствует об активном поиске оптимальных решений в рассматриваемой предметной области. Обзор смазочных материалов, применяемых в открытых тяжело нагруженных узлах трения, и анализ их состава, эксплуатационных и трибологических характеристик показывает, что ни один из смазочных материалов, существующих в настоящее время, несмотря на высокую эффективность существующих решений, не способен одновременно соответствовать всем эксплуатационным требованиям. Проблема заключается в том, что многие современные материалы, демонстрируя впечатляющие эксплуатационные показатели, обладают целым рядом существенных недостатков: их производство обходится дорого, они имеют сложную химическую структуру, представляют пожарную опасность и могут провоцировать коррозию соседних металлических элементов. Кроме того, такие материалы нередко негативно воздействуют на окружающую среду, что делает их применение ограниченным, несмотря на потенциально высокие рабочие характеристики. Исходя из этого обобщение известных подходов и поиск новых

путей решения данной проблемы представляются важными, перспективными и актуальными.

Проведённый анализ показал необходимость нового подхода к совершенствованию смазочных материалов, которые работают в экстремальных условиях трения. Ключевым направлением развития должно стать создание инновационных смазочных составов на базе доступных, экологически безопасных компонентов, не относящихся к дефицитным ресурсам. При этом новые материалы должны обеспечивать надёжную работу узлов как при скольжении, так и при качении.

Решение этой комплексной задачи требует применения нестандартных методов, основанных на последних достижениях в области нанотехнологий и наноматериалов. Важно отметить, что совершенствование смазочных материалов должно идти по пути оптимизации их структуры и улучшения второстепенных характеристик новых смазочных композиций. Такой подход позволит создать материалы, которые будут соответствовать современным требованиям эксплуатации и обеспечивать эффективную работу механизмов в самых сложных условиях.

Учитывая специфику эксплуатации открытых динамически нагруженных узлов трения, можно сделать вывод о том, что для данных трибосистем наиболее эффективным будет использование твёрдопластичного смазочного материала. Структура предлагаемого смазочного материала будет представлять собой многокомпонентную коллоидную систему (дисперсию), которая будет включать дисперсионную среду (основу), дисперсную фазу (загуститель) и добавки (присадки и наполнители) [82].

Основа структуры любого смазочного материала формируется благодаря комплексу свойств загустителя, который создаёт трёхмерный каркас в объёме смазочного слоя и связанный с ним двумерный пористый слой на поверхности трения. Эти слои определяют механические, химические и теплофизические характеристики всего состава.

Разработка эффективного смазочного материала возможна только при использовании инновационного загустителя с особым набором свойств. Такой загуститель должен обладать высокой прочностью, термической стабильностью в зоне трения, хорошей теплопроводностью и электропроводностью, значительной энергоёмкостью, а также способностью эффективно отводить тепло из зоны трения, сохраняя при этом необходимые реологические характеристики материала.

При наличии загустителя с такими характеристиками дальнейшее улучшение антифрикционных свойств смазочного материала становится возможным благодаря оптимизации смазывающей способности его основы. Этого можно достичь путём добавления специальных присадок, значительно снижающих коэффициент трения.

Цель исследования заключается в создании усовершенствованного смазочного материала, включающего три ключевых компонента: инновационный загуститель, антифрикционные добавки и наполнитель. Особую перспективу в этой области представляют нанокomпоненты и нанofункциональные присадки, которые благодаря своей уникальной структуре и физико-механическим свойствам являются перспективным направлением развития современных смазочных материалов.

2 РАЗРАБОТКА И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

2.1 Разработка и изготовление опытных образцов наноструктурированного смазочного материала

Анализ данных, полученных в процессе патентного поиска и обзора научных публикаций, показал, что одним из перспективных и эффективных направлений повышения ресурса и долговечности открытых тяжело нагруженных узлов трения, снижения затрат мощности на их функционирование является создание высокоэффективных смазочных материалов.

На основании проведённого обзора смазочных материалов, анализа их состава, эксплуатационных и трибологических характеристик было выявлено, что изобретательская работа специалистов по улучшению смазочных материалов, которые используются в сложных условиях трения механизмов, должна быть направлена на создание инновационных составов. Эти составы должны базироваться на доступных и экологически чистых компонентах, способных гарантировать надёжную работу деталей как при скольжении, так и при качении.

Такой подход позволит не только повысить эффективность существующих материалов, но и обеспечить их безопасное применение в различных условиях эксплуатации.

Особенно перспективным является направление создания смазочных материалов, получаемых на базе фундаментальных разработок в области нанотехнологий.

Учитывая специфику открытых динамически нагруженных узлов трения, установлено, что для данных трибосистем наиболее эффективным будет использование твёрдопластичного смазочного материала – покрытия. Структура разрабатываемого смазочного материала представляет собой многокомпонентную коллоидную систему (дисперсию), которая включает дисперсионную среду (основу), дисперсную фазу (загуститель), добавки (присадки и наполнители) [82].

2.1.1 Подбор компонентов наноструктурированного смазочного материала

В соответствии с выполненным анализом априорной информации и предварительными исследованиями для изготовления опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения, были выбраны следующие материалы:

- дисперсионная среда (основа) – битум;
- дисперсная фаза (загуститель) – высокодисперсный диоксид кремния;
- добавки (наполнители) – графит, дисульфид молибдена.

Как известно, основой любого смазочного материала является *дисперсионная среда*. Эксплуатационные качества смазочных материалов формируются под влиянием двух ключевых факторов: типа загустителя и характеристик дисперсионной среды. При этом роль последней нельзя недооценивать, поскольку её природа, химический, групповой и фракционный состав оказывают существенное влияние на весь процесс структурообразования.

Именно дисперсионная среда во многом определяет эффективность загущения и основные реологические характеристики конечного продукта. От её состава зависит работоспособность смазочных материалов в различных температурных режимах, при разных силовых и скоростных нагрузках. Она влияет на способность материала противостоять окислению, определяет защитные свойства и устойчивость к воздействию агрессивных сред.

Другие характеристики дисперсионной среды также играют важную роль в формировании свойств смазочных материалов. Так, испаряемость напрямую связана с молекулярной массой и температурой вспышки масляной основы, а низкотемпературные характеристики, включая вязкость при пониженных температурах, зависят от свойств самой дисперсионной среды в этих условиях.

Таким образом, комплексный подход к выбору и оптимизации дисперсионной среды позволяет создавать смазочные материалы с заданными эксплуатационными характеристиками, способными эффективно работать в различных условиях эксплуатации [82].

Подбор характеристик дисперсионной среды определяет технологию изготовления смазочного материала и необходимость соблюдения соответствующих правил пожарной и промышленной санитарии.

В качестве несущей основы (дисперсионной среды) было решено использовать битум нефтяной. Битумы нефтяные получают из остатков перегонки смолистой нефти. Это твёрдые или жидкие высокомолекулярные органические соединения, состоящие из смеси углеводородов и их сернистых, кислородных и азотистых производных.

Нефтяные битумы используют для приготовления смазочных материалов весьма узкого назначения. Практическое применение для этих целей нашли в основном битумы строительные, которые вырабатываются согласно ГОСТ 6617-76 (2002) трех марок БН 50/50, БН 70/30, БН 90/10 (таблица 2.1). Строительные нефтяные битумы получают окислением остаточных продуктов прямой перегонки нефти и их смеси с асфальтами и экстрактами масляного производства. Для изготовления опытных образцов был использован строительный нефтяной битум марки 90/10.

Таблица 2.1 – Физико-химические показатели строительных нефтяных битумов (ГОСТ 6617-76) [82, 83]

Наименование показателя	Норма для марки		
	БН 50/50	БН 70/30	БН 90/10
1 Глубина проникновения иглы при 25 °С, 0,1 мм	40–60	21–40	5–20
2 Температура размягчения по кольцу и шару, °С (не ниже)	50–60	70–80	90–105
3 Растяжимость при 25 °С, см (не менее)	40	3	1
4 Растворимость в бензоле или хлороформе, % (не менее)	99,50	99,50	99,50
5 Изменение массы после прогрева, % (не более)	0,50	0,50	0,50
6 Температура вспышки, °С (не ниже)	230	240	240
7 Содержание водорастворимых соединений, % (не более)	0,30	0,30	0,30
8 Содержание воды	Следы		

Применение битума в составе смазочных материалов позволяет добиться необходимой консистенции материала, повышает антифрикционные противоизносные свойства. Важнейшим свойством битумов является высокая адгезия, обуславливающая способность битумов связывать в монолит минеральные зёрна наполнителей, что позволяет смазочному материалу удерживаться на контактирующих поверхностях при высоких нагрузках и скоростях. Битумы способны также придавать гидрофобные свойства материалам, обработанным ими. Кроме того, введение в состав смазочного материала в качестве несущей основы битума позволит улучшить адгезию функциональных добавок (например, чешуек графита, частичек дисульфида молибдена и др.) к поверхности трения, заполнить микротрещины на металлической поверхности, увеличивая при этом срок службы пар трения.

Битум относится к недорогим широко распространённым нефтепродуктам – дорожные битумы используют в основном для строительства и ремонта дорожных покрытий.

Помимо рационального выбора базовой основы для придания смазочным материалам необходимых свойств в их состав вводят загустители и добавки (присадки и наполнители).

В процессе формирования структуры смазочного материала загустители (дисперсная фаза) проявляют особое свойство – способность к агрегированию. Под действием молекулярных сил мельчайшие частицы загустителя соединяются между собой, образуя хаотичные цепочки и создавая пространственную структуру внутри смазочного состава. В результате этого процесса формируется прочный трёхмерный каркас.

Дисперсионная среда, выступающая в роли основы смазочного материала, активно взаимодействует с пористой структурой загустителя. Около 60–80 % её объёма удерживается в порах каркаса благодаря капиллярным эффектам и силам адсорбции. Оставшаяся часть дисперсионной среды фиксируется в структурном каркасе механическим способом, что обеспечивает стабильность всей смазочной системы [39].

Под воздействием загустителя жидкая основа становится малоподвижной, подобно твёрдому телу, не меняет своей формы под собственным весом и начинает течь лишь под воздействием нагрузок, превышающих некоторый предел их прочности.

Характеристики смазочного материала напрямую зависят от особенностей его структурного каркаса. Важную роль играют такие параметры, как природа загустителя, степень дисперсности, анизотропия свойств, форма частиц и характер энергетических связей между ними. Именно дисперсная фаза (загуститель) в значительной мере определяет ключевые эксплуатационные свойства и поведение пластичной смазки в условиях трения [39].

Для повышения эффективности смазочных материалов необходимо совершенствовать их структуру и комплекс дополнительных свойств. Поскольку основу структуры формирует трёхмерный каркас, создаваемый загустителем в объёме смазочного слоя, а также связанный с ним двумерный пористый слой на поверхности трения, разработка нового смазочного материала требует применения особо эффективного загустителя.

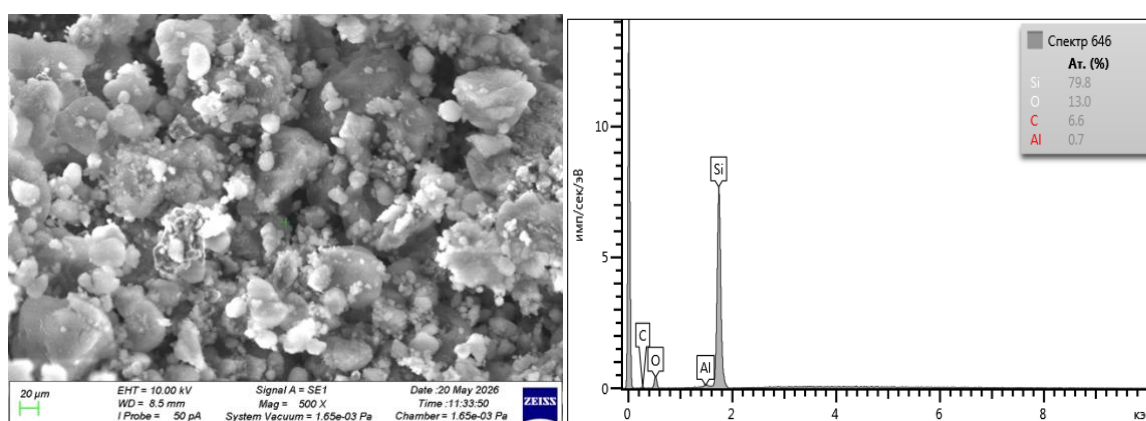
Такой загуститель должен обладать целым рядом важных качеств:

- высокой механической прочностью;
- термической стабильностью в зоне трения;
- хорошей теплопроводностью и электропроводностью;
- значительной энергоёмкостью;
- способностью эффективно отводить тепло из зоны трения;
- стабильностью реологических характеристик.

В качестве оптимального варианта дисперсной фазы для создания смазочного материала были выбраны высокодисперсные неорганические материалы. Они отличаются способностью формировать первичный структурный каркас и быстро восстанавливать связи между частицами после деформации. В результате исследований было принято решение использовать в качестве загустителя высокодисперсный диоксид кремния (SiO_2), известный под торговыми названиями аэросил, орисил, белая сажа, HDK и кремнезём (рисунок 2.1).



а



б

Рисунок 2.1 – Наноструктурированная добавка [84]:

а – диоксид кремния SiO_2 ; б – результаты исследования структуры и состава диоксида кремния

Диоксид кремния (SiO_2) представляет собой очень чистый аморфный непористый материал с размером частиц от 5 до 40 нм. Чрезвычайно лёгкий белый порошок, который в тонком слое кажется полупрозрачным, голубоватым.

Для подтверждения наноразмерности частиц порошка диоксида кремния, а также отсутствия примесей в составе порошка нами было проведено дополнительное исследование при помощи количественного рентгеноспектрального микроанализа – это относительный метод, основанный на сравнении измеренной интенсивности рентгеновских линий, генерируемых в образце, с интенсивностями соответствующих линий в надлежащем стандартном образце известного состава, при известных токах зонда и идентичных прочих аналитических условиях (одинаковое ускоряющее напряжение, одинаковая геометрия установки образца и стандарта, одинаковое состояние поверхности и

др.). Содержание элемента рассчитывается из отношения интенсивностей на образце и стандарте с известной концентрацией определяемого элемента в последнем. Для учёта различий в составах образца и стандарта вводится поправка на матричные эффекты.

Энергодисперсионный спектрометр получает и анализирует одновременно весь возбуждаемый в образце спектр в широком диапазоне энергий.

Исследования микроструктуры, топографии, качественного и количественного состава модифицированных покрытий будут проводиться с использованием сканирующего (растрового) электронного микроскопа (SEM) Zeiss EVO MA 18 с приставкой энергодисперсионного (ЭДС) анализатора X-Max 50N и программного обеспечения AZtec.

В микроскопе SEM для формирования изображения или исследования образца используется пучок электронов. Пучок электронов сканирует поверхность образца. Сканирующий (растровый) электронный микроскоп (SEM) Zeiss EVO MA 18 имеет следующие характеристики:

- максимальное разрешение микроскопа – 3 нм (30 кВ, SE, W);
- ускоряющее напряжение – 0,2–30 кВ;
- увеличение – 5–1 000 000х;
- детекторы SE – вторичных электронов;
- HDBSD – детектор обратнорассеянных электронов;
- активная площадь кристалла детектора 50 мм²;
- спектральное разрешение детектора 127 эВ по линии Mn Kα1.
- разрешение детектора должна быть 56 эВ по линии C Kα1.

В результате проведённых исследований был подтверждён размер частиц в 10 нм (рисунок 2.1, б), а также наличие посторонних примесей в составе приобретённого порошка не более 0,1%, что допустимо.

В настоящее время высокодисперсный SiO₂ находит применение в самых различных областях: в технической, химической, текстильной, фармацевтической, парфюмерной и пищевой промышленности. Определённый эффект наблюдается при добавлении диоксида кремния в смазочные материалы, лаки, краски, клеи и

т. п. Высокодисперсный SiO_2 обладает способностью модифицировать поверхности трения с образованием силикатных структур, которые повышают работоспособность и ресурс плёнки смазочного материала.

Существует несколько методов получения высокодисперсного диоксида кремния, основными из них являются пирогенный способ и метод осаждения.

Пирогенный способ получения высокодисперсного SiO_2 основан на высокотемпературном (1000–1100 °C) гидролизе четырёххлористого кремния водным паром, образующимся при горении водорода в присутствии кислорода (рисунок 2.2)

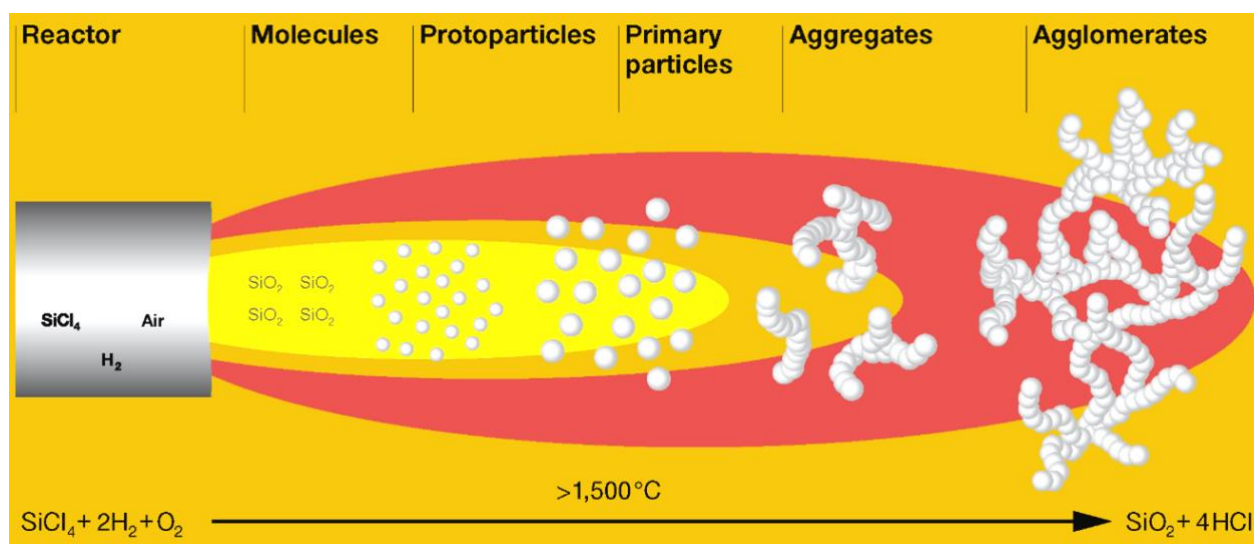
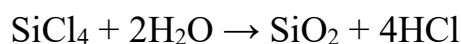


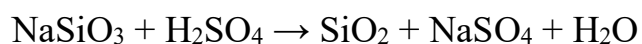
Рисунок 2.2 – Схема пирогенного способа получения высокодисперсного SiO_2 [84]

В этом случае высокодисперсный SiO_2 образуется по реакции:



Продукты реакции после охлаждения до 300 °C проходят через зону коагуляции, где мельчайшие частицы SiO_2 , сталкиваясь между собой, образуют хлопья сечением 1–2 нм. Хлорид, адсорбированный поверхностью SiO_2 , удаляется обработкой последнего горячим воздухом [82].

Получение высокодисперсного SiO_2 *методом осаждения* основано на реакции обработки водного раствора силиката натрия серной кислотой или сульфатом аммония:



Поверхность высокодисперсного SiO_2 , полученного описанными способами, покрыта гидроксильными группами, которые придают ей гидрофильный характер.

Для повышения влагостойкости высокодисперсный SiO_2 гидрофобизируют, подвергая его химическому модифицированию поверхностно-активными веществами. В качестве гидрофобизаторов поверхности высокодисперсного SiO_2 , теоретические разработки предлагают использовать разнообразные поверхностно-активные вещества, включающие соединения различных химических групп – от спиртов и аминов до кремнийорганических соединений и полимеров. В этот список входят также вещества, содержащие фосфор и серу, изоцианаты, эпоксидные соединения и многие другие химические соединения.

Тем не менее в промышленном производстве модифицированных диоксидов кремния практическое применение нашли преимущественно два компонента – диметилдихлорсиланы и н-бутиловый спирт. Именно эти вещества продемонстрировали наибольшую эффективность в процессе модификации диоксида кремния, что сделало их предпочтительным выбором для производственных задач [82].

Исходя из вышесказанного, в зависимости от состояния поверхности, высокодисперсный диоксид кремния разделяют на два типа – гидрофильный и гидрофобный соответственно (рисунок 2.3).

Свойства смазочных материалов, загущённых высокодисперсным диоксидом кремния, в значительной мере определяются химическим состоянием поверхности диоксида кремния. Особое влияние оказывают такие параметры, как концентрация поверхностных гидроксильных групп, наличие модифицирующих элементов, уровень pH при спиртовой экстракции диоксида кремния. Существенную роль также играет количество воды, находящейся в физическом и координационном связывании, а также целый ряд других важных факторов. Частицы диоксида кремния (SiO_2), введённые в состав смазочного материала, в результате сил притяжения формируют пространственный наноструктурный каркас, в ячейках

которого удерживается смазочный материал. Таким образом, осуществляется сильное загущающее действие. В результате того, что диоксид кремния имеет чрезвычайно маленькие размеры частиц с высокой удельной поверхностью, его загущающее действие имеет значительный эффект даже при малых концентрациях дисперсной фазы в дисперсионной среде [84].

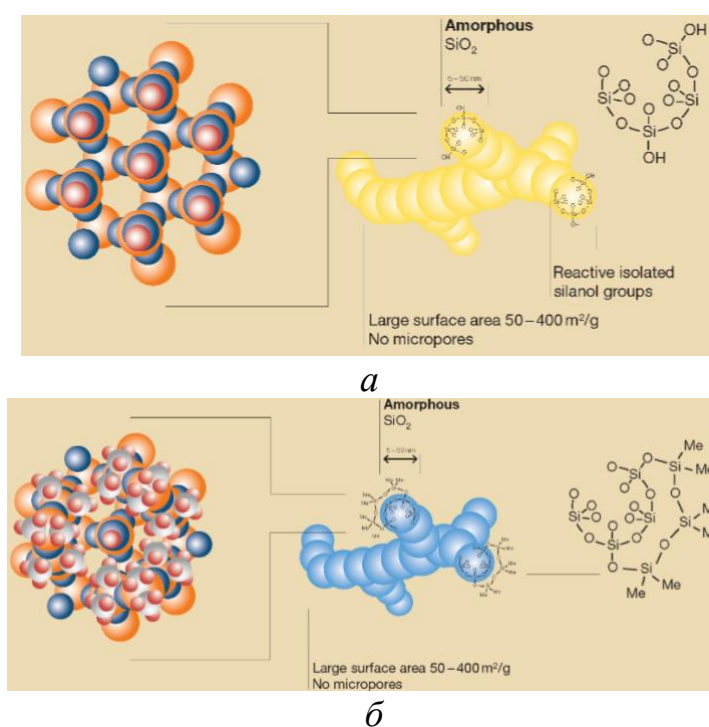


Рисунок 2.3 – Химическое строение высокодисперсного диоксида кремния [84]:

а – гидрофильный; *б* – гидрофобный;

атомы: ● – водорода; ● – углерода; ● – кислорода; ● – кремния

Частицы гидрофильного диоксида кремния притягиваются главным образом за счёт действия водородных связей и сил Ван-дер-Ваальса, таких как дисперсия или полярная ковалентная связь. В случае гидрофобного SiO_2 частицы диоксида кремния притягиваются в результате сил притяжения гидрофобизаторов [84].

Для изготовления опытных образцов был использован пирогенный гидрофильный диоксид кремния (SiO_2) HDK марки N20 производства фирмы WACKER (таблица 2.2). Данный материал является доступным, обладает не очень высокой стоимостью. Он отличается крайне низкой теплопроводностью и является ценным термоизоляционным материалом. Обладает хорошими адсорбционными

свойствами, особенно к полярным веществам. Продукт пожаро- и взрывобезопасен, не оказывает общетоксического действия. Многолетние наблюдения свидетельствуют о том, что при попадании в лёгкие диоксид кремния не вызывает силикоза.

Таблица 2.2 – Физико-химические показатели высокодисперсного диоксида кремния HDK марки N20 производства фирмы WACKER

Показатель	Норма
Удельная поверхность, м ² /г	200±30
pH 4 % дисперсии	3,8–4,3
Плотность набивки, г/л	40
Потери при сушке, 2 часа при 105 °С, %	<1,5
Остаток на сите по Моккеру, 40 мкм, %	<0,04

Введение в состав разрабатываемого смазочного материала диоксида кремния позволяет легко и быстро добиться необходимой консистенции смазочного материала (твёрдопластичного смазочного материала – покрытия), придать ему необходимую форму и сохранять его физико-химические и механические свойства на протяжении длительного времени во время хранения и транспортировки. Применение данного загустителя позволит смазочному материалу сохранять необходимые эксплуатационные характеристики при температурных воздействиях от –50 до +150 °С.

Введение сверхмалых частиц в состав смазочных материалов кардинально меняет характеристики смазочной плёнки и взаимодействие трущихся поверхностей. Это приводит к значительному усилению несущей способности и повышению устойчивости к интенсивным нагрузкам.

Наночастицы эффективно заполняют микронеровности поверхности, формируя замкнутые жидкие линзы и укрепляя поверхностный слой. Такой механизм активно участвует в процессе приработки и устранения микроповреждений на сопрягаемых поверхностях. Благодаря природной поляризации наномолекул образуется самоорганизующаяся плёнка толщиной 40–

80 нм оптимальной геометрии, что существенно повышает несущую способность узлов трения [85, 86].

В результате достигается надёжное разделение трущихся поверхностей, практически полностью исчезают адгезионные явления, что приводит к компенсации износа деталей и повышению точности кинематических пар. Сформированная наноплёнка впоследствии пропитывается смазочным материалом, который невозможно удалить с поверхности.

Важным способом улучшения эксплуатационных характеристик смазочных материалов является добавление различных присадок и наполнителей. Присадки, как поверхностно-активные вещества, растворимые в дисперсионной среде, существенно влияют на формирование структурного каркаса смазки, не являясь при этом загустителем [82].

Наполнители, обычно представляющие собой твёрдые нерастворимые материалы, формируют в составе смазки самостоятельную дисперсную фазу. Они особенно эффективны в тяжелонагруженных механизмах, работающих при высоких давлениях и температурах. В таких условиях наполнители обеспечивают необходимую смазочную способность, химическую и термическую стабильность материала.

При разработке рецептур смазочных материалов важно не только улучшать отдельные показатели качества за счёт добавления присадок или наполнителей, но и создавать системы, способные сохранять свою структуру и стабильность на протяжении длительного времени эксплуатации.

Для изготовления наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения были выбраны наиболее распространённые слоистые наполнители, характеризующиеся низким коэффициентом трения: графит и дисульфид молибдена.

Графит – природный материал, значение которого в современной промышленности трудно переоценить [87].

Графит – уникальное вещество, которое внешне проявляется как твёрдое тело с характерным серым цветом и металлическим блеском. Его структура может

быть аморфной, кристаллической или волокнистой. При контакте с руками графит оставляет жирные следы, легко переносясь на другие поверхности. Примечательной особенностью является его способность формировать тонкую плёнку на твёрдых телах при трении [87, 88].

С точки зрения химического строения графит представляет собой одну из аллотропных модификаций углерода. Его кристаллическая структура организована в виде гексагональной решётки слоистого типа. Основу этой структуры составляют параллельные плоские слои, состоящие из правильных шестиугольников, в вершинах которых располагаются атомы углерода. Такая уникальная организация атомов определяет особые физические и химические свойства этого материала (рисунок 2.4).

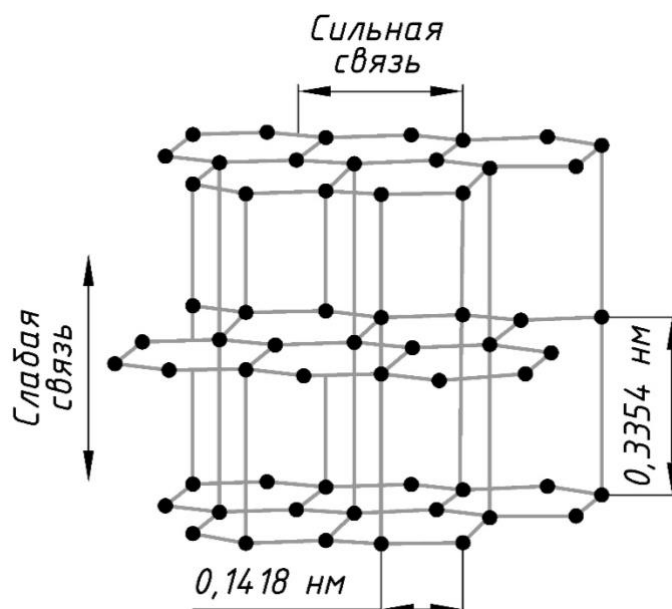


Рисунок 2.4 – Пространственная схема структуры графита [40]

В кристаллической решётке графита каждый атом углерода образует прочные ковалентные связи с тремя соседними атомами, располагаясь на расстоянии 0,14 нанометра (1,42 ангстрем). При этом отдельные слои атомов углерода располагаются друг от друга на значительном расстоянии – 0,34 нанометра (3,45 ангстрем).

Особую роль в структуре графита играют свободные электроны. Они не привязаны к конкретным атомам и способны беспрепятственно перемещаться

между слоями, обеспечивая их связь. Благодаря этим подвижным электронам графит обладает характерными физическими свойствами, включая электропроводность. Такая связь называется металлической, так как от нее зависят характерные свойства металлов.

Теоретическая плотность графита составляет 2270 кг/м^3 ; твёрдость по Моосу в слое вдоль оси C – 5,5 и выше; по термической стабильности графит превосходит дисульфид молибдена; температура плавления – $3859 \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, сублимации – $2700 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент трения – менее 0,1 [40, 82]. Примечательная особенность графита заключается в его высокой твёрдости в направлении, перпендикулярном плоскости слоистости. Этот показатель практически идентичен твёрдости алмаза. Благодаря такому свойству частицы графита способны проникать в металлическую поверхность без её разрушения при правильной ориентации [40].

Именно эта характеристика объясняет, почему при использовании графита в качестве смазочного материала практически полностью исключается прямой контакт металлических поверхностей в зоне трения. Даже при значительных пластических деформациях поверхностных слоёв металла процессы сдвига происходят либо под защитной плёнкой смазочного материала, либо непосредственно внутри неё. Это обеспечивает эффективную защиту трущихся элементов от износа [40].

Ключевыми характеристиками графита, обеспечивающими его широкое применение в промышленности, являются его пластичность и так называемая жирность. Эти свойства находятся в прямой взаимосвязи с антифрикционными качествами материала: чем выше показатель жирности, тем эффективнее снижается коэффициент трения.

Именно степень жирности определяет пригодность графита для использования в качестве смазочного материала. Это свойство также влияет на способность графита надёжно закрепляться на твёрдых поверхностях, что делает его незаменимым компонентом в различных технологических процессах.

Эти уникальные свойства графита позволяют формировать тончайшие плёнки при нанесении его на твёрдые поверхности. Особую роль в этом процессе

играет структура его поверхностей спайности, которые отличаются высокой насыщенностью сил молекулярного притяжения. Благодаря этим силам графит надёжно сцепляется с различными материалами, что лежит в основе его антифрикционных свойств.

Механизм действия графита как смазочного материала заключается в его способности равномерно заполнять все микронеровности контактирующих поверхностей и создавать сплошную защитную плёнку. При этом трение между графитовыми поверхностями остаётся минимальным, что обеспечивает высокую эффективность смазывающего действия.

Важное преимущество графита заключается в его способности оперативно покрывать обнажающиеся участки трущихся поверхностей в процессе приработки. Это позволяет сформировать защитный слой твёрдой смазки, который предотвращает прямой металлический контакт в начальный период работы пары трения. Именно в этот момент происходит наибольшее повреждение поверхностей, поэтому своевременное образование защитной плёнки критически важно для сохранения целостности деталей.

В России графиты вырабатываются по нескольким ГОСТ (таблица 2.3). В свою очередь, все марки природного графита могут регламентироваться общим ГОСТ 17022-81 [89]. В зависимости от минералогического типа и вида потребления регламентируются следующие марки природных графитов (таблица 2.4).

Таблица 2.3 – ГОСТ на графиты [87]

№ п/п	ГОСТ	Марка графита	Вид потребления
1	527-74	ГЛ-1, ГЛ-2, ГЛ-3	Литейный
2	8295-73	ГС-1, ГС-2, ГС-3, ГС-4, П	Смазочный
3	5420-74	ГЛС	Скрытокристаллический
4	4404-78	ГК-1, ГК-2, ГК-3	Карандашный
5	10273-73	ГAK-1, ГAK-2, ГAK-3	Аккумуляторный
6	7478-75	ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3, ГЭ-4	Элементный
7	18191-78	ГСМ-1, ГСМ-2	Специальный малозольный
8	10274-79	ЭУЗ-М	Электроугольный
9	4596-75	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3,	Тигельный

Таблица 2.4 – Марки природных графитов [89]

Минералогический тип графита	Вид потребления	Марка	Основные области производственного назначения
1	2	3	4
Кристаллический	Графит специальный малозольный	ГСМ-1, ГСМ -2	Для экспорта и производства изделий специального назначения
	Графит аккумуляторный	ГАК-1	Для аккумуляторных изделий специального назначения
		ГАК-2, ГАК-3	Для изготовления активных масс щелочных аккумуляторов и масс для графитированных антифрикционных изделий из цветных металлов
	Графит карандашный	ГК-1	Для карандашей чертёжной и канцелярской групп
		ГК-2, ГК-3	Для карандашей канцелярской, школьной и копировальной групп
	Графит смазочный	ГС-1	Для антифрикционных компонентов в твёрдых смазочных покрытиях при изготовлении ядерных реакторов, механизмов космических кораблей, летательных аппаратов, а также для коллоидно-графитовых препаратов
		ГС-2, ГС-3	В качестве ингредиента электропроводящей резины, изделий порошковой металлургии, графитовых смазочных карандашей и паст, электропроводящих полимерных плёнок
		ГС-4	Для изготовления консистентных смазок для открытых шестерён прокатных станов, рессор автомобилей и других высоконагруженных узлов трения
		П	Для изготовления изделий специального назначения

Продолжение таблицы 2.4

1	2	3	4
	Графит электроугольный	ЭУЗ-М, ЭУЗ-П, ЭУЗ-Ш, ЭУТ-I, ЭУТ-II, ЭУТ-Ш	Для производства электроугольных изделий
Кристаллический	Графит тигельный	ГТ-1, ГТ-2, ГТ-3	Для изготовления огнеупорных графитокерамических изделий
	Графит элементный	ГЭ-1, ГЭ-2, ГЭ-3, ГЭ-4	Для производства первичных химических источников тока
	Графит литейный	ГЛ-1	Для припыла рабочих поверхностей форм и стержней при получении отливок сложной конфигурации, требующих особо чистой поверхности
		ГЛ-2	Для припыла рабочих поверхностей форм стержней при получении отливок средней сложности
		ГЛ-3	Для припыла при получении отливок, не требующих высокой чистоты поверхности
Скрыто-кристаллический	Графит электроугольный	ЭУН	Для производства электроугольных изделий
	Графит литейный	ГЛС-1, ГЛС-2	Для изготовления противопригарных покрытий при получении отливок
		ГЛС-3, ГЛС-4	Для металлургического производства

По особенностям структурного строения графиты подразделяются на различные группы материалов. Среди них выделяются явнокристаллические разновидности, характеризующиеся чёткой кристаллической структурой, а также скрытокристаллические формы с менее выраженной организацией кристаллической решётки. Отдельную группу составляют графитоиды, имеющие структурные особенности, близкие к графиту, и высокодисперсные графитовые материалы, которые чаще всего известны как угли. Такое разнообразие структурных форм определяет специфические свойства каждой группы материалов.

Практическое значение как компонент смазочных материалов представляют собой графиты смазочные (ГС-1, ГС-2, ГС-3, ГС-4, П) (рисунок 2.5), соответствующие требованиям ГОСТ 8295-73. Характеристика этих графитов приведена в таблице 2.5.

При изготовлении опытных образцов разрабатываемого смазочного материала был использован графит марки ГС-4, вырабатываемый по ГОСТ 8295-73. Его применение способствует образованию структурного каркаса и стабилизации структуры смазочного материала, проявляя свойства дополнительного загустителя. Помимо качеств загустителя, благодаря его физико-химическим свойствам (таблица 2.5), графит, введённый в состав смазочного материала в качестве наполнителя, повышает его антифрикционные, противоизносные и плакирующие свойства.

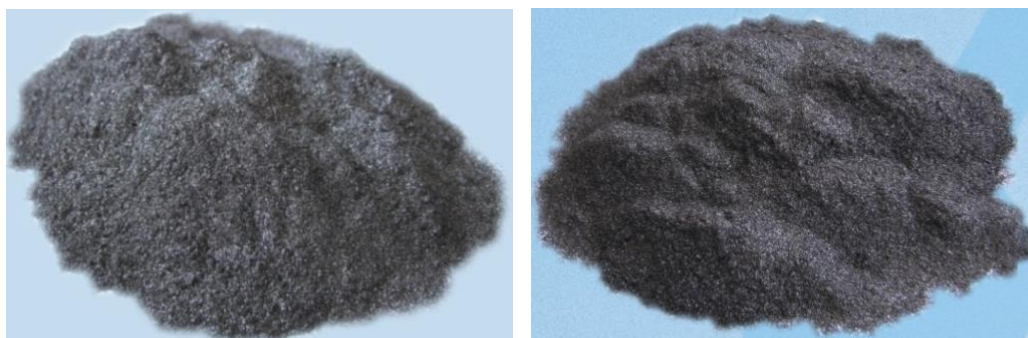
*а**б*

Рисунок 2.5 – Графит смазочный вырабатываемый по ГОСТ 8295-73:

a – марки ГС-2; *б* – марки П

Таблица 2.5 – Физико-химические показатели смазочных графитов, вырабатываемых по ГОСТ 8295-73

Свойство	Марка графита				
	ГС-1	ГС-2	ГС-3	ГС-4	П
Зольность, % (не более)	0,5	1,0	2,0	5,0	7,0
Выход летучих веществ, % (не более)	0,5	Не нормируется			1,0
Массовая доля влаги, % (не более)	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0
Массовая доля серы, % (не более)	Не нормируется				0,2
Величина концентрации водородных ионов водной вытяжки (pH)	6,0 – 8,2				
Остаток, % (не более) на сетке № 02	Не нормируется			0,1	0,1
на сетке № 016	Не нормируется			1,2	1,5
на сетке № 0063	Не нормируется	1,0	1,0	Не нормируется	
Массовая доля частиц с диаметром эквивалентной сферы более 6 мкм, % (не более)	40	Не нормируется			
Массовая доля углерода (C°), % (не менее)	Не нормируется				92

Введение графита в состав смазочного материала задаст необходимую нагрузочную способность и долговечность слою смазочного материала при высоких удельных нагрузках, т. к. графит является достаточно прочным на сжатие материалом и плохо сопротивляется сдвигу. Кроме того, графит является широкодоступным материалом с относительно низкой стоимостью.

С целью обеспечения реализации функциональных качеств лубрикационного материала имеет место одновременное применение в его составе графита и дисульфида молибдена.

Дисульфид молибдена (MoS_2) – порошок чёрного с сероватым оттенком цвета (рисунок 2.6). Применяется как компонент твёрдых и жидких смазочных материалов, в том числе предназначенных для эксплуатации при высоких температурах (до 400 °С). Природный MoS_2 кристаллизуется в гексагональную форму и имеет слоистую структуру. Искусственно полученный MoS_2 имеет также

слоистую структуру, но либо ромбоэдрической, либо промежуточной между гексагональной и ромбоэдрической формы.



Рисунок 2.6 – Дисульфид молибдена, вырабатываемый по ТУ 48-19-133-90 [92]

Кристаллическое строение дисульфида молибдена во многом напоминает структуру графита. В его решётке наблюдается характерное распределение атомов: прочные связи формируются между частицами молибдена и серы, при этом слои атомов серы располагаются на значительном удалении друг от друга.

Особенность структуры заключается в том, что каждый атом молибдена занимает позицию между двумя атомами серы, расстояние между которыми составляет 0,36 нанометра (3,6 ангстрем). Минимальное расстояние между атомами молибдена и серы достигает 0,24 нанометра (2,41 ангстрем), что определяет специфические свойства этого соединения (рисунок 2.7) [40, 82].

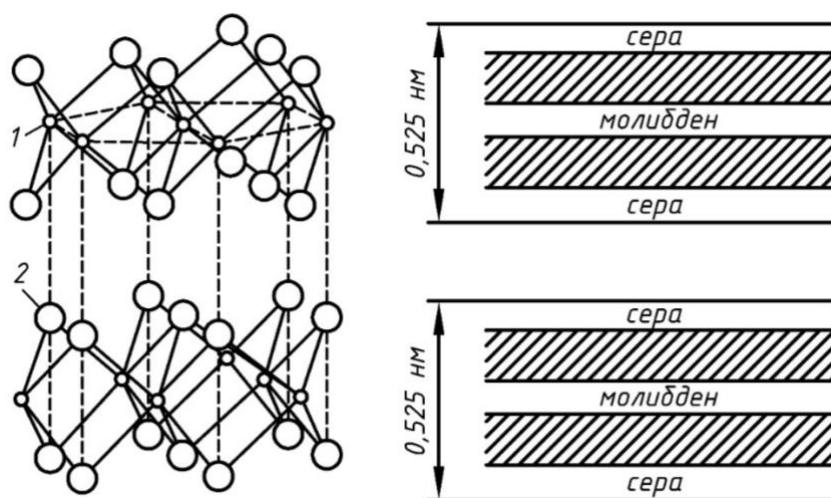


Рисунок 2.7 – Кристаллическая структура дисульфида молибдена MoS_2 :

единичные пластинки состоят из чистого молибдена или чистой серы, расстояние между которыми 0,36 нм и связь относительно слабая:

1 – атомы молибдена; 2 – атомы серы [40]

Дисульфид молибдена демонстрирует значительно более эффективные антифрикционные характеристики по сравнению с графитом. Это преимущество усиливается благодаря особому механизму физической адсорбции: при достижении оптимальной концентрации адсорбированных частиц и обеспечении их высокой подвижности вдоль базовых плоскостей MoS_2 происходит дополнительное снижение коэффициента трения.

Такая способность материала к формированию низкофрикционного слоя обусловлена его уникальной кристаллической структурой и подвижностью частиц на поверхности, что делает дисульфид молибдена особенно эффективным в качестве антифрикционного материала.

Основные физико-механические свойства дисульфида молибдена [82, 92]:

Плотность, кг/м^3	4800
Удельный вес, г/см^3	4,8
Твёрдость по Моосу	1,0–1,5
Температура начала сублимации, $^{\circ}\text{C}$	450
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1185
Устойчивость к окислению кислородом воздуха, $^{\circ}\text{C}$	300–350
Радиационная стойкость, рад	до $5 \cdot 10^9$
Коэффициент сухого трения в области температур до 550°C ...	0,02–0,08
Теплопроводность, ккал/см-сек-град	4,9–10~3
Магнитные свойства	Диамагнитен

При температуре $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ дисульфид молибдена на воздухе окисляется, образуя твёрдый абразив MoO_3 . Он также окисляется при взаимодействии с концентрированными H_2SO_4 и HNO_3 , растворяется в царской водке, энергично реагирует с фтором, а при нагревании с хлором, превращаясь в MoF_2 и MoCl_2 .

Практически не реагирует с бромом. Водород восстанавливает его до металла. При нагревании MoS_2 без доступа воздуха образуется Mo_2S_3 .

При измельчении дисульфида молибдена в течение 600 ч в коллоидной мельнице параметры его кристаллической решётки не изменяются. Тонкий слой MoS_2 на поверхности трения воспринимает динамические нагрузки до 10^3 МПа, а в статических условиях до $3 \cdot 10^3$ МПа.

Промышленность вырабатывает дисульфид молибдена по ТУ 48-19-133-90 трёх сортов – технический сорт, технический улучшенный сорт, суперулучшенный (высшего качества) сорт (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Спецификация дисульфида молибдена [92]

Наименование показателей	Дисульфид молибдена, марка		
	Технический (Technical)	Технический улучшенный (Technical Fine)	Суперулучшенный (Super Fine)
Содержание основного вещества (MoS_2), % мин	98,00	98,00	98,00
Содержание нерастворимых веществ, % макс.	0,50	0,50	0,50
Содержание железа, % макс.	0,25	0,25	0,25
Содержание окиси молибдена (MoO_3), % макс	0,05	0,05	0,15
Содержание воды (H_2O), % макс	0,02	0,05	0,15
Содержание масла, % макс	0,05	0,40	0,40
Содержание окиси углерода, % макс	1,50	1,50	1,50
Кислотное число мг КОН/г, % макс.	0,05	0,25	3,0
Размер зёрен (число по Фишеру), μm	3–4	0,65–0,8	0,4–0,45

Для изготовления опытных образцов наноструктурированного смазочного материала был использован образец, соответствующий ТУ 48-19-133-90, – дисульфид молибдена технического сорта, вырабатываемый по указанным ТУ. Применение MoS_2 в составе смазочного материала придаст ему высокие антифрикционные, противоизносные и противозадирные свойства, а также

обеспечит структурирование системы смазочного материала, характеризующейся высокими упруговязкими свойствами. Сочетание дисульфида молибдена с другими компонентами смазочной композиции позволит повысить термостабильность смазочного материала.

Дисульфид молибдена нетоксичен, химически нейтрален к другим смазочным материалам. Обладает высокой радиационной стойкостью.

2.1.2 Расчёт пропорций составляющих наноструктурированной смазки

Чтобы создать качественный смазочный материал для узлов трения с высокой нагрузкой, мало просто подобрать состав – нужно ещё и правильно рассчитать пропорции всех компонентов, которые обеспечат требуемые механические, физико-химические и трибологические характеристики.

Важный этап оптимизации продукта – поиск математической модели, которая покажет, как параметры изделия (входные факторы) влияют на его качество (целевую функцию). Модель – это упрощённое отображение свойств изучаемого объекта. Любой процесс можно описать разными моделями, но ни одна из них не даст абсолютно полного описания. Тем не менее упрощённая модель, показывающая ключевые особенности объекта, помогает лучше понять связи между причинами и следствиями, быстрее прийти к нужным выводам и принять верные решения.

Моделирование бывает физическим и математическим. При физическом моделировании объект воспроизводят в другом масштабе, что позволяет перенести результаты эксперимента на оригинал. Но когда речь идёт о сложных объектах и процессах, такой подход часто не подходит из-за множества противоречивых критериев и ограничений.

Математическое моделирование – это способ качественного или количественного описания объектов и процессов через уравнения, где реальный объект упрощают и схематизируют. Чаще всего математическая модель – это уравнение регрессии, которое показывает, как меняются математические ожидания целевой функции. Самый простой пример – уравнение парной корреляции, где на

целевую функцию влияет один фактор. В производстве же на целевую функцию обычно действует множество факторов, поэтому уравнение регрессии становится многомерным.

В итоге при статистическом подходе математическая модель объекта или процесса выглядит как полином n -й степени – отрезок ряда Тейлора, в который раскладывают неизвестную функцию [93]:

$$y = (x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots,$$

где y – функция отклика;

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, b_{iju}$ – оценка коэффициентов регрессионного уравнения, позволяет определить различные характеристики модели: базовый свободный член, линейные эффекты отдельных факторов, влияние парного взаимодействия между факторами, квадратичные эффекты самовоздействия и комплексное воздействие тройного взаимодействия факторов одновременно;

i – число факторов, $i = 1, 2, \dots, k$;

j, u – число сочетаний факторов;

x_i, x_j, x_u – варьируемые факторы.

В современной науке существует два основных подхода к поиску регрессионных уравнений: методы активного и пассивного эксперимента.

Пассивный эксперимент характеризуется тем, что исследователь выступает в роли наблюдателя, фиксируя значения входных и выходных параметров, в то время как процесс развивается естественным путём. Главный недостаток такого подхода заключается в том, что полученные модели сложно проверить на соответствие реальным условиям.

Активный эксперимент предполагает непосредственное вмешательство исследователя в процесс путём изменения уровней входных параметров. Этот метод включает несколько последовательных этапов: выбор формы модели процесса, разработка плана эксперимента, проведение исследований и анализ полученных результатов.

Особенность активного эксперимента заключается в предварительном планировании, направленном на получение максимально полной информации о целевой функции при минимальном количестве опытов и минимальной дисперсии. Такой подход требует одновременного изменения всех факторов в широких пределах. Теоретическая база активных экспериментов детально разработана в разделе математической статистики, известном как *теория планирования эксперимента*.

Теория математического планирования эксперимента представляет собой научную дисциплину, которая занимается разработкой эффективных методов организации исследований. Её основная задача – создание таких экспериментальных схем, которые позволяют получить максимум информации об изучаемом объекте.

Эта наука охватывает широкий спектр вопросов: от методологии проведения экспериментов до методов обработки полученных данных. Особое внимание уделяется тому, как наиболее эффективно использовать результаты исследований для улучшения характеристик изучаемых объектов и их оптимизации (процентное содержание компонентов смазочного материала). Метод планирования эксперимента позволит получить математические зависимости между исследуемыми входными и выходными факторами, значительно сократить время и объём проводимых экспериментов.

Выбор плана эксперимента определяется постановкой задачи исследования и особенностями объекта исследования.

При разработке экспериментального плана ключевым этапом является определение зависимой переменной Y , которую мы будем рассматривать как целевую функцию или параметр оптимизации. Этот параметр должен соответствовать ряду важных критериев:

- обеспечивать возможность измерения при любых изменениях состояния объекта;
- обладать высокой статистической эффективностью и точностью измерений;

- всесторонне характеризовать исследуемый объект;
- иметь чёткую физическую интерпретацию и практическую применимость;
- быть однозначно определённым, т. е. отражать только одно свойство объекта, которое подлежит оптимизации (максимизации или минимизации).

Таким образом, в качестве выходного оценочного фактора Y принимаем ресурс работы смазочного материала (в оборотах) при разовом нанесении смазочного материала на роликовые образцы лабораторной установки СМТ-1.

Затем назначим независимые факторы x исходя из априорной (доопытной) информации и предварительного изучения объекта исследования.

В экспериментальных исследованиях выделяют два типа факторов: качественные и количественные. К качественным относятся различные материалы, технологические методы, оборудование, персонал и прочие характеристики, которые нельзя измерить численно. Количественные факторы, напротив, поддаются точному измерению и выражаются в числовых значениях.

При организации эксперимента все задействованные факторы должны соответствовать определённым критериям.

Во-первых, факторы обязаны быть контролируемыми – исследователь должен иметь возможность устанавливать их на заданный уровень и поддерживать его неизменным на протяжении всего эксперимента. В случае нестабильности уровня фактора необходимо применять специальные методы контроля, включая более точные измерения. При этом требуемая степень точности определяется исходя из диапазона возможных изменений фактора.

Во-вторых, факторы должны обладать однозначностью воздействия, т. е. чётко соответствовать своему влиянию на исследуемый процесс.

В данном случае в качестве входных факторов x_i были приняты концентрации компонентов (в % по массе), входящих в состав наноструктурированного смазочного материала, а именно:

- x_1 – концентрация диоксида кремния в смазочном материале;
- x_2 – концентрация графита в смазочном материале;
- x_3 – концентрация дисульфида молибдена в смазочном материале;

остальное – битум.

Определение области проведения эксперимента требует глубокого изучения предварительной информации. На основе этого анализа в общем пространстве факторов выделяется конкретная подобласть, которая будет использоваться для планирования экспериментальных исследований.

Далее при составлении плана эксперимента зададим *число уровней и интервалы варьирования факторами*.

В многофакторных экспериментах, основанных на дисперсионном анализе, обычно принимают три уровня факторов (верхний, нулевой (основной) и нижний). Это объясняется тем, что в данных экспериментах важно проверить, значимо ли влияет тот или иной фактор и есть ли факторные взаимодействия. Варьирование переменными на трёх уровнях позволяет значительно повысить достоверность экспериментально полученной информации.

Интервал варьирования представляет собой определённую величину, которая при добавлении к базовому уровню фактора формирует его верхнюю границу, а при вычитании – нижнюю. Иными словами, это расстояние между тремя ключевыми точками на координатной оси: базовым, верхним и нижним уровнями фактора.

В многофакторном эксперименте уровни одного фактора должны сочетаться с уровнями другого, образуя тем самым вариант испытаний. Интервал варьирования того или иного фактора должен быть таким, чтобы можно было реализовать любой вариант испытаний.

Уровни факторов – это пределы исследуемого диапазона для конкретного технологического параметра. Они определяют крайние значения входных факторов: максимальное (верхний уровень) и минимальное (нижний уровень) значения, в рамках которых проводится настоящее исследование, были подобраны согласно проведённому аналитическому обзору литературных и патентных источников (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Области исследований варьируемых параметров

Входные факторы	Основной (нулевой) уровень, x_{0i}	Интервал варьирования, Δx_i
Концентрация диоксида кремния (x_1), %	7	3
Концентрация графита (x_2), %	15	5
Концентрация дисульфида молибдена (x_3), %	5	4

В рамках *полного факторного эксперимента* изучаются абсолютно все возможные сочетания факторов на выбранных уровнях исследования. Конкретный тип планирования определяется общим количеством таких комбинаций.

Преимущество такого подхода заключается в возможности одновременного изменения всех факторов. Это даёт возможность получить точные количественные данные как по каждому фактору в отдельности, так и по эффектам их взаимодействия. Важное достоинство метода – значительно меньшая погрешность результатов по сравнению с классическими методами, где исследуется влияние только одного фактора.

Количество опытов (опытных образцов) по плану в нашем случае определим по формуле [93–95]:

$$N = n^k,$$

где N – число опытов в плане;

n – количество уровней;

k – число факторов.

$$N = 3^3 = 27.$$

Чтобы система нормальных уравнений имела единственное решение, требуется матрица планирования эксперимента. Однако её создание в абсолютной системе единиц именованных факторов X_i представляет значительные трудности.

Решением этой проблемы становится предварительное преобразование – перевод каждого фактора из абсолютной системы в систему относительных координат.

Концентрация компонента в смазочном материале:

– нижний уровень фактора:

$$(x_{-1})_i = (x_0 - \Delta x)_i,$$

– верхний уровень фактора:

$$(x_{+1})_i = (x_0 + \Delta x)_i,$$

где $(x_0)_i$ – нулевой уровень (задан), %;

$(\Delta x)_i$ – интервал варьирования (задан), %.

Для первого фактора – концентрация диоксида кремния:

$$(x_{-1})_1 = 7 - 3 = 4 \%;$$

$$(x_{+1})_1 = 7 + 3 = 10 \%.$$

Для второго фактора – концентрация графита:

$$(x_{-1})_1 = 15 - 5 = 10 \%;$$

$$(x_{+1})_1 = 15 + 5 = 20 \%.$$

Для третьего фактора – концентрация дисульфида молибдена:

$$(x_{-1})_1 = 5 - 4 = 1 \%;$$

$$(x_{+1})_1 = 5 + 4 = 9 \%.$$

Перевод натуральных значений входных факторов в кодовые осуществляют по формуле:

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\Delta x_i},$$

где X_i – кодовое значение i -го фактора;

x_i – натуральное значение i -го фактора;

x_0 – нулевой уровень варьируемого фактора;

Δx_i – интервал варьирования i -го фактора.

Для первого фактора – концентрации диоксида кремния:

$$(X_{-1})_1 = \frac{4 - 7}{3} = -1;$$

$$(X_0)_1 = \frac{7 - 7}{3} = 0;$$

$$(X_{+1})_1 = \frac{10-7}{3} = +1.$$

Для второго фактора – концентрации графита:

$$(X_{-1})_2 = \frac{10-15}{5} = -1;$$

$$(X_0)_2 = \frac{15-15}{5} = 0;$$

$$(X_{+1})_2 = \frac{20-15}{5} = +1.$$

Для третьего фактора – концентрация дисульфида молибдена:

$$(X_{-1})_3 = \frac{1-5}{4} = -1;$$

$$(X_0)_3 = \frac{5-5}{4} = 0;$$

$$(X_{+1})_3 = \frac{9-5}{4} = +1.$$

Уровни и интервалы варьирования входных факторов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Уровни и интервалы варьирования факторов при нахождении оптимального состава наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения

Входные факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	Кодовые (X_i)			
	−1	0	+1	
	Натуральные			
Диоксид кремния (x_1)	4	7	10	3
Графит (x_2)	10	15	20	5
Дисульфид молибдена (x_3)	1	5	9	4

Преобразование реальных значений входных факторов в кодовые (относительные) единицы существенно упрощает процесс построения матрицы планирования эксперимента и заметно облегчает последующие вычислительные операции.

Кодированный план полного трёхфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования факторов (3^3) геометрически может быть представлен в виде куба, где каждая комбинация факторов (точка) представляет собой отдельное сочетание концентраций компонентов и, соответственно, отдельный опытный образец (рисунок 2.8).

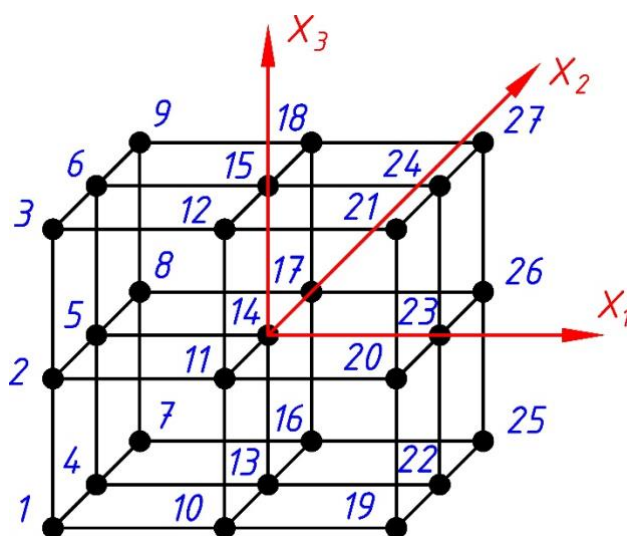


Рисунок 2.8 – Схематическое представление плана полного факторного эксперимента 3^3

Результаты экспериментального исследования систематизируются в специальной таблице – матрице планирования эксперимента (МПЭ). В этой таблице:

- каждая строка отражает отдельный опыт;
- столбцы содержат значения факторов как в исходной (натуральной), так и в преобразованной (кодированной) форме.

Пример такой матрицы планирования для рассматриваемого случая представлен в таблице 2.9.

В соответствии с полученными результатами и составленной матрицей планирования полнофакторного эксперимента были изготовлены 27 опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения, отличающихся комбинацией концентраций компонентов.

Таблица 2.9 – Матрица планирования полнофакторного эксперимента 3^3

№ опыта/ образца	Натуральные значения входных факторов			Кодовые значения входных факторов		
	SiO ₂ , %	C, %	MoS ₂ , %	X ₁	X ₂	X ₃
1	4	10	1	–1	–1	–1
2	4	10	5	–1	–1	0
3	4	10	9	–1	–1	+1
4	4	15	1	–1	0	–1
5	4	15	5	–1	0	0
6	4	15	9	–1	0	+1
7	4	20	1	–1	+1	–1
8	4	20	5	–1	+1	0
9	4	20	9	–1	+1	+1
10	7	10	1	0	–1	–1
11	7	10	5	0	–1	0
12	7	10	9	0	–1	+1
13	7	15	1	0	0	–1
14	7	15	5	0	0	0
15	7	15	9	0	0	+1
16	7	20	1	0	+1	–1
17	7	20	5	0	+1	0
18	7	20	9	0	+1	+1
19	10	10	1	+1	–1	–1
20	10	10	5	+1	–1	0
21	10	10	9	+1	–1	+1
22	10	15	1	+1	0	–1
23	10	15	5	+1	0	0
24	10	15	9	+1	0	+1
25	10	20	1	+1	+1	–1
26	10	20	5	+1	+1	0
27	10	20	9	+1	+1	+1

Числовые значения выходного параметра оптимизации (ресурс работы смазочного материала), степень значимости влияния концентрации компонентов смазочного материала (независимых факторов) и оптимальный состав смазочного материала определим по результатам проведённых экспериментальных исследований.

2.2 Лабораторные исследования опытных образцов наноструктурированного смазочного материала

С целью оптимизации состава смазочного материала необходимо произвести испытания опытных образцов по сравнению трибологических характеристик, ресурса к истиранию и температурной стойкости.

Оптимизация триботехнических параметров материалов для открытых тяжелонагруженных узлов трения в мобильных фрикционных системах – задача исключительной сложности и трудоёмкости. Это особенно актуально для транспортного комплекса, включающего железнодорожный, автомобильный, воздушный и водный транспорт.

Сложность решения обусловлена множеством факторов: трёхкоординатной динамикой движения, строгими требованиями к надёжности и безопасности систем, значительными габаритами механизмов и обширным диапазоном рабочих температур. Эти и другие особенности параметров и условий эксплуатации выделяют транспортные фрикционные системы в отдельную категорию.

Эффективность, надёжность и долговечность всей транспортной системы напрямую определяются работоспособностью ключевых узлов трения – гасителей колебаний, системы «колесо – рельс», тормозных механизмов, муфт сцепления, опор качения и скольжения, зубчатых передач.

Принимая во внимание вышеизложенные обстоятельства, для оптимизации состава наноструктурированного смазочного материала выбран в качестве исследуемого объекта контакт «колесо – рельс» – типичный пример открытого тяжелонагруженного узла трения в железнодорожной системе.

Эффективность смазочных материалов в узлах трения определяется комплексом разнообразных факторов. К ним относятся внешние параметры (нагрузка, скорость, состав окружающей среды, температурный режим), характеристики деталей узла (физико-механические свойства материалов, особенности обработки, геометрия поверхности), а также конструктивные особенности самого узла. Работоспособность смазочного материала зависит от

конкретного сочетания этих факторов. Многочисленность факторов и вероятностный характер их влияния в конкретных условиях существенно ограничивают возможности точных расчётов и прогнозирования свойств смазочных материалов при их разработке и исследовании. Именно поэтому наиболее достоверные данные о свойствах различных смазочных материалов можно получить только путём проведения испытаний.

Различают три основных вида испытаний: лабораторные, стендовые и натурные (эксплуатационные). Лабораторные испытания направлены на изучение общих закономерностей процессов трения и изнашивания, тогда как стендовые – на исследование конкретного узла трения. В ходе лабораторных испытаний оценивают физико-механические свойства и влияние режимов трения на фрикционные характеристики смазочных материалов. Для лабораторных исследований промышленность выпускает стандартные установки и машины трения, которые позволяют варьировать наиболее значимые внешние факторы, проводить испытания при различных схемах изнашивания и регистрировать основные триботехнические характеристики. Однако в некоторых случаях возможностей стандартных машин трения недостаточно, и исследователю приходится создавать собственную установку, моделирующую изучаемый процесс трения и изнашивания.

При стендовых испытаниях оценивают влияние конструктивных особенностей узлов трения на их трибологические характеристики. Стендовые испытания проводят на специальных установках, включающих исследуемый узел трения или его физическую модель, а также устройства для варьирования влияющих факторов и регистрации трибологических характеристик. Натурные испытания проводят на реальных машинах или механизмах, оценивая при этом взаимное влияние большинства факторов и различных узлов трения на работоспособность смазочного материала.

Постепенное приближение условий испытаний к реальным – основное различие между этапами испытаний. Большое количество факторов, влияющих на работу смазочного материала, и необходимость изучения их совокупного

воздействия требуют проведения обширного экспериментального исследования. При этом стоимость эксплуатационных испытаний существенно превышает стоимость лабораторных. Учитывая сложность проведения масштабных натурных испытаний на железнодорожном транспорте и невозможность оценки влияния некоторых факторов в эксплуатационных условиях, целесообразно начать с лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения.

Главная задача методов и методик лабораторных исследований смазочных материалов во фрикционных системах – обеспечение соответствия основных выходных характеристик (вид и интенсивность износа, коэффициент трения и его стабильность, трибологические характеристики, износостойкость смазочных материалов и др.) показателям, полученным на реальном объекте. Этого можно достичь путём выделения наиболее значимых факторов для конкретных условий исследования и их моделирования на лабораторном оборудовании.

2.2.1 Физико-математическое моделирование процессов трения и изнашивания в контакте «колесо – рельс»

Моделирование – это метод исследования объекта-оригинала, который строится на принципе точного соответствия между определёнными характеристиками самого объекта и его модели.

Процесс моделирования включает три основных этапа: сначала создаётся модель, затем проводится её детальное изучение, после чего полученные результаты переносятся на исследуемый объект. При этом крайне важно обеспечить однозначное соответствие между свойствами оригинала и его модели, что позволяет достоверно экстраполировать выводы на реальный объект исследования [96–98].

Фактически моделирование – замена реального объекта или явления некоторой моделью, имеющей ту же физическую природу, что и объект (или явление). Моделирование экономически выгодно, значительно проще, чем

натуральные испытания. Иногда натуральные испытания вообще невозможно осуществить.

В современной трибологии используются различные подходы к моделированию процессов [97]:

- математическое моделирование основывается на создании математических аналогов исследуемых процессов;
- физическое моделирование предполагает воспроизведение реальных физических процессов в уменьшенном или увеличенном масштабе;
- аналоговое моделирование строится на поиске прямых аналогий между различными физическими явлениями и процессами;
- математико-физическое моделирование сочетает математические методы с обеспечением реального подобия процессов;
- имитационное (гибридное) моделирование представляет собой комплексный подход, объединяющий математические и физические методы. Особенностью этого метода является возможность оперативного внесения корректировок в процесс эксперимента на основе полученных промежуточных результатов.

По степени сложности модели делятся на два основных типа:

- простые модели описывают отдельные виды движения или представляют собой идеализированные образы явлений. Примером служит модель математического маятника, где предполагается отсутствие сопротивления среды и упругости подвеса, а движение рассматривается только в одной плоскости;
- сложные модели характеризуются многокомпонентной структурой и описывают несколько типов движения одновременно, включая взаимодействие различных подсистем [97].

Любая трибосистема является сложной и для изучения требует составления сложной модели, которая учитывала бы всё многообразие процессов, происходящих на контакте. Как правило, сложные модели подобного типа не поддаются описанию с помощью системы уравнений из-за их многогранности и

сложности внутренних взаимосвязей. В таком случае наиболее оптимальным вариантом считается применение *физического моделирования*, основанного на использовании *теории подобия и метода анализа размерностей* [97] и обеспечивающего в процессе моделирования высокую точность получаемых результатов.

Физическое моделирование представляет собой исследование подобных физических процессов на специальных установках, которые сохраняют природу явлений, но воспроизводят их в изменённом масштабе – геометрическом или физическом, с применением расчётных коэффициентов для перехода от модели к реальному объекту. Этот метод широко используется в трибологии.

Такое моделирование может проводиться как на реальных объектах (натурное моделирование), так и на уменьшенных моделях, имеющих ту же природу, что и натуральный объект. Обычно оно осуществляется в ускоренном режиме времени (ускоренные испытания) и обладает рядом существенных преимуществ:

- значительная экономия материалов, сырья и энергии, поскольку трение реализуется на малогабаритных образцах, а также снижение затрат на технологическую обработку поверхностей трения и энергию при испытаниях;
- существенное сокращение времени на подготовительные и заключительные операции – часто в десятки раз, а также уменьшение машинного времени и объёма работ, связанных с монтажом и демонтажем узлов трения в эксплуатационных условиях;
- существенное снижение затрат на доработку конструкции машины до конкурентоспособного уровня благодаря уменьшению расходов на создание дорогостоящих натурных стендов, аренду помещений и экспериментальную проверку технических решений, связанных с узлами трения, ещё на этапе проектирования.

Теория физического подобия базируется на трёх основных теоремах моделирования [69, 97, 98]. *Первая теорема* утверждает, что подобные явления характеризуются одинаковыми критериями подобия. Критерий подобия – это

безразмерный комплекс физических величин, определяющий конкретный физический процесс. Помимо комплексных критериев используются симплексы – отношения одинаковых физических величин.

Вторая теорема (π -теорема) гласит, что любое уравнение физического процесса может быть представлено как функциональная зависимость между критериями подобия. Из этого следует, что из определённого количества параметров, входящих в уравнение связи, можно составить ограниченное число критериев подобия.

Третья теорема определяет, что подобными считаются явления с одинаковыми определяющими критериями и подобными условиями однозначности. Определяющие переменные – это критерии, содержащие величины из условий однозначности изучаемого явления. Они характеризуют процесс и могут быть измерены или вычислены заранее.

Условия однозначности изучаемых подобных явлений включают:

- геометрические – характеризуют форму и размеры тел, в которых протекает процесс трения;
- физические – описывают свойства среды и контактирующих тел;
- граничные – определяют особенности процесса на границах тел;
- временные – отражают особенности процесса во времени.

Применение теорем подобия и метода анализа размерностей позволяет преобразовывать сложные неоднородные системы в однородные и получать точные масштабные коэффициенты для перехода от натурального процесса к модельному и обратно. Это открывает широкие возможности для исследований на моделях [98].

Однако важно учитывать, что трение – это комплексный процесс физико-химической механики, на который существенно влияют термодинамика и взаимосвязь с динамическими процессами в механической подсистеме.

Для получения результатов лабораторных испытаний, сопоставимых с натурными условиями, необходимо обеспечить:

- идентичность динамических характеристик натуры и модели;

- идентичность физико-механических и геометрических характеристик контактирующих поверхностей и «третьего тела»;
- создание условий для идентичности процессов трения и изнашивания;
- идентичность термодинамических процессов на фрикционных контактах;
- учёт взаимовлияния динамических процессов на фрикционных контактах и в механических системах.

Процессы трения нелинейно и неоднозначно зависят от 40–50 факторов, причём степень их влияния меняется в зависимости от конкретных условий. Факторы, второстепенные в одних случаях, могут стать определяющими в других условиях.

Начнём решение задачи моделирования методом анализа размерности с составления списка факторов, характеризующих исследуемый процесс. Целесообразно выделить из общего числа параметров, самые существенные, влияние которых на исследуемый процесс является определяющим, что позволит существенно сократить объём экспериментальных работ.

На основании ряда исследований [22, 25] и по результатам проведённой работы было установлено, что на процессы трения и изнашивания в контакте «колесо – рельс» влияют следующие группы факторов:

- внешние механические воздействия: абсолютная величина и характер нагрузки, скорость относительного скольжения трущихся поверхностей, скорость качения колеса по рельсу, удельная нагрузка в контакте, частота и амплитуда колебаний и др.;
- физико-механические свойства поверхностей трения, окружающей и контактирующих сред: модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, макро- и микротвёрдость, характеристики растяжения, смятия, термообработка поверхностей и др.;
- макро- и микрогеометрия сближения поверхностей трения; форма контактирующей площади;
- вид трения: скольжение, качение, их комбинация;

- время и путь трения;
- физико-химические свойства смазочного материала: плотность, теплоёмкость, теплопроводность и др.

Для создания методики моделирования процесса трения с смазочным материалом в зоне контакта между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса был проведён анализ физической модели системы «гребень колеса – смазочный материал – боковая поверхность головки рельса». Эта модель даёт возможность представить процесс изнашивания колёсных пар и рельсов как единую функциональную зависимость:

$$\Phi [X1; X2; X3; X4; X5; X6; X7; X8; X9; X10; X11; X12; X13; X14; X15; X16; X17; X18],$$

где $X1$ – нормальная нагрузка в контакте F , Н;

$X2$ – время трения τ , с;

$X3$ – температура контакта t , °С;

$X4$ – линейный размер L_i , м;

$X5$ – контактное давление P , Па;

$X6$ – частота вращения ν , об/мин;

$X7$ – плотность материалов ρ_i , кг/м³;

$X8$ – твёрдость материалов HB_i , Па;

$X9$ – модуль упругости материалов E_i , Па;

$X10$ – теплопроводность материалов λ_i , Вт/(м·К);

$X11$ – скорость качения V_k , м/с;

$X12$ – скорость скольжения V_c , м/с;

$X13$ – площадь контакта A , м²;

$X14$ – длина пути трения S_i , м;

$X15$ – коэффициент трения f ;

$X16$ – расход смазочного материала Θ , м³/с;

$X17$ – удельный объёмный расход смазочного материала, w ;

$X18$ – сопротивление срезу (касательное напряжение) T , Па;

$X19$ – линейная интенсивность изнашивания Ih_i ;

X_{20} – весовая интенсивность изнашивания Ig_i , кг/м³.

$$\Phi [F; \tau; t; L_i; P; \nu; \rho_i; HB_i; E_i; \lambda_i; V_k; V_c; A; S_i; f; \Theta; w; T; Ih_i; Ig_i].$$

Предварительно проведем анализ параметров, входящих в уравнение, и определим их размерность (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Факторы, воздействующие на процессы трения и износа в зоне контакта между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса

№	Наименование параметра	Обозначение	Размерность в системе СИ	Размерность в системе MLTQ
1	Нагрузка	F	Н	$M^1 L^1 T^{-2} Q^0$
2	Время трения	τ	с	$M^0 L^0 T^1 Q^0$
3	Температура контакта	t	°С	$M^0 L^0 T^0 Q^1$
4	Линейный размер	L_i	м	$M^0 L^1 T^0 Q^0$
5	Контактное давление	P	Па	$M^1 L^{-1} T^{-2} Q^0$
6	Частота вращения	ν	об/мин	$M^0 L^0 T^{-1} Q^0$
7	Плотность материалов	ρ_i	кг/м ³	$M^1 L^{-3} T^0 Q^0$
8	Твёрдость материалов	HB_i	Па	$M^1 L^{-1} T^{-2} Q^0$
9	Модуль упругости материалов	E_i	Па	$M^1 L^{-1} T^{-2} Q^0$
10	Теплопроводность материала	λ_i	Вт/м·К	$M^1 L^1 T^{-3} Q^{-1}$
11	Скорость качения	V_k	м/с	$M^0 L^1 T^{-1} Q^0$
12	Скорость скольжения	V_c	м/с	$M^0 L^1 T^{-1} Q^0$
13	Площадь контакта	A	м ²	$M^0 L^2 T^0 Q^0$
14	Длина пути трения	S_i	м	$M^0 L^1 T^0 Q^0$
15	Коэффициент трения	f	-	-
16	Расход смазочного материала	Θ	м ³ /с	$M^0 L^3 T^{-1} Q^0$
17	Удельный объёмный расход смазочного материала	w	-	-
18	Сопротивление срезу	T	Па	$M^1 L^{-1} T^{-2} Q^0$
19	Линейная интенсивность изнашивания	Ih_i	-	-
20	Весовая интенсивность изнашивания	Ig_i	кг/м ³	$M^1 L^{-3} T^0 Q^0$

Размерность физической величины – это показатель, который демонстрирует взаимосвязь данной величины с базовыми (основными) параметрами в конкретной системе измерений.

В Международной системе единиц (СИ) выделяют семь фундаментальных механических единиц:

- 1) **M** – масса;
- 2) **L** – длина;
- 3) **T** – время;
- 4) **Q** – термодинамическая температура;
- 5) **I** – сила электрического тока;
- 6) **N** – количество вещества;
- 7) **J** – сила света.

В нашем случае для выражения параметров используется формула размерности, включающая четыре базовые единицы – **MLTQ**. Это означает, что все измеряемые величины в данной системе выражаются через комбинацию массы, длины, времени и температуры.

Основным показателем для замены наружного рельса в криволинейных участках пути и вывода из эксплуатации колёсных пар является превышение допустимых норм по линейному износу – как головки рельса, так и гребня колеса.

Количественная оценка скорости изнашивания колёсных пар и рельсов вычисляется с помощью специальной формулы, которая характеризует линейную интенсивность этого процесса.

$$Ih_i = h_i / S_i,$$

где h_i – линейный износ колёс и рельсов, м;

S_i – пройденный путь в зоне взаимодействия колеса и рельса за период проведения тестовых испытаний, м.

В ходе модельных экспериментов, изучающих процессы трения при качении с проскальзыванием, традиционно применяют следующие инструменты:

- роликовые пары;
- испытательные машины типа СМЦ и СМТ;
- весовой метод измерения износа (как наиболее точный).

Для корректного сравнения результатов лабораторных испытаний с натурными показателями необходимо осуществлять взаимный пересчёт показателей износа: от весовых значений к линейным и наоборот.

Так как в условиях натуральных испытаний определить весовой износ можно лишь косвенным путем, через линейный износ, то необходимо учитывать, что на пути скольжения колеса фактическая площадь касания воспроизводится N раз, а число N определяется в общем случае по формуле [98]:

$$N_i = L_i / d,$$

где L_i – длина дорожки трения на пути трения по длине рельса и по кругу катания колеса, м;

d – диаметр пятна контакта, м.

Весовые интенсивности изнашивания колеса и участка рельса $I_{g_{iH}}$ (кг/м³) при натуральных испытаниях определяется через линейную интенсивность изнашивания по формуле [25]:

$$I_{g_{iH}} = \frac{h_{iH} \cdot \rho_{iH} \cdot L_{iH}}{S_{iH} \cdot d_H} = I h_{iH} \cdot N_{iH} \cdot \rho_{iH},$$

где S_{1H} – путь трения колеса в кривой за время трения τ_H , м;

S_{2H} – дистанция взаимодействия колёс с рельсовым полотном на расчётном участке кривой в течение всего времени протекания процесса трения, τ_H , м;

h_{iH} – показатели линейного износа, характеризующие соответственно износ гребня колеса и головки рельса соответственно, м;

ρ_{iH} – показатели плотности, характеризующие соответственно колесо и рельс, кг/м³;

L_{1H} – длина дорожки трения по кругу катания колеса, м;

L_{2H} – длина дорожки трения на участке рельса, м;

d_H – диаметр пятна контакта, м.

Для лабораторных испытаний с использованием роликовой аналогии, весовые интенсивности изнашивания роликов, моделирующих колесо и рельс, $I_{g_{iM}}$

(кг/м³) определяется через весовой износ с приведением к линейной интенсивности изнашивания по формуле:

$$I_{g_{iM}} = \frac{M_{iM}}{S_{iM} \cdot A_M} = \frac{h_{iM} \cdot \rho_{iM} \cdot L_{iM}}{S_{iM} \cdot d_M} = I h_{iM} \cdot N_{iM} \cdot \rho_{iM},$$

где M_{iM} – весовой износ роликов, моделирующих колесо и рельс соответственно, за время испытаний τ_M , м;

S_{iM} – пути трения роликов, моделирующих колесо и рельс соответственно, за время трения τ_H , м;

A_M – площадь контакта в модельных условиях, м²;

h_{iM} – линейный износ роликов, моделирующих колесо и рельс соответственно, м;

ρ_{iH} – плотность материалов роликов, моделирующих колесо и рельс соответственно, кг/м³;

L_{iM} – длины дорожек трения по окружностям роликов, моделирующих колесо и рельс соответственно, м;

d_M – диаметр пятна контакта в модельных условиях, м.

Из системы фундаментальных единиц MLTQ (масса, длина, время, температура) необходимо отобрать четыре ключевых параметра. Эти параметры должны соответствовать следующим критериям:

- иметь независимую друг от друга размерность;
- оказывать наибольшее влияние на изучаемый процесс;
- являться базовыми для данной системы измерений.

На основе анализа приведённых выше выражений для интенсивностей изнашивания вычисление масштабных коэффициентов перехода (МКП) между моделью и реальным объектом предполагается производить с опорой на базовый масштабный коэффициент для выбранной модели длины пути (C_L). Таким образом, примем длину дорожек трения, а именно линейные размеры (L_i), в качестве основного базового параметра.

Независимость размерностей в системе MLTQ обеспечивается тем, что определитель, построенный на основе показателей степеней размерностей базовых

параметров, не равен нулю. Это условие гарантирует, что выбранные параметры действительно являются независимыми друг от друга в рамках рассматриваемой системы измерений.

Базисные параметры:

- | | | |
|---|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | Нормальная нагрузка F , Н | $[F] = M^1 L^1 T^{-2} Q^0$; |
| 2 | Время трения τ , с | $[\tau] = M^0 L^0 T^1 Q^0$; |
| 3 | Температура контакта t , °C | $[t] = M^0 L^0 T^0 Q^1$; |
| 4 | Линейный размер L_i , м | $[L_i] = M^0 L^1 T^0 Q^0$; |

Математическое представление системы, сформированной на основе четырёх базовых параметров, выражается в следующем виде:

$$\begin{aligned}\ln F &= \ln M + \ln L - 2 \cdot \ln T + 0 \cdot \ln Q; \\ \ln \tau &= 0 \cdot \ln M + 0 \cdot \ln L + 0 \cdot \ln T + 0 \cdot \ln Q; \\ \ln t &= 0 \cdot \ln M + 0 \cdot \ln L + 0 \cdot \ln T + \ln Q; \\ \ln L_i &= 0 \cdot \ln M + \ln L + 0 \cdot \ln T + 0 \cdot \ln Q.\end{aligned}$$

Численное представление главного определителя D_0 , который характеризует систему уравнений, имеет следующий вид:

$$D_0 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 1 \neq 0.$$

Так как главный определитель не равен нулю, то выбранные базисные параметры являются независимыми по отношению друг к другу.

Для обеспечения достоверности результатов модельных экспериментов в трибосистемах при проведении как натурных, так и лабораторных испытаний на трение и износ критически важно воспроизвести идентичные типы изнашивания.

Чтобы достичь однозначного соответствия качественных характеристик моделируемых процессов, необходимо обеспечить равенство ключевых параметров нагрузки и скорости как для реального объекта, так и для его модели [25].

С учётом этого требования в качестве ограничивающих параметров выбираются:

- контактное давление (P);
- частота вращения колеса (ролика) (ν);
- плотность материалов (ρ_i).

При этом константы подобия для этих параметров принимаются равными единице ($C_P = 1$, $C_\nu = 1$, $C_{\rho_i} = 1$). Это означает, что для выбранных граничных параметров используются одинаковые значения как для «натуры», так и для модели.

При взаимодействии гребня колеса с рельсом, где имеет место граничная смазка, толщина смазочного слоя на контактирующих поверхностях играет ключевую роль в процессах трения и изнашивания.

Как показывают исследования [25], при граничном трении двух твёрдых тел в присутствии смазочного материала система находится в автомобильной области. Это означает, что толщина смазочного слоя на поверхности гребня колеса автоматически устанавливается равной толщине слоя на поверхности ролика, который моделирует колесо. Такое равенство достигается при соблюдении двух условий:

- одинаковая шероховатость поверхностей;
- равный удельный объёмный расход смазочного материала (т. е. $w_n = w_m$, где w – удельный объёмный расход смазочного материала).

Согласно исследованиям И. В. Крагельского [99] для типичных машиностроительных металлических поверхностей деталей при насыщенном пластическом контакте коэффициент внешнего трения определяется следующим образом:

$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,55 \cdot \zeta(\zeta - 1) \cdot k_1 \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{1}{2}},$$

где τ_0 – сдвиговое сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю;

HB – твёрдость по Бринелю;

β – коэффициент упрочнения молекулярной связи;

ζ – параметр опорной кривой поверхности контакта;

k_1 – константа интегрирования опорной кривой, зависит от ζ ;

h – высота шероховатостей поверхностей;

r – приведенный радиус шероховатостей поверхностей.

В нашем случае колесо и рельс, и моделирующие их ролики изготовлены из одного материала соответственно. Кроме того, параметры шероховатости при изготовлении образцов выполняются одинаковыми, а состав смазочного материала не изменяется. В таком случае:

$$C_{HVi} = C_{Ei} = C_{\lambda i} = C_{\tau} = C_t = C_{\rho i} = C_T = \text{idem} = 1.$$

Исходя из вышесказанного имеем:

$$C_{\tau 0} = C_{\zeta} = C_{\beta} = C_{\tau} = C_{h/r} = \text{idem} = 1,$$

а следовательно, и $C_f = f_H / f_M = \text{idem} = 1$.

Вычисление масштабных коэффициентов перехода от реального объекта к его модели будет выполнено с использованием программы МКП (программа расчёта масштабных коэффициентов перехода), разработанной А. Л. Озябкиным, профессором кафедры «Транспортные машины и триботехника» ФГБОУ ВО РГУПС (рисунок 2.9). Результаты расчётов представлены в таблице 2.11.

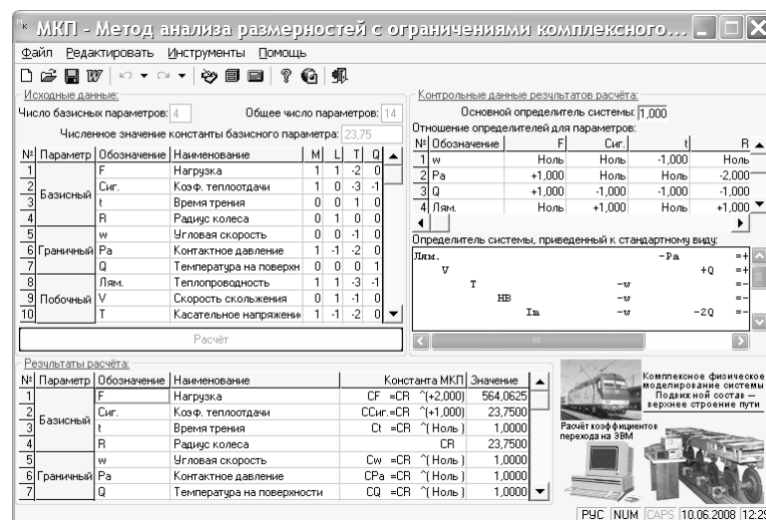


Рисунок 2.9 – Скриншот программы расчёта масштабных коэффициентов перехода от натурального объекта к модели

Таблица 2.11 – Данные, полученные в ходе вычисления коэффициентов масштабирования при переходе от полноразмерного объекта к его уменьшенной модели

№	Наименование параметра	Обозна- чение	Константа МКП	Расчётная формула
Базисные параметры				
1	Нагрузка	F	$C_F = C_L^2$	$F_M = F_H / C_L^2$
2	Время трения	τ	$C_\tau = C_L^0 = 1$	$\tau_M = \tau_H$
3	Температура контакта	t	$C_t = C_L^0 = 1$	$t_M = t_H$
4	Линейный размер	L_i	C_L – задается при моделировании	
Граничные параметры				
5	Контактное давление	P	$C_P = C_L^0 = 1$	$P_M = P_H$
6	Частота вращения	ν	$C_\nu = C_L^0 = 1$	$\nu_M = \nu_H$
7	Плотность материалов	ρ_i	$C_{\rho i} = C_L^0 = 1$	$\rho_M = \rho_H$
Моделируемые параметры				
8	Твёрдость материалов	HB_i	$C_{HBi} = C_L^0 = 1$	$HB_M = HB_H$
9	Модуль упругости материалов	E_i	$C_{Ei} = C_L^0 = 1$	$E_M = E_H$
10	Теплопроводность материала	λ_i	$C_{\lambda i} = C_L^0 = 1$	$\lambda_{iM} = \lambda_{iH}$
11	Скорость качения	V_{κ}	$C_{V_{\kappa}} = C_L$	$V_{\kappa M} = V_{\kappa H} / C_L$
12	Скорость скольжения	V_c	$C_{V_c} = C_L$	$V_{cM} = V_{cH} / C_L$
13	Площадь контакта	A	$C_A = C_L^2$	$A_M = A_H / C_L^2$
14	Длина пути трения	S_i	$C_{Si} = C_L$	$S_{iM} = S_{iH} / C_L$
15	Коэффициент трения	f	$C_f = C_L^0 = 1$	$f_M = f_H$
16	Расход смазочного материала	Θ	$C_{\Theta} = C_L^3$	$\Theta_M = \Theta_H / C_L^3$
17	Удельный объёмный расход смазочного материала	w	$C_w = C_L^0 = 1$	$w_M = w_H$
18	Сопротивление срезу	T	$C_T = C_L^0 = 1$	$T_M = T_H$
19	Линейная интенсивность изнашивания	Ih_i	$C_{Ihi} = C_L^0 = 1$	$Ih_{iM} = Ih_{iH}$
20	Весовая интенсивность изнашивания	Ig_i	$C_{Igi} = C_L^0 = 1$	$Ig_{iM} = Ig_{iH}$

Критерии подобия, которые входят в критериальное уравнение, нуждаются в экспериментальном подтверждении. Причина этого заключается в том, что область их практического применения может быть существенно ограничена.

Помимо проведения экспериментальной проверки, существует альтернативный подход – сравнение полученных критериев со *стандартными*

показателями, которые уже неоднократно использовались и доказали свою эффективность:

- при исследовании процессов трения;
- при изучении механизмов изнашивания;
- в других технических областях.

Такой сравнительный анализ позволит оценить корректность и применимость полученных критериев подобия в рамках изучаемой задачи.

Полученные критерии представляют собой функциональные зависимости между моделируемым параметром и базовыми величинами, которые оказывают существенное влияние на изучаемый процесс.

Важно отметить, что при изменении базовых параметров происходит модификация и самих критериев. Тем не менее практический опыт показывает: если правильно подобраны базовые параметры и корректно выполнено моделирование, то такие изменения не влияют на реализацию «стандартных» критериев.

Для создания адекватной модели смазанного фрикционного контакта при взаимодействии гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса необходимо рассчитать соотношение геометрических, нагрузочно-скоростных, временных и других параметров при проведении натурных и модельных испытаний с помощью полученных констант перехода.

Определим линейный масштаб, используя константу подобия длины дорожек трения (линейный размер) C_{Li} :

$$C_{Li} = L_{iH} / L_{iM} = \pi \cdot D_H / \pi \cdot D_M,$$

где D_H – средний диаметр колеса в точке контакта, $D_H = 1060 \text{ мм} = 1,06 \text{ м}$;

D_M – средний диаметр роликовых образцов, $D_M = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$.

$$C_{Li} = 1,060 / 0,04 = 26,5.$$

Используя результаты расчёта масштабных коэффициентов перехода от природы к модели (см. таблицу 2.11) и значение основного базового параметра (L_i), определим остальные параметры модели.

Номинальная площадка контакта для гребня колеса и боковой поверхности рельса при нагрузке 66 кН равна 113,605 мм² (рисунок 2.10), при этом реализуется контактное давление порядка 581 МПа.

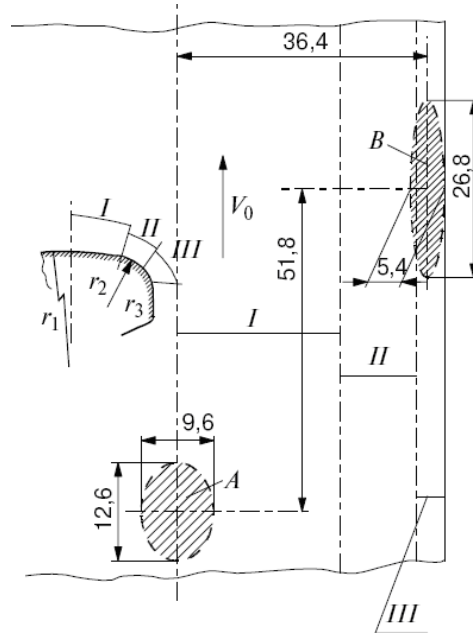


Рисунок 2.10 – Положение и размеры контактных площадок при двухточечном контакте ($F_A = 110$ кН, $F_B = 66$ кН):
 A, B – площадки контакта; I, II, III – области контакта;
 r_1, r_2, r_3 – радиусы кривизны головки рельса

Учитывая, что коэффициент масштабного перехода для номинальной площадки контакта равен $C_A = C_L^2 = 702,25$, получим:

$$A_M = \frac{A_H}{C_A} = \frac{A_H}{C_L^2},$$

$$A_M = \frac{113,605}{702,25} = 0,162 \text{ мм}^2.$$

При этом необходимо приложить к модельным образцам силу, равную:

$$F_M = \frac{F_H}{C_F} = \frac{F_H}{C_L^2},$$

$$F_M = \frac{66000}{702,25} = 94 \text{ Н}.$$

Поскольку на практике зачастую реализуются гораздо большие давления (до 4 ГПа), увеличим нагрузку до 1000 Н. Рассчитаем площадку контакта для данного случая, которая будет уже больше, чем 0,162 мм².

Для тел цилиндрической формы полуширина площадки контакта составляет:

$$b = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{F \cdot \eta}{l} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}},$$

где F – нагрузка, прилагаемая к месту контакта, Н;

η – приведённый коэффициент, характеризующий свойства материалов взаимодействующих тел, Па⁻¹;

l – длина площадки контакта, 0,002 м;

R_1, R_2 – радиусы взаимодействующих тел, м.

$$\eta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2},$$

где μ_1, μ_2 – коэффициент Пуассона взаимодействующих тел (для стали $\mu = 0,3$);

E_1, E_2 – модули упругости взаимодействующих тел (для стали $E = 210$ ГПа), Па.

$$\eta = \frac{1 - 0,3^2}{2,1 \cdot 10^{11}} + \frac{1 - 0,3^2}{2,1 \cdot 10^{11}} = 0,86 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1};$$

$$b = \sqrt{\frac{4}{3,14} \cdot \frac{1000 \cdot 0,86 \cdot 10^{-11}}{0,002} \cdot \frac{0,02 \cdot 0,02}{0,02 + 0,02}} = 0,00023 \text{ м.}$$

Номинальная площадь, представляющая собой эллипс с длиной большей оси 2 мм, будет равна $A_M = 0,962 \text{ мм}^2$. Это обеспечит значение контактного давления на уровне $P_M = 1,32 \text{ ГПа}$, что соответствует реальным условиям контакта, т. е. условие равенства контактных давлений для натуре и модели будет выполнено.

На практике подвижной состав проходит кривые участки пути со средней скоростью 60 км/ч. Угловая скорость вращения колеса при этом составит:

$$\omega_M = \frac{V_{KM}}{R_M},$$

где V_{KM} – скорость качения колеса, $V_{KM} = 60 \text{ км/ч} = 16,667 \text{ м/с} = 1000 \text{ м/мин}$;

R_M – средний радиус колеса в точке контакта, $R_M = D_H/2 = 1060/2 = 530 \text{ мм} = 0,53 \text{ м}$;

$$\omega_M = \frac{1000}{0,53} = 1886 \text{ рад/мин.}$$

Частоту вращения колеса ν_M определим по формуле:

$$\nu_M = \frac{\omega_M}{2\pi} = \frac{1886}{2\pi} = 300 \text{ об/мин.}$$

Учитывая, что $C_v = C_L^0 = 1$, $\nu_M = \nu_H$, получим, что частота вращения роликовых образцов $\nu_H = 300$ об/мин. Следовательно, во время эксперимента необходимо реализовать угловую скорость вращения ролика 1886 рад/мин, установив частоту вращения вала нижнего образца порядка 300 об/мин.

Результаты расчёта численных значений основных параметров натурального и модельного объектов представлены в виде таблицы 2.12.

Таблица 2.12 – Численные значения основных параметров натурального и модельного объектов

№	Наименование параметра	Обозначение	Размерность в системе СИ	Значения оригинала	Значения модели
1	Нагрузка	F	Н	702 250	1000
2	Контактное давление	P	ГПа	1,32	1,32
3	Частота вращения	ν	об/мин	300	300
4	Скорость качения	V_k	км/ч	60	2,3
5	Скорость скольжения	V_c	км/ч	6	0,23
6	Площадь контакта	A	мм ²	675,6	0,962

2.2.2 Методика проведения лабораторных исследований опытных образцов по сравнению трибологических характеристик и стойкости к истиранию

Смазочные материалы отличаются сложным составом, а их трибологические характеристики требуют всестороннего анализа множества параметров. При этом важно принимать во внимание целый комплекс условий: воздействие окружающей среды, технологию нанесения материала, состояние трущихся поверхностей и прочие значимые факторы.

На сегодняшний день наиболее распространённым и информативным методом определения эффективности смазывающих свойств масел и смазочных

материалов, является «Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. Материалы смазочные жидкие и пластичные» (ГОСТ 9490-75).

Данный метод соответствует международным стандартам DIN 51 350, ASTM D 2266, что позволяет проводить сравнения результатов, полученных на машинах трения и по отечественному стандарту, с зарубежными результатами. С помощью машины трения моделируется трение скольжения на контактных поверхностях шариков. В данной конструкции три нижних шарика зафиксированы в неподвижном состоянии внутри чашки, в то время как верхний шарик перемещается с равномерной скоростью. В ходе испытаний постепенно повышается нагрузка и регистрируется сила трения и ее величина, а также износ поверхностей трения. По точкам перегиба на кривой износа определяются критическая нагрузка (P_k), нагрузка сваривания (P_c) и нагрузочная (несущая) способность; по предельному давлению определяют индекс задира (I_z); по пятнам износа шариков судят о характере изнашивания и определяют показатель износа.

Взаимосвязь между износом ($D_{и}$) и нагрузкой (P) наглядно демонстрируется на графике кривой износа (рисунок 2.11).

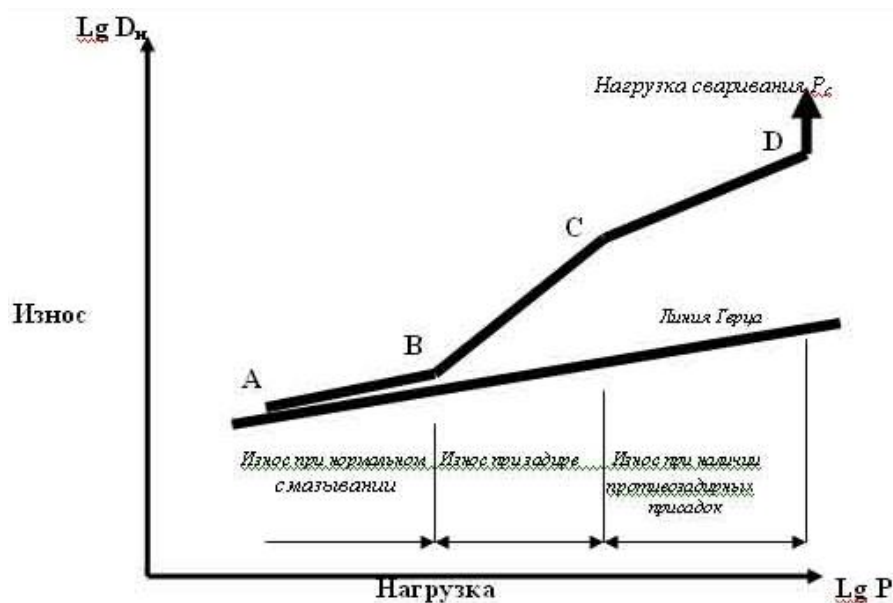


Рисунок 2.11 – График изменения износа, зарегистрированный при испытаниях на четырёхшариковой машине трения

Скорость изнашивания в период от начала процесса до момента сваривания определяется двумя ключевыми факторами:

- антизадиристыми характеристиками смазочного материала;
- его способностью минимизировать износ.

Количественно эта зависимость оценивается с помощью специального показателя – индекса задира (I_3).

На начальном участке кривой (отрезок AB) износ происходит в условиях граничного трения и пропорционален нагрузке. В этом режиме соотношение между нагрузкой и износом является постоянной величиной. По этому участку кривой (участок AB) можно судить о противоизносных, антифрикционных свойствах смазочного материала.

По точкам перегиба кривой определяют критические точки износа.

Критическая нагрузка P_k – это нагрузка, при превышении которой начинается интенсивный износ, вызванный схватыванием, который, в свою очередь, происходит в результате разрыва смазочной плёнки. Критическая нагрузка показывает предельную нагрузку, которую может выдержать смазочный материал без разрыва смазочной плёнки, и называется несущей способностью.

Нагрузка сваривания P_c – предельная нагрузка, при превышении которой шары схватываются (свариваются), т. е. верхний шарик становится неподвижным.

На основании анализа априорной информации, учитывая специфику условий эксплуатации открытых тяжело нагруженных узлов трения, было определено, что для данных трибосистем наиболее эффективным будет использование наноструктурированного смазочного материала в форме твёрдопластичного смазочного материала – покрытия (ТПСМП).

Однако из вышеизложенного видно, что испытания на четырёхшариковой машине трения дают возможность оценить трибологические характеристики и определить качество смазывания как жидких, так и пластичных смазочных материалов и не учитывают особенности и специфику свойств твёрдых и твёрдопластичных смазочных материалов – покрытий (Т и ТПСМП), в частности

разрабатываемого наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения.

В связи с этим до настоящего времени не предоставлялось возможным объективно осуществить оценку с высоким уровнем точности эксплуатационных и трибологических характеристик и определить влияния данных параметров на эффективность работы разрабатываемого смазочного материала.

Поэтому для решения вопроса оценки триботехнических характеристик твёрдых и твёрдопластичных смазочных материалов, а также оценки стойкости колёсных пар с использованием указанных смазочных материалов необходимо было искать новые способы и методы.

Таким образом, для решения указанной задачи был разработан *метод оценки основных триботехнических и трибоспектральных характеристик* на базе использования современных методов неразрушающего контроля, динамического мониторинга и компьютерных технологий. Данный метод заключается в определении и анализе ключевых показателей трения и износа смазочных материалов при их применении для защиты рабочих поверхностей в открытых узлах трения различных механических систем.

Основные положения

Предложенный метод направлен на исследование и анализ ключевых трибологических параметров смазочных материалов при их применении для защиты рабочих поверхностей в открытых узлах трения различных механических систем.

В рамках метода определяются следующие характеристики:

а) коэффициент трения f при ротапринтном нанесении твёрдых (Т) и твёрдоплёночных смазочных материалов (ТПСМП) на поверхности трения. Его измерение производится при максимальных значениях нагрузок N , скоростях скольжения $V_{ск}$ или качения V_k , соответствующих техническим требованиям для данных Т и ТПСМП. При этом учитываются заданные частоты k_i и формы A_i собственных колебаний, а также частоты ω_j и амплитуды A_j внешнего воздействия

по двум взаимно перпендикулярным направлениям нормального и тангенциального контакта поверхностей;

б) снижение коэффициента трения [Δf] (рисунок 2.12) в зоне контакта после нанесения Т и ТПСМП. Этот показатель отражает износостойкость и энергоэффективность материала. Его определение осуществляется посредством модельных испытаний на трибометрических установках типа Amsler при постоянном присутствии Т и ТПСМП в зоне контакта;

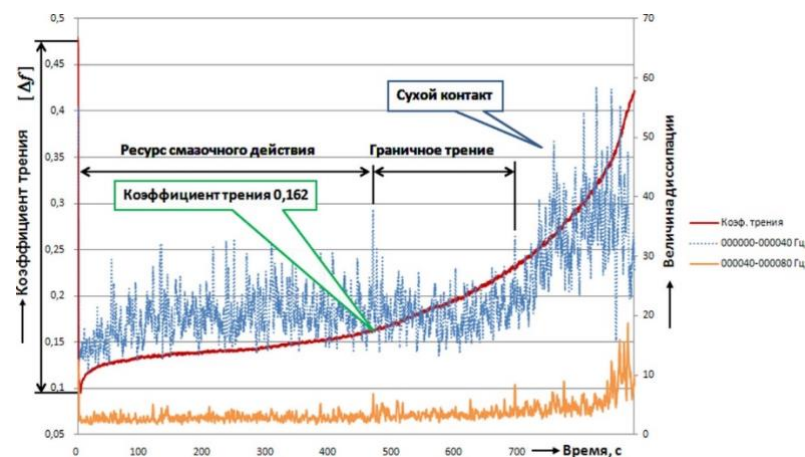


Рисунок 2.12 – Совокупный анализ энергетических потерь в различных частотных диапазонах, позволяющий оценить срок службы одного нанесения твёрдого смазочного материала (ТСМ)

в) срок службы смазочного слоя, который формируется на образцах за счёт невыдавленного объёма твёрдых (Т) и твёрдоплёночных смазочных материалов (ТПСМП) при однократном нанесении. Этот показатель отражает устойчивость к истиранию и определяется во время испытаний на трибометрических установках типа Amsler. Измеряется количеством оборотов роликовых образцов (фиксируется счётчиком) с момента начала эксперимента до полного износа смазочного слоя (когда смазка теряет свои свойства). О завершении ресурса свидетельствует повышение коэффициента трения f до уровня сухого контакта;

г) учитывая особенности функционирования открытых узлов трения и значительное влияние динамических нагрузок на фрикционном контакте, которые взаимодействуют с динамическими нагрузками в механической подсистеме (что

может изменять триботехнические характеристики T и ТПСМП на порядок), испытания данных материалов должны проводиться согласно методике *трибоспектральной идентификации*. При этом:

- динамические характеристики машины трения типа Amsler на различных частотах должны соответствовать параметрам механической подсистемы;
- оценка эффективности коэффициента трения f выполняется по методике определения частотной функции передачи или комплексного коэффициента трения.

Методика испытаний узлов трения базируется на представлении объектной и модельной фрикционных механических систем (ФМС), включающих механическую подсистему и фрикционную подсистему. Механические подсистемы описываются системой аналогичных линеаризованных дифференциальных уравнений, а процессы на фрикционном контакте («объект» и «модель») – идентичными математическими моделями и уравнениями регрессии, полученными в ходе натурного эксперимента (например, с использованием математического планирования полного или дробного факторного эксперимента).

Соотношение параметров «объекта» и «модели» устанавливается через физическое моделирование на основе теории подобия и метода анализа размерностей.

Эффективность ТСМ предлагается оценивать по увеличению интегральных оценок диссипации трибосистемы (см. рисунок 2.12), рассчитанных по амплитудно-фазочастотным характеристикам трибосистемы. При этом значение должно превышать заданный уровень среднеквадратичного отклонения относительно математического ожидания интегральной оценки диссипации после непосредственного нанесения T и ТПСМП на образец.

Аппаратура и материалы

Для определения эффективности T и ТПСМП методом оценки трибологических и трибоспектральных характеристик применялись следующие материалы и аппаратура:

1 Наиболее часто для имитации контакта между гребнем колеса и боковой поверхностью рельсовой головки используется роликовая аналогия, которая позволяет воспроизводить процесс качения с проскальзыванием. Такое моделирование эффективно реализуется на лабораторных установках типа Amsler, предназначенных для проведения трибологических испытаний.

Эти машины способны воспроизводить различные режимы трения – от скольжения до качения с проскальзыванием – в условиях, максимально приближенных к реальным ситуациям как закрытых, так и открытых пар трения подвижного состава. При этом возможно использование смазочных материалов любой консистенции (от жидких до твёрдых) с применением различных методов нанесения.

Встроенная система измерительных приборов обеспечивает непрерывный контроль важнейших параметров процесса: момента трения, температуры в зоне контакта, линейного износа образцов и переходного сопротивления.

При проведении лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию использовалась установка СМТ-5018 (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Общий вид машины трения

Принцип работы установки основан на взаимном истирании двух образцов, которые прижимаются друг к другу с заданной силой F . Во время испытаний производится измерение момента трения на нижнем образце.

Механизм функционирования реализуется следующим образом (рисунок 2.14): электродвигатель 38 запускает процесс через зубчатый ремень 5, приводящий в движение два шкива 3, 6. От первого шкива 3 вращение передаётся через систему предохранительного штифта 94, вала (39), муфт 9 и датчика момента 10 к валу бабки 14, на который устанавливается один из образцов 27. Вторым шкив 6 через промежуточную систему валов 8 и кулачковую муфту 11 приводит в движение каретку 25 с установленным на ней вторым образцом 26.

Полная схема взаимодействия всех компонентов машины представлена на кинематической схеме (см. рисунок 2.14).

Сжатие образцов 26, 27 осуществляется пружиной 33, при этом сила давления регулируется осью-винтом 29. Нагрузка передаётся через комплексную систему, включающую пята 30, кронштейн 28, корпус каретки 22, а также может распределяться через рычаг испытательной камеры. При испытаниях по схеме «ролик-колодка» усилие воздействия варьируется в пределах от 200 до 2000 ньютонов.

Измерительная система установки регистрирует три ключевых параметра: момент трения, с помощью датчика 10, усилие нагрузки, определяемое прецизионным сопротивлением датчика 36 и скорость вращения вала 14, измеряемая тахогенератором 37.

Предельные характеристики установки предусматривают различные значения максимально допустимого момента трения для конфигурации «ролик – колодка»: при частоте вращения от 75 до 150 оборотов в минуту он составляет 20 ньютон-метров, а при увеличении скорости до диапазона 150–1500 оборотов в минуту снижается до 10 ньютон-метров.

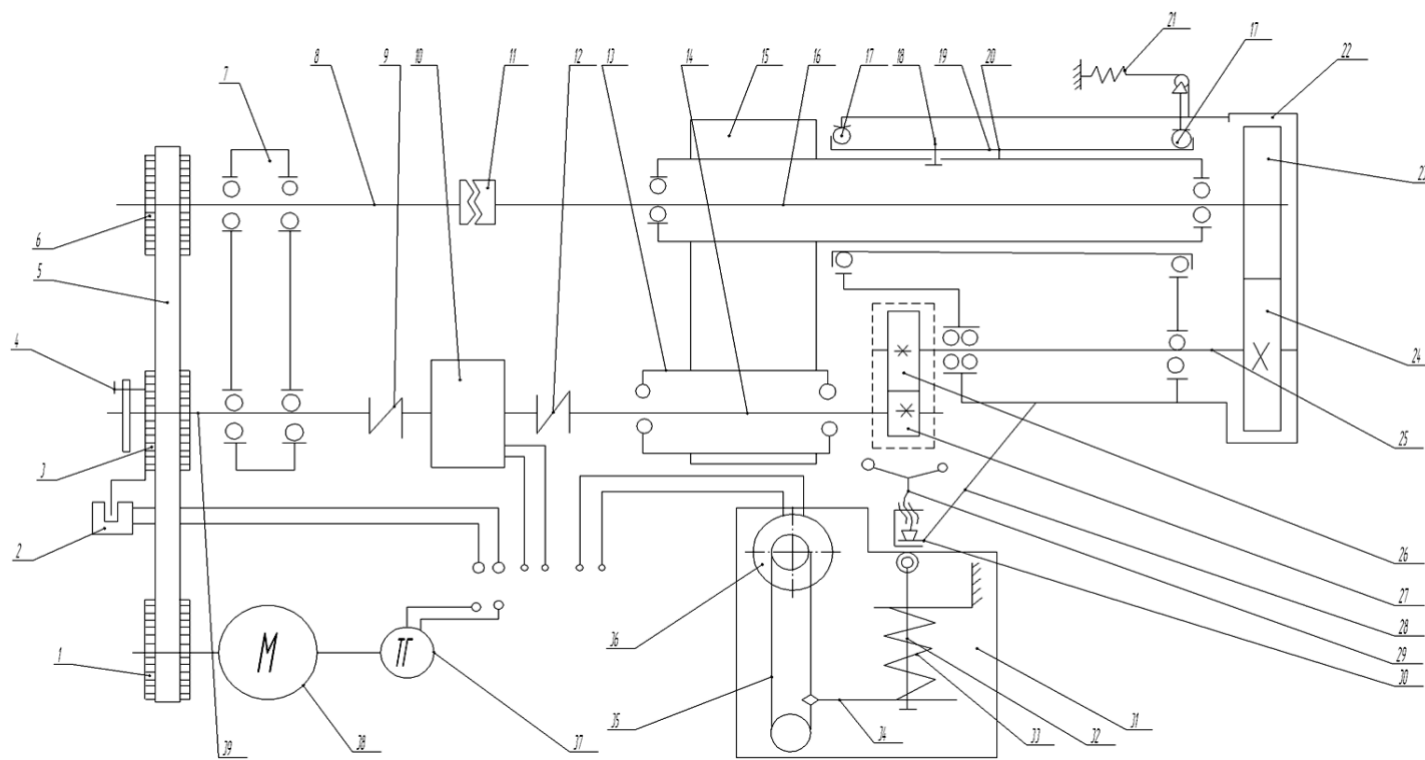


Рисунок 2.14 – Кинематическая схема машины 2070 СМТ-1:

1 – шкив сменный; 2 – датчик числа циклов; 3 – шкив; 4 – штифт предохранительный; 5 – ремень зубчатый; 6 – шкив сменный; 7 – корпус; 8 – вал; 9 – муфта; 10 – датчик момента; 11 – муфта кулачковая; 12 – муфта; 13 – шпиндель сменный; 14 – вал бабки; 15 – бабка нижнего образца; 16 – вал; 17 – подшипник; 18 – фиксатор; 19 – стакан; 20 – труба; 21 – пружина уравнивания; 22 – каретка; 23, 24 – шестерня; 25 – вал каретки; 26, 27 – образцы; 28 – кронштейн; 29 – ось-винт; 30 – пята; 31 – механизм нагружения; 32 – тяга; 33 – пружина; 34 – планка; 35 – нить; 36 – датчик нагрузки; 37 – датчик скорости; 38 – электродвигатель; 39 – вал

Точность измерений прибора в режиме статической нагрузки характеризуется предельно допустимым значением среднеквадратического отклонения случайной составляющей погрешности измерителя момента трения, которое составляет 1 %.

В процессе испытаний осуществляется подсчёт циклов вращения нижнего образца с помощью бесконтактного выключателя (датчик числа циклов 2 на рисунке 2.14). Регулировка коэффициента проскальзывания образцов «ролик-ролик» при идентичном диаметре верхнего и нижнего образцов производится путём замены сменного шкива 6. Изменение диапазона частоты вращения вала нижнего образца выполняется заменой шкива 1, а точная настройка частоты в заданных пределах осуществляется с помощью электродвигателя 38.

Машина имеет два диапазона измерения частоты вращения нижнего образца: диапазон А охватывает значения от 75 до 750 оборотов в минуту, а диапазон Б – от 150 до 1500 оборотов в минуту. При этом погрешность измерения частоты вращения вала нижнего образца не превышает ± 3 %.

2 Экспериментальные данные были получены с использованием комплексной автоматизированной системы регистрации и обработки, включающей персональный компьютер типа IBM/PC, многоканальные усилители вибродатчиков с каналами синхронизации, усилитель сигнала датчиков машины трения 2070 СМТ-1, тензоусилитель, плату цифровой обработки сигналов с 9-канальным АЦП, комплект соединительных кабелей, источник питания и специализированное программное обеспечение.

3 С целью определения эффективности Т и ТПСМП, согласно методу оценки трибологических и трибоспектральных характеристик, рекомендуется проведение испытаний по схемам «ролик – ролик», «ролик – звездочка». Для проведения лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала из колёсной и рельсовой стали в соответствии с геометрическими размерами, полученными в результате проведения физико-

математического моделирования, были изготовлены роликовые образцы трения, моделирующие колесо и рельс соответственно (рисунок 2.15).

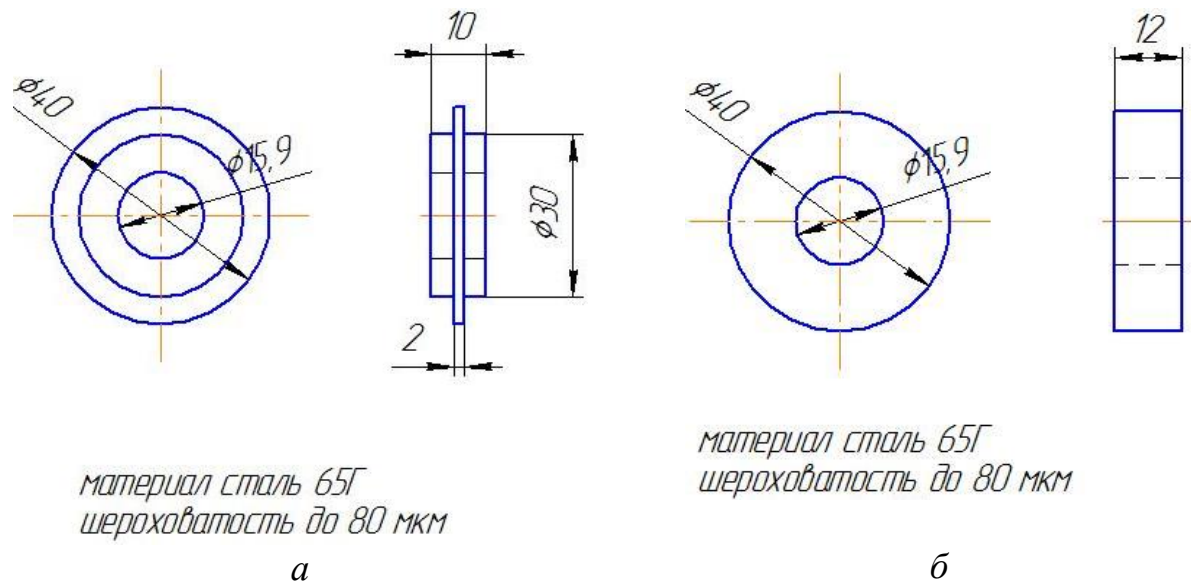


Рисунок 2.15 – Роликовые образцы трения, моделирующие колесо (а), рельс (б)

4 Для осуществления взвешивания использовались весы электронные типа WA-35 и ВЛК-500г.

5 Для удаления лишнего Т И ТПСМП (выдавленного объема смазочного материала) с верхнего и нижнего роликовых образцов применяются шпатели № 1, № 2 соответственно (рисунок 2.16).

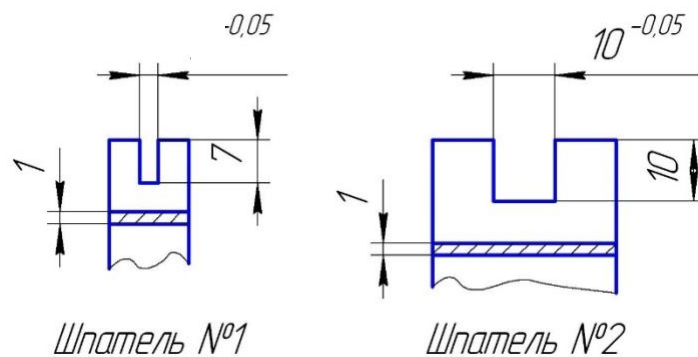


Рисунок 2.16 – Шпатели № 1 и № 2

6 Для очистки роликовых образцов от загрязнений и остатков смазочного материала использовались:

– нефрас марки СЗ-80/120 (БР-1 «Галоша») – растворитель, который не образует плёнки после испарения;

– очищающие материалы: медицинская гигроскопическая вата, соответствующая ГОСТ 5556, либо мягкая ткань наподобие фланели.

7 Испытуемые опытные образцы наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения, изготовленные в форме цилиндров (стержней) длиной 110 мм, диаметром 20 мм с различным содержанием компонентов в количестве 27 единиц.

Подготовка к испытанию

Перед проведением испытаний все детали, контактирующие с твёрдыми и твёрдоплёночными смазочными материалами (Т и ТПСМП), тщательно очищаются. Процесс очистки включает промывку несколькими порциями нефраса или иного растворителя, который эффективно удаляет загрязнения и остатки смазочных материалов. Промывка продолжается до тех пор, пока растворитель не станет прозрачным, после чего детали просушиваются на воздухе.

Ход испытания

Программа испытаний смазочных материалов разрабатывается с учётом условий, максимально приближённых к реальному взаимодействию гребня колеса с головкой рельса. Испытания проводятся в режиме трения качения с продольным проскальзыванием.

Методика тестирования предусматривает нанесение образца Т и ТПСМП на вращающийся верхний роликовый цилиндрический образец, который имитирует гребень колеса. В ходе испытаний устанавливаются определённые параметры нагрузки и скорости (PV) согласно разделам разработанного метода оценки трибологических и трибоспектральных характеристик в соответствии с выбранными константами подобия физико-математического моделирования.

Для реализации лабораторных исследований опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения нагрузочно-скоростные параметры задавались согласно

проведенному моделированию и составили: нагрузка 1000 Н, контактное давление 1,32 ГПа, средняя частота оборотов 300 об/мин.

Исследование представляет собой серию последовательных измерений. При этом каждое отдельное измерение выполняется с использованием свежей порции исследуемого твёрдого и твёрдоплёночного смазочного материала (Т и ТПСМП), а также с применением новых роликовых образцов для обеспечения достоверности результатов.

Во время проведения испытаний осуществляется непрерывная регистрация трёх основных параметров: момента силы трения, коэффициента трения и количества оборотов роликовых образцов.

Завершение эксперимента определяется моментом полного износа смазочного слоя. Это фиксируется при достижении коэффициента трения значений, характерных для сухого контакта образцов (в диапазоне 0,2–0,4), что сопровождается появлением первых следов износа.

Показатель износостойкости вычисляется как среднее арифметическое результатов, полученных в ходе трёх и более отдельных экспериментов. Такой подход обеспечивает достоверность и репрезентативность итоговых данных.

Одним из основных вопросов при проведении испытаний смазочных материалов на истираемость – это вопрос о количестве смазочного материала, наносимом на образец. Этот вопрос напрямую связан с вопросом оптимального расхода смазочного материала в эксплуатации. Эксперименты показывают, что существуют вполне определенные физические условия, которые определяют толщину невыдавливаемого слоя смазочного материала, который в конечном итоге и определяет способность смазочного материала к работе после разового нанесения. В данном методе предусматривается контроль количества смазочного материала при нанесении и в процессе испытаний.

Методика определения ключевых триботехнических и трибоспектральных характеристик состоит из последовательных этапов:

Сначала проводится предварительная подготовка образцов. Электронные весы используются для точного взвешивания роликовых образцов перед началом испытаний. После этого образцы монтируются на испытательную установку типа Amsler.

Далее осуществляется нанесение смазочного материала. Твёрдые и твёрдоплёночные смазочные материалы (Т и ТПСМП) равномерно наносятся методом натирания на верхний роликовый цилиндрический образец, который имитирует гребень колеса.

Следующий этап включает контрольное взвешивание. Повторное измерение массы образцов позволяет определить точное количество нанесённого смазочного материала. После этого образцы вновь устанавливаются на машину трения.

Затем выполняется процесс приработки. На образцы подаётся заданная нагрузка, и в течение 10 секунд происходит приработка нанесённого Т и ТПСМП. Завершающим этапом подготовительной стадии является удаление излишков смазочного материала из зоны фрикционного взаимодействия (рисунок 2.17).

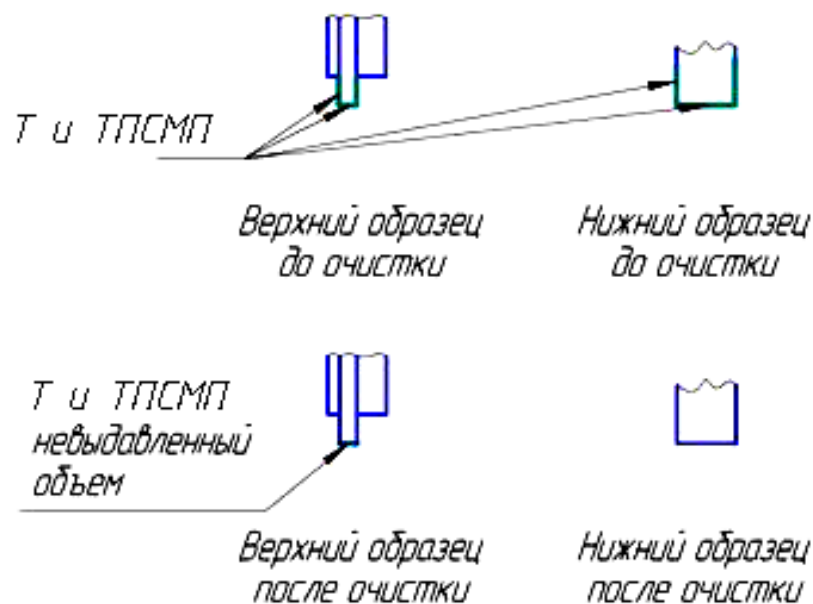


Рисунок 2.17 – Схема очистки шпателями роликовых образцов

Производится взвешивание исследуемых образцов на электронных весах для установления величины невыдавленного объёма Т и ТПСМП при разовом нанесении его на роликовые образцы;

Образцы возвращают на машину трения, и проводятся испытания по определению триботехнических и трибоспектральных характеристик, а также по определению ресурса невыдавленного объёма смазочного материала при разовом нанесении.

При необходимости тестирования смазочных материалов в условиях изменённой температуры используется криокамера. Её активируют перед началом испытаний, чтобы создать требуемый температурный режим окружающей среды.

После того как заданная температура стабилизируется, запускают привод испытательной машины. Режим работы подбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимые параметры движения – это может быть чистое качение, чистое скольжение или их комбинация. На завершающем этапе подготовки к испытаниям к образцам прилагается заданная нагрузка.

2.2.3 Результаты лабораторных исследований опытных образцов по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию

В соответствии с разработанной методикой по результатам численных значений нагрузочно-скоростных параметров натурального и модельного объектов, полученных в ходе выполнения физическо-математического моделирования, были проведены лабораторные исследования 27 единиц опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию.

Результаты лабораторных исследований опытных образцов по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию приведены в таблице 2.13 и на рисунках 2.18–2.26.

Таблица 2.13 – Результаты лабораторных исследований опытных образцов по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию

Фактическое значение образца	№ опыта	Коэффициент трения, f	Снижение коэффициента трения [Δf]	Суммарная масса роликов, г			Вес невыдавленного слоя СМ, г	Долговечность СМ, обороты	Ресурс СМ, обороты/г
				до испытаний	после нанесения СМ	после 10 с приработки			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Опытный образец № 1	1	0,12	0,02	127,517	127,79	127,52	0,003	1157	385 667
	2	0,13	0,045	127,472	127,728	127,476	0,004	1387	346 750
	3	0,125	0,02	129,13	129,389	129,132	0,002	930	465 000
Опытный образец № 2	1	0,11	0,03	128,986	129,129	128,987	0,001	1557	1 557 000
	2	0,14	0,05	128,897	129,102	128,898	0,001	1211	1 211 000
	3	0,13	0,03	128,852	129,142	128,853	0,001	1280	1 280 000
Опытный образец № 3	1	0,12	0,03	129,047	129,215	129,049	0,002	966	483 000
	2	0,12	0,03	129,019	129,149	129,021	0,002	828	414 000
	3	0,13	0,03	129,01	129,12	129,013	0,003	804	268 000
Опытный образец № 4	1	0,12	0,03	127,896	128,133	127,897	0,002	1006	503 000
	2	0,13	0,02	127,862	128,036	127,868	0,004	1448	362 000
	3	0,14	0,015	128,996	129,22	128,997	0,002	1501	750 500
Опытный образец № 5	1	0,14	0,04	127,838	128,088	127,84	0,002	859	429 500
	2	0,15	0,06	128,966	129,194	128,967	0,001	509	509 000
	3	0,14	0,05	128,942	129,225	128,943	0,001	478	478 000
Опытный образец № 6	1	0,12	0,02	127,312	127,425	127,314	0,002	923	461 500
	2	0,14	0,04	127,297	127,355	127,301	0,004	942	235 500
	3	0,125	0,025	128,198	128,317	128,201	0,003	1452	484 000
Опытный образец № 7	1	0,14	0,02	127,285	127,383	127,287	0,002	525	262 500
	2	0,12	0,025	128,186	128,31	128,189	0,003	643	214 333
	3	0,12	0,02	128,184	128,273	128,187	0,003	645	215 000
Опытный образец № 8	1	0,14	0,02	127,382	127,553	127,383	0,001	342	342 000
	2	0,14	0,02	127,366	127,537	127,367	0,001	313	313 000
	3	0,14	0,01	127,354	127,677	127,355	0,001	155	155 000

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Опытный образец № 9	1	0,15	0,03	127,955	128,164	127,996	0,003	743	247 667
	2	0,14	0,035	127,957	128,121	127,958	0,001	402	402 000
	3	0,13	0,01	128,575	128,755	128,576	0,001	791	791 000
Опытный образец № 10	1	0,15	0,03	127,931	128,37	127,935	0,001	284	284 000
	2	0,12	0,03	128,525	128,703	128,527	0,002	390	195 000
	3	0,16	0,03	128,463	128,677	128,464	0,001	289	289 000
Опытный образец № 11	1	0,12	0,03	141,417	141,588	141,418	0,001	977	977 000
	2	0,115	0,015	141,405	141,587	141,407	0,002	2146	1 073 000
	3	0,15	0,03	141,402	141,577	141,403	0,001	778	778 000
Опытный образец № 12	1	0,13	0,03	142,968	143,105	142,97	0,002	1817	908 000
	2	0,12	0,02	142,962	143,054	142,964	0,002	2475	1 237 500
	3	0,15	0,02	142,684	142,857	142,688	0,004	3412	853 000
Опытный образец № 13	1	0,135	0,015	142,954	142,975	142,956	0,002	1310	655 000
	2	0,14	0,04	142,672	142,874	142,673	0,001	598	598 000
	3	0,14	0,04	142,661	142,84	142,663	0,002	1216	608 000
Опытный образец № 14	1	0,13	0,033	142,416	142,505	142,42	0,004	1790	447 500
	2	0,12	0,25	142,405	142,501	142,408	0,003	1017	339 000
	3	0,13	0,025	141,785	142,082	141,79	0,005	1477	295 400
Опытный образец № 15	1	0,13	0,04	142,389	142,555	142,391	0,002	752	376 000
	2	0,12	0,02	141,77	141,868	141,772	0,002	551	275 500
	3	0,118	0,01	141,754	141,85	141,759	0,005	745	149 000
Опытный образец № 16	1	0,15	0,05	141,975	142,221	141,979	0,004	1919	479 750
	2	0,12	0,02	141,969	142,153	141,972	0,003	1409	469 667
	3	0,15	0,03	142,31	142,436	142,312	0,002	1505	752 500
Опытный образец № 17	1	0,15	0,035	141,97	142,157	141,972	0,002	937	468 500
	2	0,13	0,025	142,308	142,362	142,309	0,001	424	424 000
	3	0,15	0,03	142,3	142,402	142,301	0,001	352	352 000
Опытный образец № 18	1	0,15	0,02	144,326	144,461	144,334	0,008	4439	554 875
	2	0,155	0,03	142,32	142,377	142,323	0,003	1391	463 667
	3	0,15	0,03	142,28	142,309	142,282	0,002	800	400 000

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Опытный образец № 19	1	0,145	0,015	144,353	144,485	144,355	0,002	4762	2 381 000
	2	0,15	0,03	144,349	144,447	144,351	0,002	5316	2 658 000
	3	0,14	0,015	144,356	144,472	144,359	0,003	6734	2 244 667
Опытный образец № 20	1	0,15	0,02	142,773	142,837	142,775	0,002	1789	894 500
	2	0,15	0,02	142,754	142,793	142,757	0,003	2201	733 667
	3	0,14	0,02	142,747	142,927	142,752	0,005	5767	115 300
Опытный образец № 21	1	0,14	0,02	142,365	142,398	142,367	0,002	1032	516 000
	2	0,16	0,03	142,356	142,394	142,358	0,002	830	415 000
	3	0,12	0,005	142,339	142,392	142,341	0,002	873	436 500
Опытный образец № 22	1	0,11	0,005	142,843	142,874	142,849	0,006	6105	1 017 500
	2	0,12	0,03	142,833	142,843	142,837	0,004	3655	913 750
	3	0,11	0,02	142,792	142,839	142,796	0,004	3156	789 000
Опытный образец № 23	1	0,14	0,035	142,258	142,317	142,261	0,003	2248	749 333
	2	0,14	0,04	142,243	142,326	142,245	0,002	1022	511 000
	3	0,1	0,01	142,235	142,277	142,237	0,002	1205	602 500
Опытный образец № 24	1	0,125	0,015	141,797	142,022	141,8	0,003	2694	898 000
	2	0,125	0,01	141,783	141,788	141,786	0,003	2652	884 000
	3	0,13	0,025	141,777	141,827	141,778	0,001	634	634 000
Опытный образец № 25	1	0,14	0,03	142,763	142,818	142,766	0,003	3831	1 277 000
	2	0,133	0,02	142,748	142,828	142,751	0,003	2608	869 333
	3	0,14	0,05	142,74	142,78	142,743	0,003	4340	1 446 667
Опытный образец № 26	1	0,135	0,015	142,104	142,22	142,105	0,001	995	995 000
	2	0,14	0,015	142,079	142,15	142,08	0,001	625	625 000
	3	0,14	0,025	142,369	142,409	142,37	0,001	644	644 000
Опытный образец № 27	1	0,14	0,03	142,085	142,162	142,087	0,002	1166	583 000
	2	0,14	0,03	142,352	142,484	142,456	0,004	2791	697750
	3	0,13	0,02	142,348	142,408	142,35	0,002	1473	736500

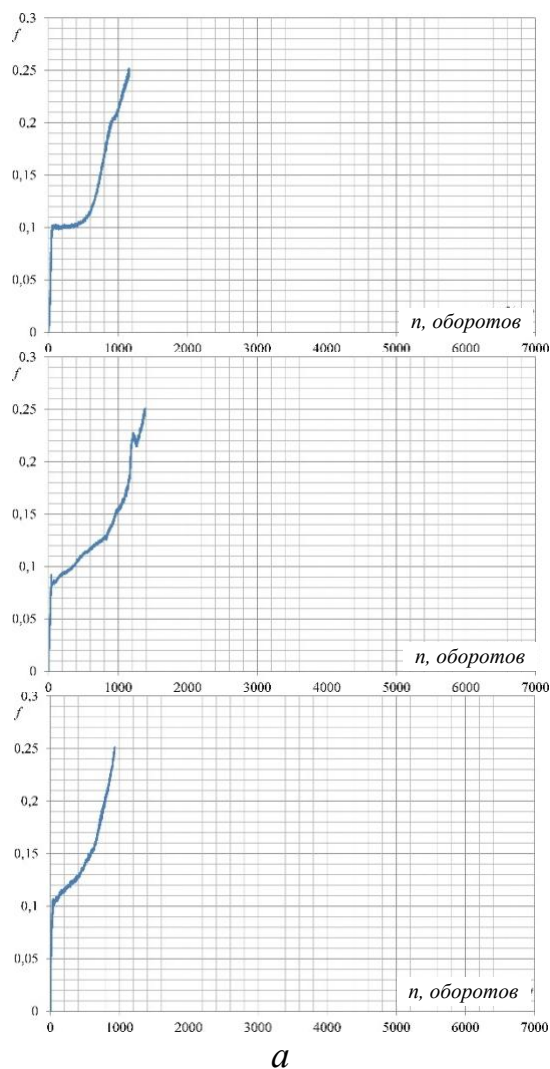


Рисунок 2.18 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 1 (*a*), № 2 (*б*), № 3 (*в*)

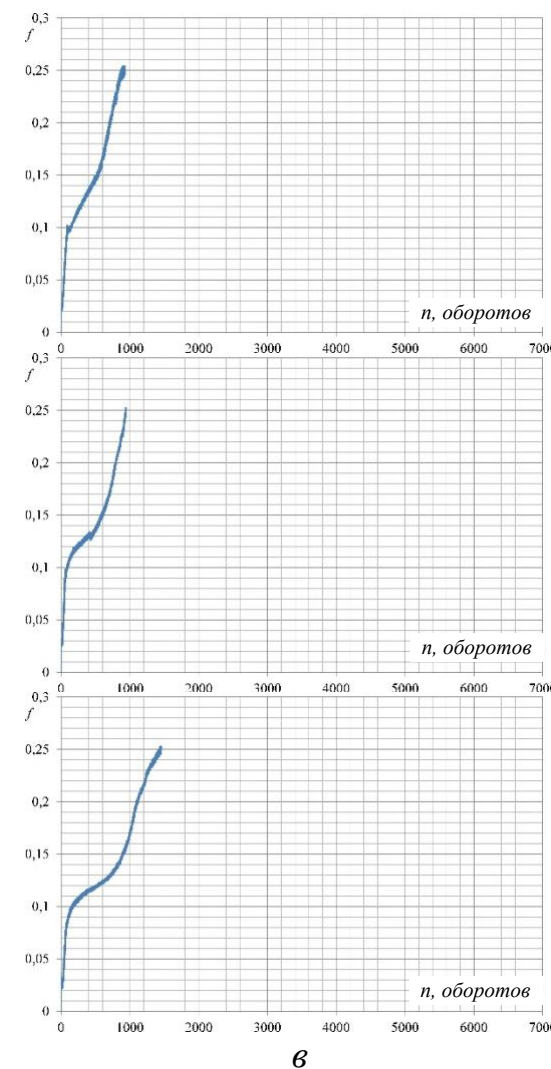
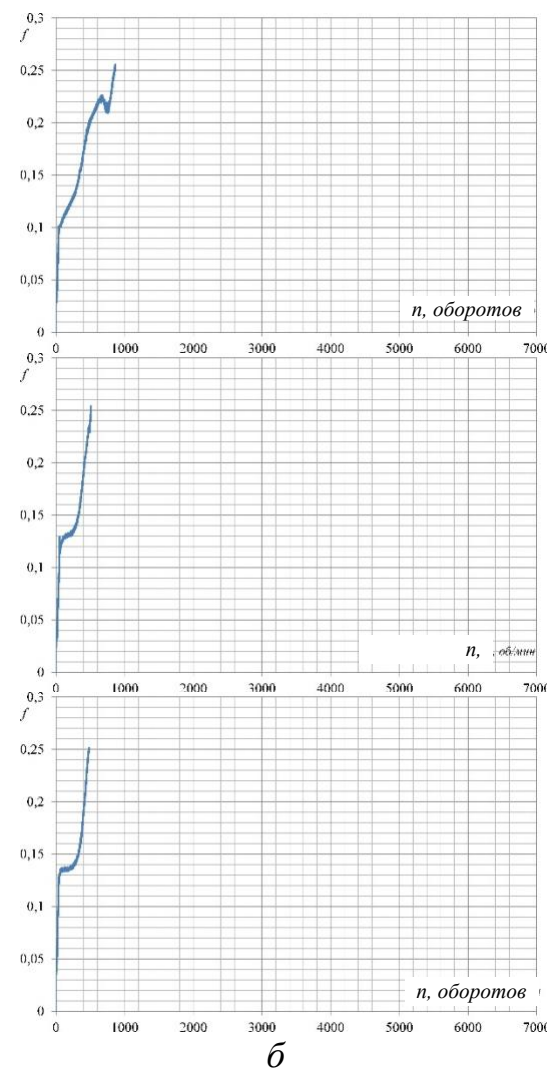
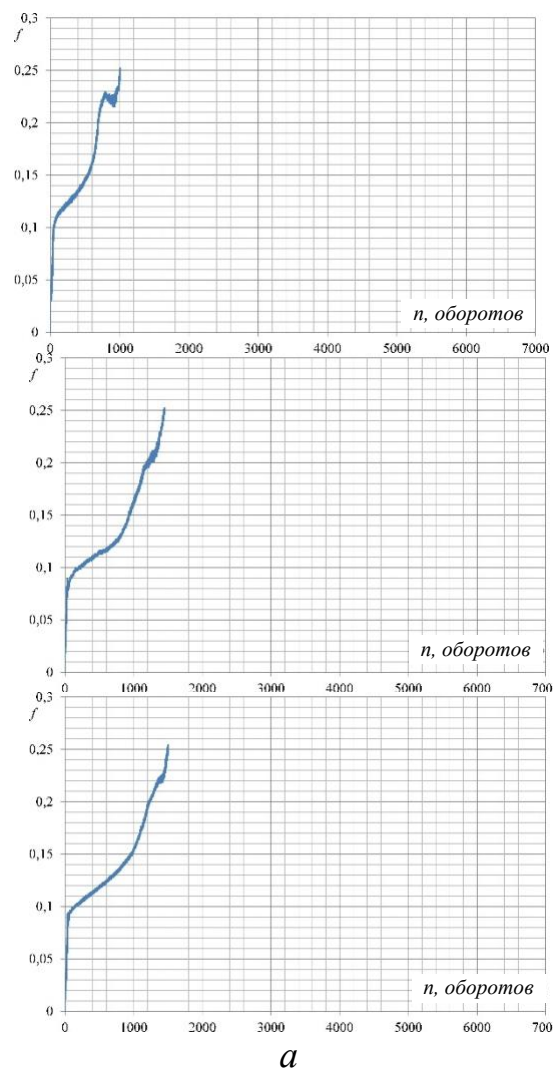


Рисунок 2.19 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 4 (*а*), № 5 (*б*), № 6 (*в*)

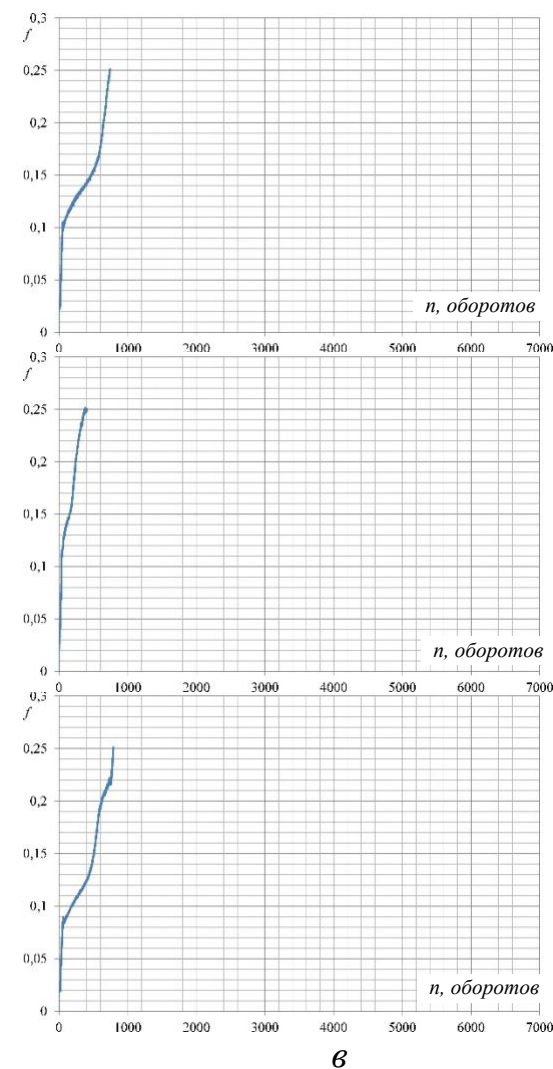
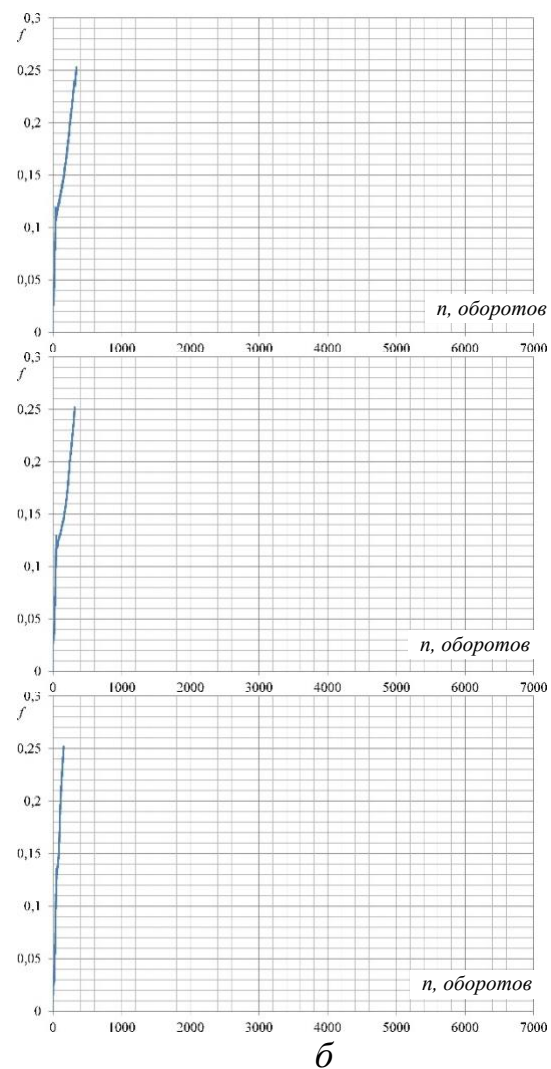
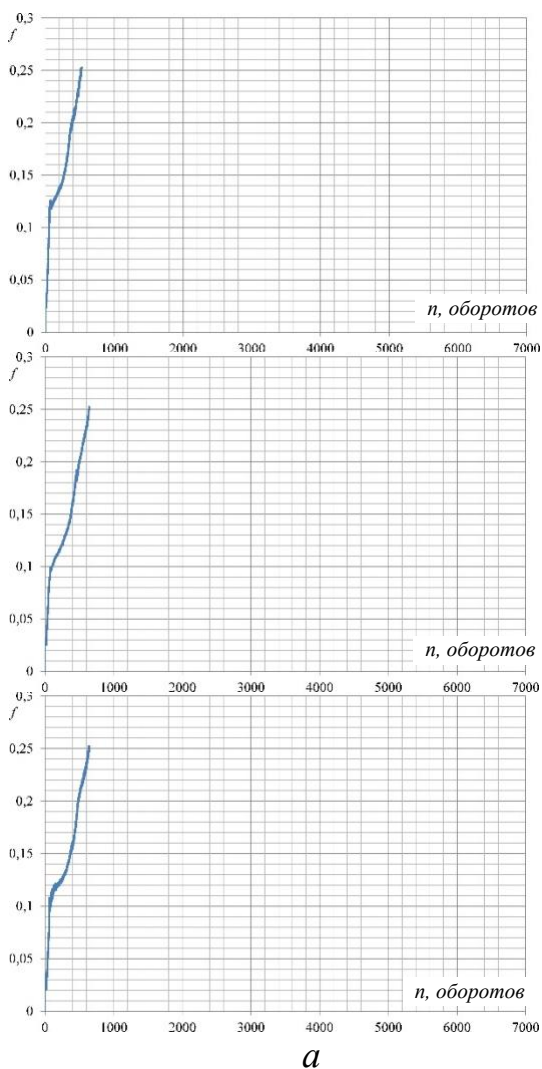


Рисунок 2.20 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 7 (а), № 8 (б), № 9 (в)

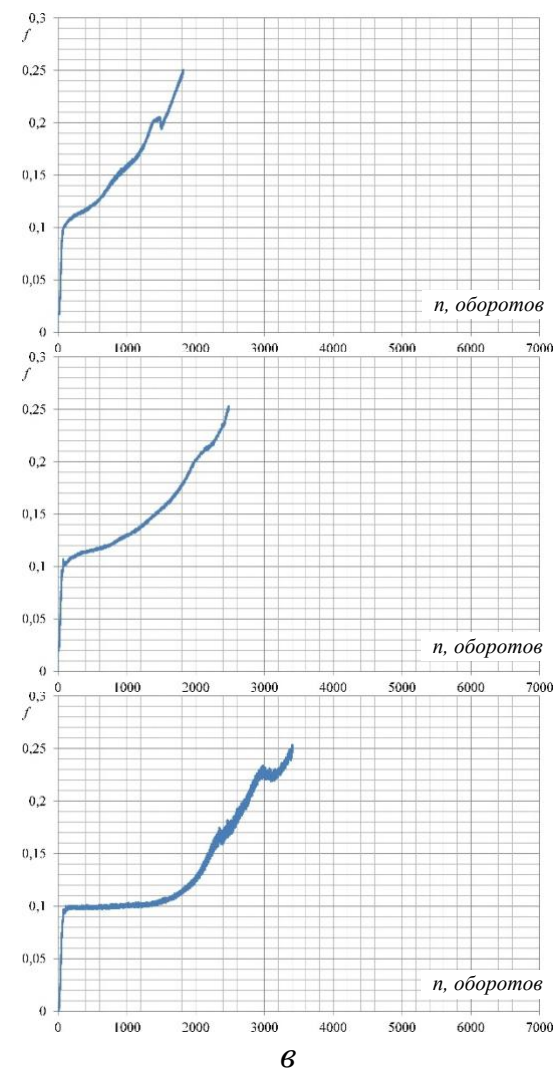
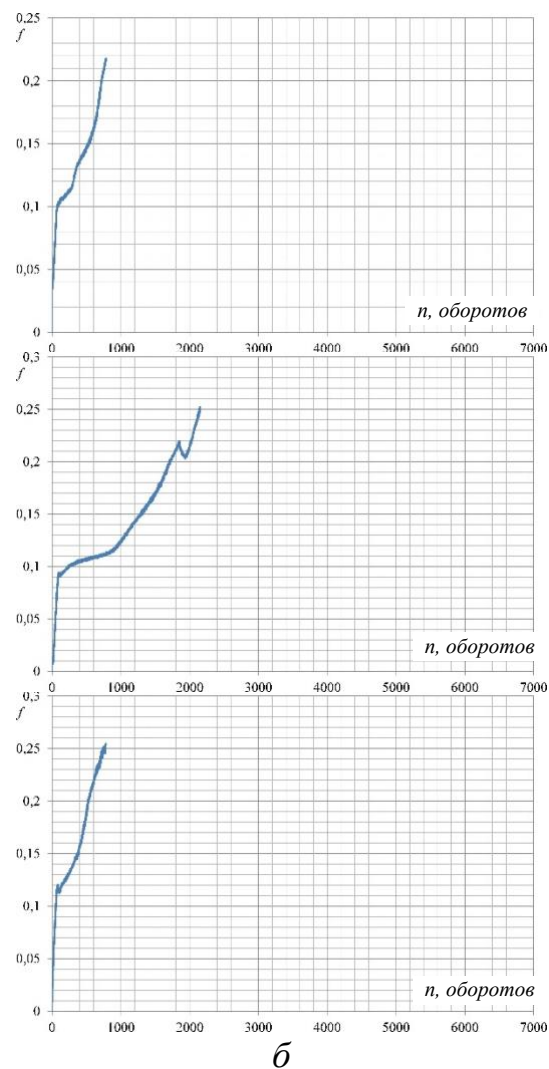
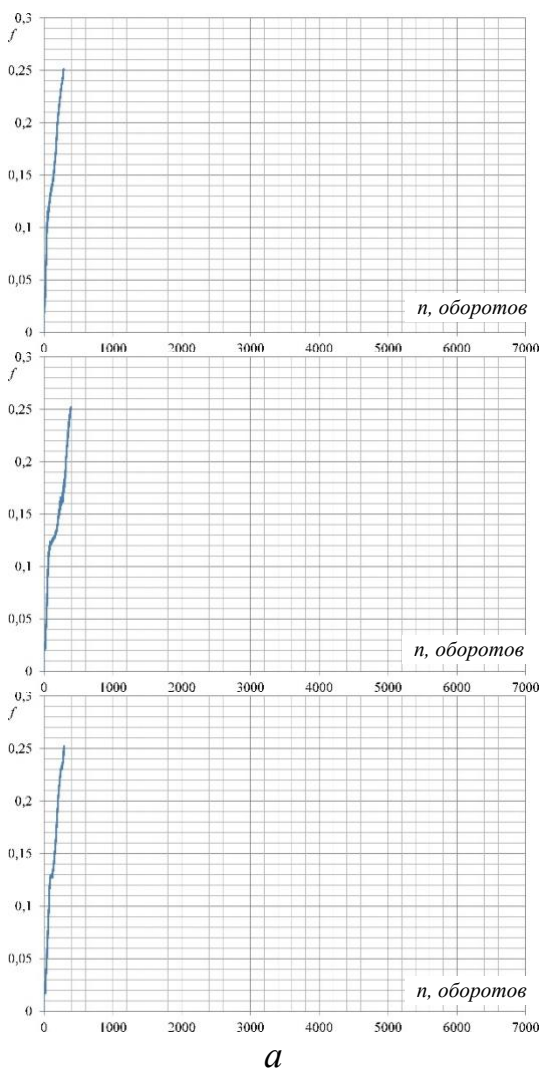


Рисунок 2.21 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 10 (а), № 11 (б), № 12 (в)

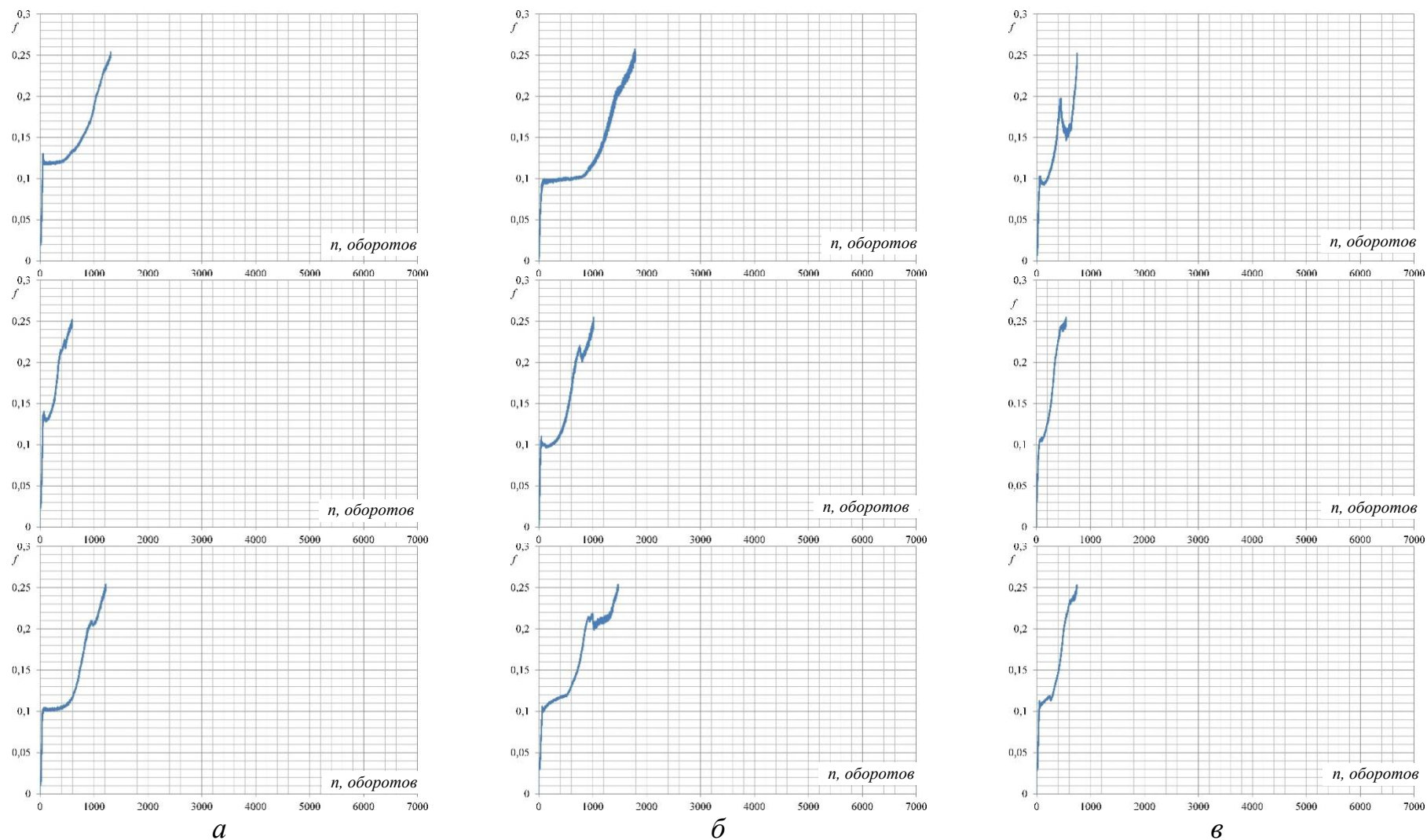


Рисунок 2.22 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 13 (a), № 14 ($б$), № 15 ($в$)

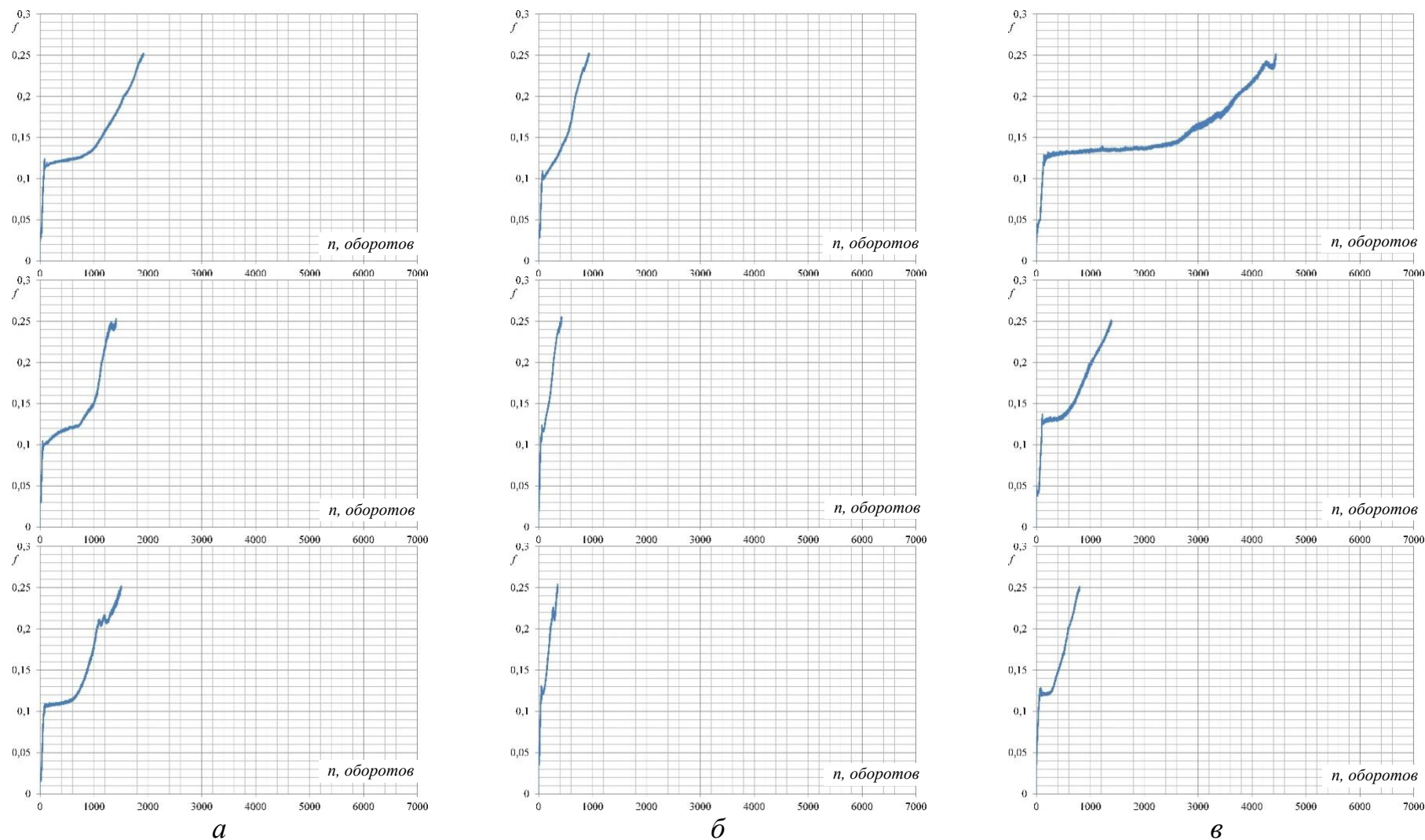


Рисунок 2.23 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 16 (*a*), № 17 (*б*), № 18 (*в*)

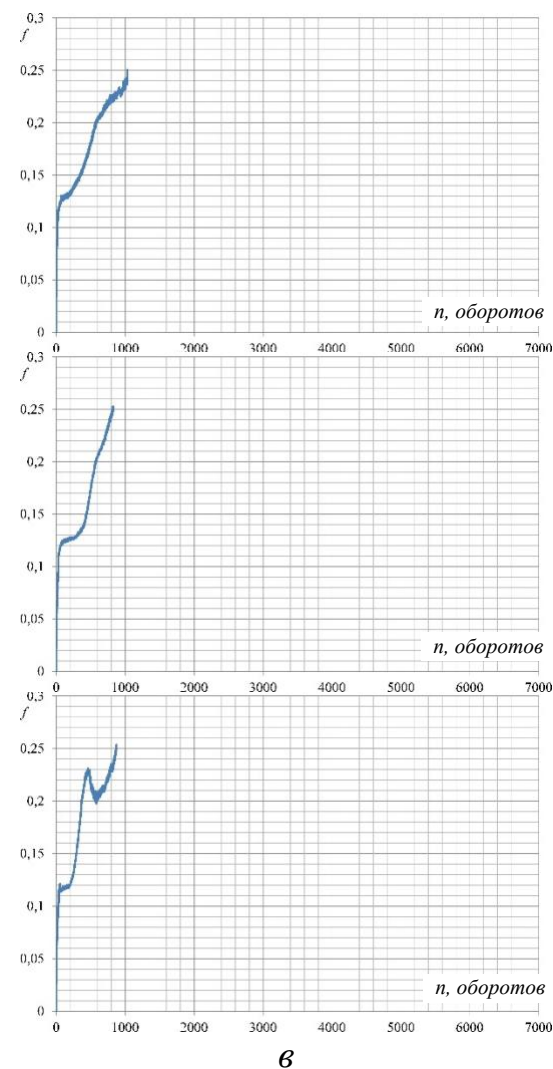
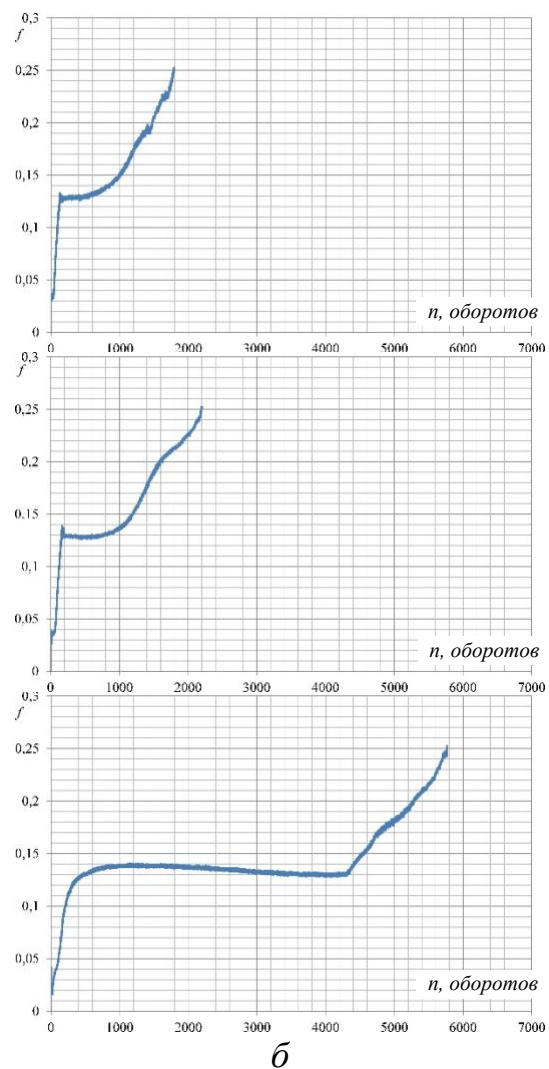
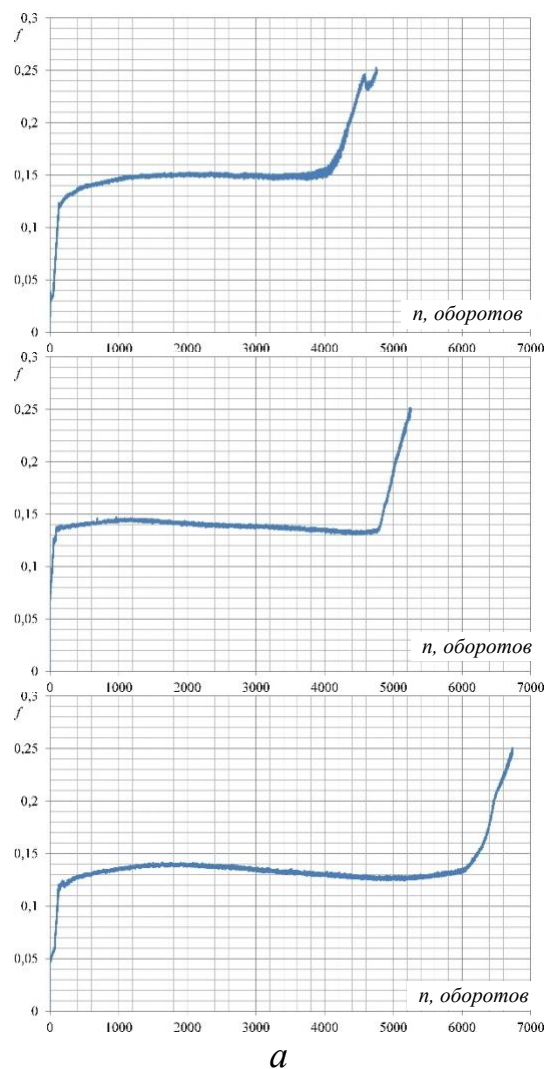


Рисунок 2.24 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 19 (а), № 20 (б), № 21 (в)

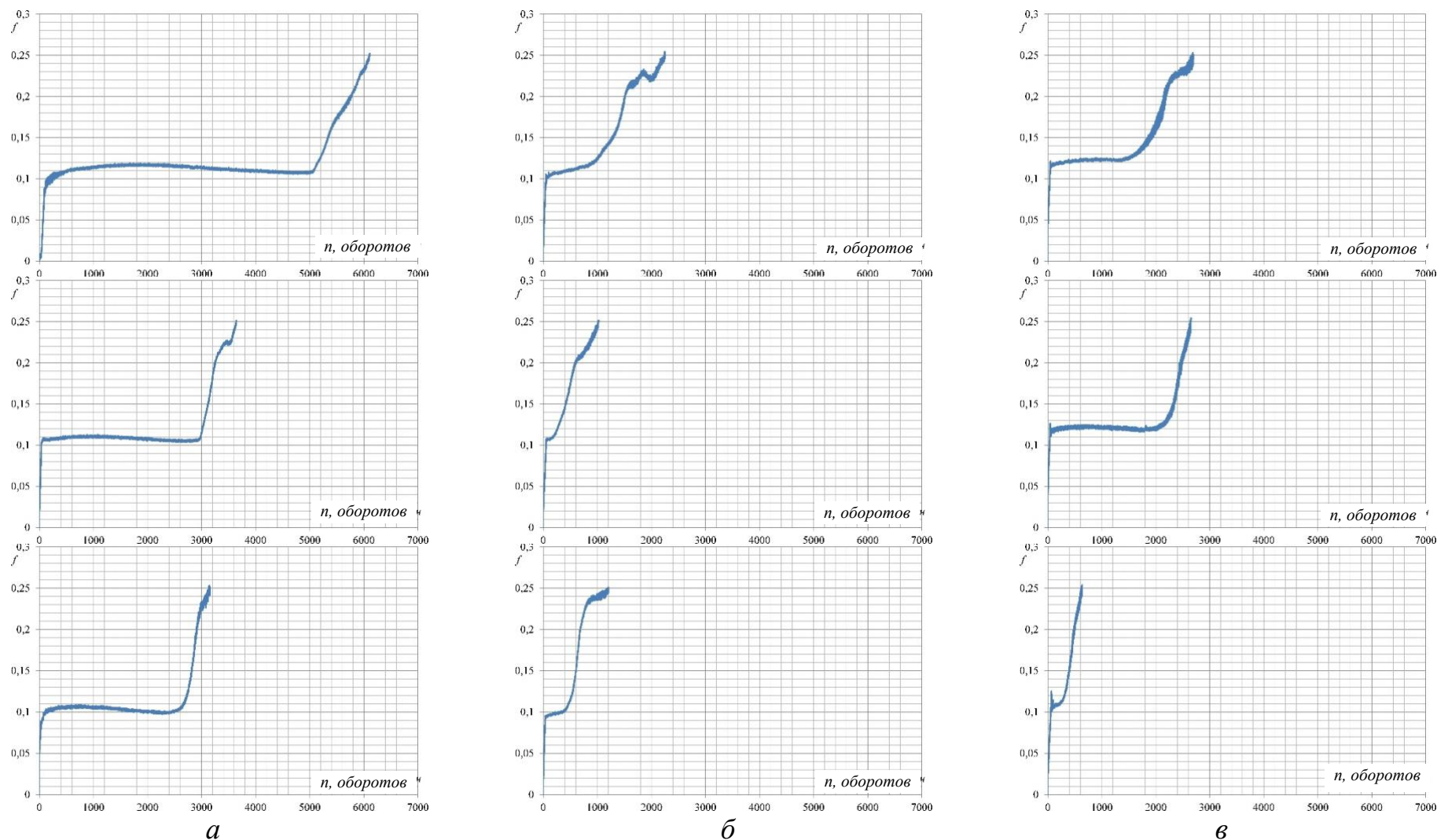


Рисунок 2.25 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 22 (а), № 23 (б), № 24 (в)

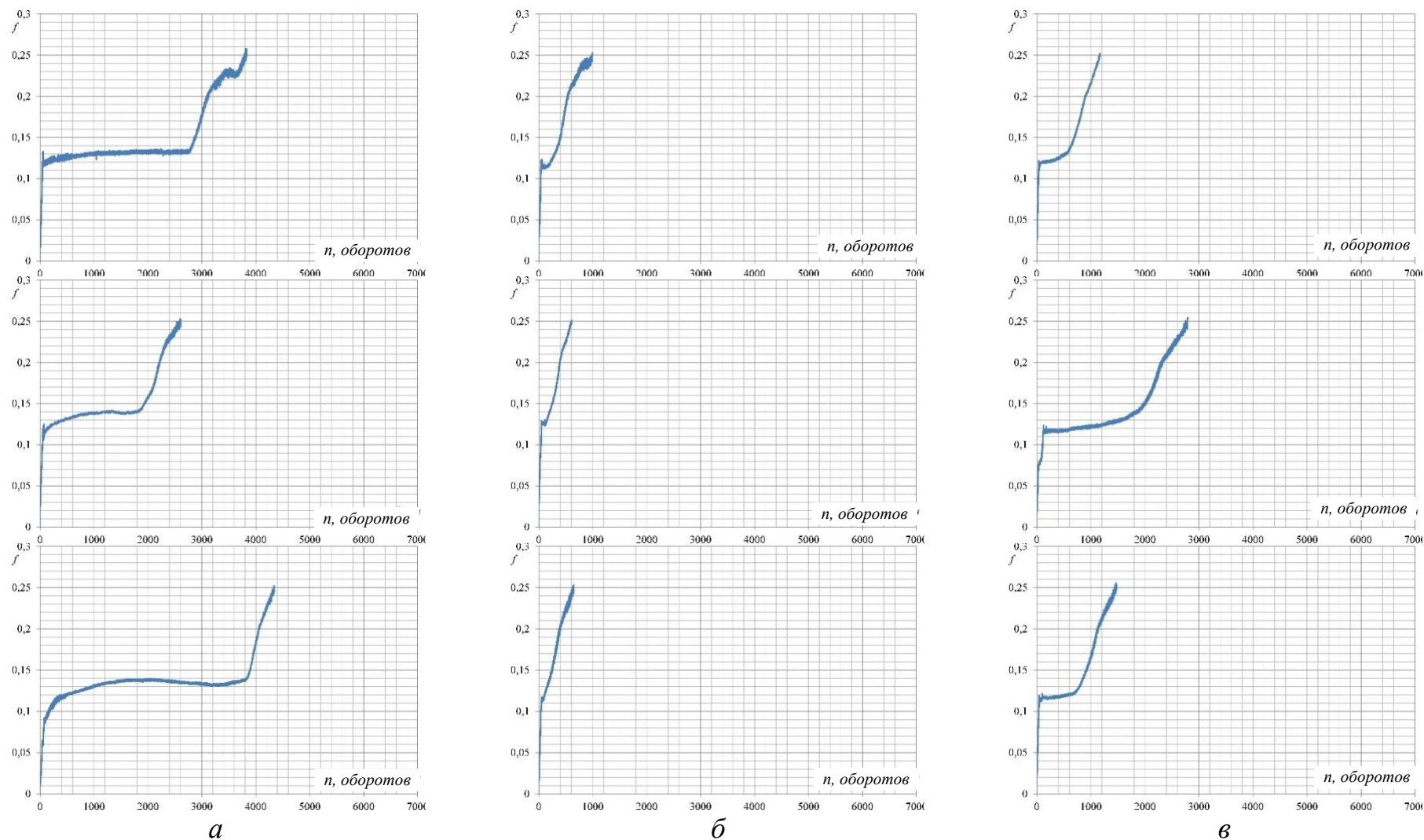


Рисунок 2.26 – Зависимость коэффициента трения от времени при испытаниях опытных образцов наноструктурированного смазочного материала № 25 (а), № 26 (б), № 27 (в)

2.2.4 Метод проведения лабораторных исследований опытных образцов по сравнению температурной стойкости

Зависимость реологических свойств смазочных материалов от температуры имеет существенное значение для их применения. Как правило, требуется, чтобы смазочные материалы сохраняли стабильность структуры, состояния и свойств во всем интервале рабочих температур, а также в условиях транспортировки и хранения. Большая часть накопленных к настоящему времени экспериментальных данных по реологическим свойствам смазочных материалов и влиянию состава и структуры на эти свойства выражена в температуре каплепадения.

Температура каплепадения является показателем температурной стойкости смазки. При достижении данной температуры, определяемой в лабораторных условиях, происходит падение первой капли смазки, нагреваемой в специальном приборе. Надёжное смазывание узлов трения обеспечивается при условии поддержания рабочей температуры узла на 15–20 °С ниже температуры каплепадения смазочного материала.

Показатели температурной стойкости опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения определялись согласно методу определения температуры каплепадения по ГОСТ 6793-74. Данный стандарт регламентирует методику определения температуры каплепадения для различных нефтепродуктов. Этот показатель определяется как температура, при которой нефтепродукт, размещённый в специальной чашечке измерительного прибора, теряет структурную устойчивость.

Принцип измерения базируется на фиксации двух критических моментов: либо падения первой капли расплавленного нефтепродукта, либо момента, когда образовавшийся столбик вещества касается дна измерительной пробирки. При этом образец подвергается нагреву в строго контролируемых условиях, что обеспечивает точность и воспроизводимость результатов.

Метод позволяет объективно оценить термостабильность материала и определить температурный предел, при котором нефтепродукт сохраняет свои функциональные свойства.

1 Аппаратура, материалы и реактивы

Для определения температуры каплепадения нефтепродуктов используется следующий набор оборудования и материалов:

В качестве измерительных приборов применяются термометры двух типов:

- термометры по ГОСТ 400-80 типа ТН-4, которые комплектуются латунными гильзами и чашечками;
- термометры группы 3 по ГОСТ 28498-90.

Измерительная посуда включает:

- стеклянные пробирки с диаметром 40–45 мм и длиной 180–200 мм;
- стаканы различных типов (В-1-1000 ТС, В-2-1000 ТС, Н-1-1000, 2000 ТС, Н-2-1000, 2000 ТС) по ГОСТ 25336-82;
- фарфоровые чашки четырех размеров: № 4 и № 5 для перемешивания нефтепродуктов, № 2 и № 3 для их охлаждения

Вспомогательное оборудование:

- кольцевая металлическая мешалка;
- секундомер или песочные часы на 1 минуту;
- электроплитка с закрытой спиралью или газовая горелка;
- лабораторный автотрансформатор;
- асбестированная сетка на треножнике или кольцо штатива;
- шпатель.

Расходные материалы и среды:

- дистиллированная вода по ГОСТ 6709-72;
- вазелиновое масло по ГОСТ 3164-78;
- глицерин по ГОСТ 6824-96;
- альтернативные бесцветные нетоксичные жидкости с температурой вспышки на 20–25 °С выше ожидаемой температуры каплепадения;

- воздушная баня (стакан В-1-2000 ТС или В-2-2000 ТС с вертикальной спиралью);
- лёд и снег для охлаждения.

Все перечисленные компоненты обеспечивают корректное проведение испытания в соответствии с установленными стандартами.

2 Подготовка эксперимента

2.1 Отбор проб

Процедура отбора проб начинается с удаления верхнего слоя образца нефтепродукта при помощи шпателя. Далее производится забор проб в трёх и более точках, расположенных на дистанции минимум 15 мм от краёв сосуда. Отобранные образцы объединяются в фарфоровой чашке с аккуратным перемешиванием для предотвращения появления пузырьков воздуха.

2.2 Подготовка образцов

Пластичные смазки после отбора внедряются шпателем в измерительную чашечку с особой осторожностью во избежание попадания воздуха. Заполненная чашечка очищается от излишков, после чего устанавливается в гильзу термометра с точным совмещением краёв. Выдавленный снизу продукт удаляется ножом.

2.3 Расплавление материалов производится следующим образом: углеводородные смазки, парафины, церезины и прочие твёрдые нефтепродукты нагреваются до температуры, превышающей их температуру каплепадения на 10–15 °С. Для синтетического церезина этот показатель составляет 20–30 °С.

Заполнение чашечки осуществляется капельным методом с использованием охлаждённой фарфоровой чашки со льдом. После 20-минутной выдержки чашечка монтируется в термометр, а излишки продукта удаляются.

2.4 Обработка твёрдых продуктов включает расплавление с последующим наливом в чашечку на ровную поверхность. После загустевания производится обрезка излишков, установка в термометр и охлаждение на льду.

2.5 Подготовка пробирки заключается в размещении на её дне бумажного кружка с плотным прилеганием. После этого осуществляется сборка измерительного комплекса.

3 Проведение испытания

3.1 Установка образца. Монтаж термометра производится через пробку в пробирку с соблюдением дистанции 25 мм от дна до края чашечки. При работе с высокотемпературными образцами учитывается поправка на выступающую ртуть.

Позиционирование пробирки осуществляется в термостойком стакане на асбестовой сетке с фиксацией в вертикальном положении. Уровень термостатирующей жидкости должен достигать 120–150 мм от дна.

3.2 Нагрев образца. Температурный режим предусматривает постепенный подъём температуры со скоростью 1 °С в минуту, начиная с отметки на 20 °С ниже ожидаемой температуры каплепадения. Для высокоплавких материалов допускается использование воздушной бани.

4 Обработка результатов

4.1 Фиксация показателей. Определение температуры каплепадения происходит по показаниям термометра в момент падения первой капли или контакта продукта с дном пробирки. При необходимости применяется корректировка на выступающую ртуть по специальной формуле.

5 Точность метода

5.1 Оценка результатов. Достоверность измерений (доверительная вероятность признается 95 %) подтверждается при соблюдении следующих условий:

- для одного исследователя – расхождение не более 2 °С;
- для разных лабораторий – соответствие графику допустимых отклонений (рисунок 2.27).

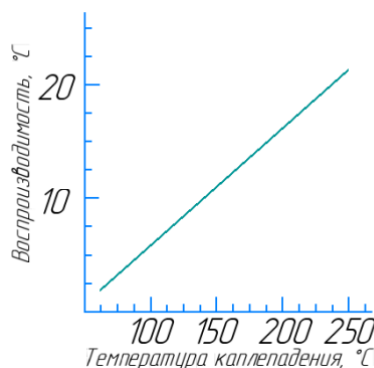


Рисунок 2.27 – График определения достоверности результатов испытаний, полученных в двух разных лабораториях

2.2.5 Лабораторные исследования опытных образцов по сравнению температурной стойкости

В рамках испытаний проведена оценка температурной стойкости 27 образцов наноструктурированного смазочного материала для тяжело нагруженных узлов трения. Результаты зафиксированы в протоколе испытаний и представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Результаты лабораторных исследований опытных образцов по сравнению температурной стойкости

Фактическое значение образца	Температура каплепадения $T_k, ^\circ\text{C}$	Фактическое значение образца	Температура каплепадения $T_k, ^\circ\text{C}$
Опытный образец № 1	152	Опытный образец № 15	>250
Опытный образец № 2	143	Опытный образец № 16	227
Опытный образец № 3	170	Опытный образец № 17	204
Опытный образец № 4	172	Опытный образец № 18	243
Опытный образец № 5	190	Опытный образец № 19	245
Опытный образец № 6	157	Опытный образец № 20	>250
Опытный образец № 7	169	Опытный образец № 21	>250
Опытный образец № 8	194	Опытный образец № 22	223
Опытный образец № 9	>250	Опытный образец № 23	>250
Опытный образец № 10	181	Опытный образец № 24	212
Опытный образец № 11	182	Опытный образец № 25	212
Опытный образец № 12	200	Опытный образец № 26	218
Опытный образец № 13	184	Опытный образец № 27	249
Опытный образец № 14	192		

2.3 Выводы по главе

Для создания высокоэффективного наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения необходимо осуществить ряд теоретических и эмпирических исследований. На данном этапе выполнения диссертационной работы были проведены экспериментальные и эксплуатационные сравнительные испытания разработанных ранее опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжелонагруженных узлов трения.

В процессе выполнения поставленной задачи были получены следующие результаты.

В качестве примера открытого тяжелонагруженного узла трения был выбран наиболее сложный и специфический с точки зрения условий эксплуатации контакт – «колесо – рельс», т. е. взаимодействие между гребнем железнодорожного колеса и боковой поверхностью головки рельса.

Анализ показал, что на работу смазочного материала воздействует множество различных факторов. Поскольку важно исследовать не только их индивидуальное влияние, но и взаимное воздействие, потребовалось провести обширную серию экспериментов.

Учитывая, сложность проведения объёмных натурных испытаний в условиях эксплуатации железнодорожного транспорта, невозможность оценки в этих условиях влияния некоторых факторов, а также значительное превышение стоимости эксплуатационных испытаний относительно лабораторных, было принято решение о проведении лабораторных исследований по сравнению трибологических характеристик, ресурса к истиранию и температурной стойкости опытных образцов наноструктурированного смазочного материала.

Для обеспечения идентичности основных выходных характеристик (вид износа и его интенсивность, коэффициент трения и его стабильность, трибологические характеристики, ресурс к истиранию смазочных материалов и т. д.) значениям на натурном объекте было проведено физико-математическое

моделирование с применением теории подобия и метода анализа размерности. В результате были получены масштабные коэффициенты перехода от «натуры» к модели, позволившие определить численные значения параметров, необходимых для проведения лабораторных исследований.

В процессе исследований было установлено, что применяемые до настоящего времени методы определения трибологических характеристик смазочных материалов были разработаны для жидких и пластичных смазочных материалов. Данные методы не учитывали особенности и специфику свойств твёрдых и твердопластичных смазочных материалов – покрытий (в частности, разрабатываемого наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения), и, соответственно, не предоставляли возможность оценить эффективность применения смазочных материалов данного класса.

В результате был разработан метод оценки трибологических и трибоспектральных характеристик, позволяющий объективно осуществить оценку эффективности применения смазочных материалов различного агрегатного состояния (жидких, пластичных, твёрдопластичных, твёрдых, покрытий и т. д.) с высоким уровнем точности и с учётом приближения условий испытаний к эксплуатационным особенностям работы, что, в свою очередь, позволит расширить номенклатуру и повысить качество смазочных материалов.

В ходе выполнения диссертации были проведены лабораторные исследования опытных образцов смазочных материалов по сравнению трибологических характеристик и ресурса к истиранию и температурной стойкости. Полученные результаты позволяют осуществить оптимизацию состава разрабатываемого наноструктурированного смазочного материала.

3 СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Оптимизация состава наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения

Для совершенствования рецептуры разрабатываемого смазочного материала мы применим методологию полного факторного эксперимента в соответствии с принципами теории планирования эксперимента.

В рамках статистического анализа математическое описание исследуемого процесса представляется через полиномиальную модель определённой степени. Данная модель является усечённым вариантом ряда Тейлора, который используется для разложения неизвестной функции [93]:

$$y = (x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2 + \dots,$$

где y – функция отклика;

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}, b_{iju}$ – оценки коэффициентов уравнения регрессии, характеризующие соответственно свободный член уравнения, линейные эффекты, эффекты парного взаимодействия, квадратичные эффекты и эффект тройного взаимодействия;

i – число факторов, $i = 1, 2, \dots, k$;

j, u – число сочетаний факторов;

x_i, x_j, x_u – варьируемые факторы.

В основе стратегии использования экспериментальных планов лежит поэтапное планирование. Процесс начинается с построения базовой модели первого порядка, для которой определяются коэффициенты и оценивается точность результатов.

Если достигнутая точность оказывается недостаточной, происходит последовательное усложнение как самого процесса планирования, так и

математической модели. Такой подход позволяет постепенно приближаться к оптимальной точности исследования.

Запишем уравнение регрессии для нашего случая при полном трёхфакторном эксперименте с тремя уровнями варьирования факторов (3^3) в виде полинома первой степени:

$$y = (x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{\substack{i,j,u=1 \\ i \neq j \neq u}}^k b_{iju} \cdot x_i \cdot x_j \cdot x_u.$$

Также уравнение регрессии первого порядка для нашего случая можно записать следующим образом:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3.$$

Запишем расширенную матрицу планирования (МПЭ) (см. таблицу 2.9) для нашего случая полного трёхфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования (3^3) с учётом результатов проведенных лабораторных исследований, а также с добавлением фиктивной переменной и дополнительных столбцов, учитывающих эффект двойного и тройного взаимодействия факторов (таблица 3.1).

Рассчитаем усреднённые показатели результатов параллельных экспериментов, используя соответствующую расчётную формулу для определения значений функции отклика:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^r y_{ui},$$

где u – порядковый номер опыта, $u = 1 \dots 27$;

r – число параллельных опытов, $r = 3$;

y_{ui} – результат опыта, экспериментальные значения коэффициента трения.

Сведём полученные значения в таблицу 3.1.

Выполним вычисление разброса результатов для серии параллельных экспериментов.

Таблица 3.1 – Расширенная матрица планирования

№ опыта/ образца	Натуральные значения входных факторов			Кодовые значения входных факторов								Выходной параметр оптимизации – ресурс работы СМ, тыс. об/г			
	SiO ₂ , %	C, %	MoS ₂ , %	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	y ₁	y ₂	y ₃	$\bar{y}$
1	4	10	1	1	–1	–1	–1	1	1	1	–1	385,67	346,75	465	399,14
2	4	10	5	1	–1	–1	0	1	0	0	0	1557	1211	1280	1349,33
3	4	10	9	1	–1	–1	1	1	–1	–1	1	483	414	268	388,33
4	4	15	1	1	–1	0	–1	0	1	0	0	503	362	750,5	538,5
5	4	15	5	1	–1	0	0	0	0	0	0	429,5	509	478	472,17
6	4	15	9	1	–1	0	1	0	–1	0	0	461,5	235,5	484	393,67
7	4	20	1	1	–1	1	–1	–1	1	–1	1	262,5	214,33	215	230,61
8	4	20	5	1	–1	1	0	–1	0	0	0	342	313	155	270
9	4	20	9	1	–1	1	1	–1	–1	1	–1	247,67	402	791	480,22
10	7	10	1	1	0	–1	–1	0	0	1	0	284	195	289	256
11	7	10	5	1	0	–1	0	0	0	0	0	977	1073	778	942,67
12	7	10	9	1	0	–1	1	0	0	–1	0	908	1237,5	853	995,5
13	7	15	1	1	0	0	–1	0	0	0	0	655	598	608	620,33
14	7	15	5	1	0	0	0	0	0	0	0	447,5	339	295,4	360,63
15	7	15	9	1	0	0	1	0	0	0	0	376	275,5	149	266,83
16	7	20	1	1	0	1	–1	0	0	–1	0	479,75	469,67	752,5	567,31
17	7	20	5	1	0	1	0	0	0	0	0	468,5	424	352	414,83
18	7	20	9	1	0	1	1	0	0	1	0	554,87	463,67	400	472,84
19	10	10	1	1	1	–1	–1	–1	–1	1	1	2381	2658	2244,67	2427,89
20	10	10	5	1	1	–1	0	–1	0	0	0	894,5	733,67	1153,4	927,9
21	10	10	9	1	1	–1	1	–1	1	–1	–1	516	415	436	455,83
22	10	15	1	1	1	0	–1	0	–1	0	0	1017,5	913,75	789	906,75
23	10	15	5	1	1	0	0	0	0	0	0	749,33	511	602,5	620,94
24	10	15	9	1	1	0	1	0	1	0	0	898	884	634	805,33
25	10	20	1	1	1	1	–1	1	–1	–1	–1	1277	869,33	1446,67	1197,67
26	10	20	5	1	1	1	0	1	0	0	0	995	625	644	754,67
27	10	20	9	1	1	1	1	1	1	1	1	583	697,75	736,5	672,42

Для каждого отдельного опыта построчная дисперсия рассчитывается согласно установленной формуле [93, 95, 98, 105]:

$$S_u^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{i=1}^r \Delta^2 = \frac{1}{f} \cdot \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2,$$

где f – число степеней свободы, $f = r - 1$;

$\Delta^2 = (y_{ui} - \bar{y}_u)^2$ – квадратичное отклонение для соответствующего опыта u и параллельного опыта i ;

$\sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2$ – суммарное квадратичное отклонение u опыта;

y_{ui} – значение отклика для опыта u в соответствующем параллельном опыте i ;

$\bar{y}_u$ – средний отклик в опыте u .

Степени свободы – это статистический параметр, который отражает количество независимых значений в выборке, способных изменяться без нарушения установленных ограничений. Он учитывает все факторы, которые могут влиять на вариативность случайных величин в исследовании.

Математически этот показатель определяется как разница между общим числом проведённых экспериментов и количеством вычисленных по их результатам констант (средних значений, коэффициентов и других показателей).

В рассматриваемом случае при $r = 3$ получаем $f_1 = 3 - 1 = 2$. С учётом этого значения можно преобразовать формулу дисперсии следующим образом:

$$S_u^2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^r \Delta^2 = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^r (y_{ui} - \bar{y}_u)^2.$$

Расчёт дисперсии выполняется индивидуально для каждого эксперимента (u -го опыта). Рассмотрим методику вычисления дисперсии на примере первого эксперимента:

$$\Delta_{11}^2 = (y_1 - \bar{y})^2 = (385,67 - 399,14)^2 = 181,44;$$

$$\Delta_{12}^2 = (y_2 - \bar{y})^2 = (346,75 - 399,14)^2 = 2744,71;$$

$$\Delta_{13}^2 = (y_3 - \bar{y})^2 = (465 - 399,14)^2 = 4337,54;$$

$$\bar{S}_1^2 = \frac{1}{3-1} \cdot (181,44 + 2744,71 + 4337,54) = 3631,85.$$

Результаты расчёта квадратичных отклонений и дисперсий параллельных опытов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные по вычислению квадратичных отклонений и дисперсий

№	$\Delta = y_{ui} - \bar{y}_u$			$\Delta^2 = (y_{ui} - \bar{y}_u)^2$			$\sum \Delta^2 = \sum (y_{ui} - \bar{y}_u)^2$	$\bar{S}_u^2$
	$y_1 - \bar{y}$	$y_2 - \bar{y}$	$y_3 - \bar{y}$	$(y_1 - \bar{y})^2$	$(y_2 - \bar{y})^2$	$(y_3 - \bar{y})^2$		
1	-13,47	-52,39	65,86	181,44	2744,71	4337,54	7263,69	3631,85
2	207,67	-138,33	-69,33	43125,44	19136,11	4807,11	67068,67	33534,33
3	94,67	25,67	-120,33	8961,78	658,78	14480,11	24100,67	12050,33
4	-35,5	-176,5	212	1260,25	31152,25	44944	77356,5	38678,25
5	-42,67	36,83	5,83	1820,44	1356,69	34,03	3211,17	1605,58
6	67,83	-158,17	90,33	4601,36	25016,69	8160,11	37778,17	18889,08
7	31,89	-16,28	-15,61	1016,91	264,97	243,7	1525,58	762,79
8	72	43	-115	5184	1849	13225	20258	10129
9	-232,55	-78,22	310,78	54081,05	6118,89	96582,14	156782,08	78391,04
10	28	-61	33	784	3721	1089	5594	2797
11	34,33	130,33	-164,67	1178,78	16986,78	27115,11	45280,67	22640,33
12	-91,5	238	-146,5	8372,25	56644	21462,25	86478,5	43239,25
13	34,67	-22,33	-12,33	1201,78	498,78	152,11	1852,67	926,33
14	86,87	-21,63	-65,23	7545,82	468	4255,39	12269,27	6134,6
15	109,17	8,67	-117,83	11917,36	75,11	13884,69	25877,17	12938,58
16	-87,56	-97,64	185,19	7666,17	9532,92	34296,57	51495,66	25747,83
17	53,67	9,17	-62,83	2880,11	84,03	3948,03	6912,17	3456,08
18	82,02	-9,18	-72,85	6727,83	84,21	5306,64	12118,68	6059,34
19	-46,89	230,11	-183,22	2198,67	52950,61	33569,59	88718,85	44359,43
20	-32,69	-193,52	226,21	1068,64	37449,99	51170,96	89689,59	44844,8
21	60,17	-40,83	-19,33	3620,03	1667,36	373,78	5661,17	2830,58
22	110,75	7	-117,75	12265,56	49	13865,06	26179,62	13089,81
23	128,39	-109,94	-18,44	16483,65	12087,76	340,19	28911,6	14455,8
24	92,67	78,67	-171,33	8587,11	6188,44	29355,11	44130,67	22065,33
25	79,33	-328,33	249,	6293,78	107803	62001,17	176097,94	88048,97
26	240,33	-129,67	-110,67	57760,11	16813,44	12247,11	86820,67	43410,33
27	-89,42	25,33	64,08	7995,34	641,78	4106,67	12743,79	6371,9

Суммарное значение дисперсии параллельных опытов $\sum \bar{S}_u^2 = 601088,57$

После вычисления построчных дисперсий следует этап проверки воспроизводимости экспериментальных данных, который проводится при наличии дублирующих опытов – это обязательное условие для любого спланированного эксперимента.

На данном этапе с помощью критерия Кохрена проверяется гипотеза о стабильности дисперсии шума. Результаты такой проверки помогают определить, является ли ряд дисперсий однородным или неоднородным. При однородности ряда все значения функции отклика (y) измеряются с одинаковой точностью, а при неоднородности точность определения этих значений будет различаться [93, 95, 98, 105].

Статистическая проверка гипотез базируется на сопоставлении расчётного критерия, полученного на основе экспериментальных данных, с его табличным значением при заранее установленном уровне значимости α .

Уровень значимости α отражает максимально допустимую вероятность ошибочного отклонения верной гипотезы, т. е. вероятность того, что полученный в ходе эксперимента результат может оказаться неверным.

В качестве примера можно привести часто используемый в технических расчётах уровень значимости 0,05, который подразумевает 5 %-ный риск принятия ошибочного решения и, соответственно, 95 %-ную уверенность в правильности выводов [93, 95, 98, 105].

При проверке статистических гипотез существует два возможных исхода:

Если значение критерия, полученное в результате эксперимента, оказывается в зоне, соответствующей заданному уровню значимости, это означает, что проверяемая гипотеза ошибочна и её необходимо отклонить. При этом вероятность совершения ошибки равна α .

В противоположном случае, когда экспериментальное значение попадает в область вероятности $(1-\alpha)$, гипотезу принимают. Однако здесь существует риск ошибки, связанный с альтернативной гипотезой.

Для оценки результатов используется расчётное значение критерия Кохрена, которое определяется по специальной формуле:

$$G_P = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2},$$

где $S_{u \max}^2$ – максимальная дисперсия ряда.

Из области полученных значений (см. таблицу 3.2) выделяем максимальную дисперсию по строке: $S_{u \max}^2 = 88048,97$, затем высчитываем расчётный критерий Кохрена:

$$G_P = \frac{88048,97}{601088,57} = 0,1465.$$

Рассчитанное значение критерия Кохрена сопоставляется с табличным значением, которое определяется по специальной таблице. При этом учитываются три параметра: уровень значимости α , число степеней свободы f и количество проведённых опытов n .

Результаты сравнения позволяют сделать вывод: при выполнении определённого условия ряд дисперсий считается однородным. В противном случае ряд дисперсий признаётся неоднородным.

При заданных параметрах (уровень значимости $\alpha = 0,05$, число степеней свободы $f = 2$, количество опытов $n = 27$) табличное значение критерия Кохрена составляет определённую величину.

Поскольку расчётное значение соответствует требуемым параметрам, гипотеза об однородности дисперсий для параллельных опытов считается подтверждённой.

Далее переходим к определению дисперсии, характеризующей воспроизводимость эксперимента:

$$S^2(y) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n S_u^2;$$

$$S^2(y) = \frac{1}{27} \cdot 601088,57 = 22262,54.$$

При этом средняя квадратическая ошибка эксперимента будет принимать значение:

$$S(y) = \sqrt{S^2(y)};$$

$$S(y) = \sqrt{22262,54} = 149,21.$$

Получение модели сводится к нахождению значений неизвестных коэффициентов составленного уравнения регрессии по результатам эксперимента:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3.$$

На основе описанного уравнения регрессии произведем расчёт коэффициентов по следующим формулам [93, 95, 98, 105]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n X_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^n X_{iu}^2}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n X_{iu} X_{ju} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^n (X_{iu} X_{ju})^2}, \quad b_{ijk} = \frac{\sum_{u=1}^n X_{iu} X_{ju} X_{ku} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^n (X_{iu} X_{ju} X_{ku})^2}.$$

Результаты расчёта коэффициентов уравнения регрессии сведём в таблицу 3.3.

По полученным значениям коэффициентов регрессии составляется искомое уравнение, решение которого позволит определить влияния рассматриваемых факторов на выходной параметр y . С учётом найденных коэффициентов основное уравнение регрессии для нашего случая будет выглядеть следующим образом:

$$y = 673,76 + 235,93 \cdot X_1 - 171,41 \cdot X_2 - 122,73 \cdot X_3 - 2,52 \cdot X_1 \cdot X_2 - 224,39 \cdot X_1 \cdot X_3 + \\ + 72,4 \cdot X_2 \cdot X_3 + 148,3 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Проведём анализ статистической значимости коэффициентов регрессии. Важно понимать, что полученные коэффициенты определяются не абсолютно точно, а с определённой погрешностью. Степень этой погрешности характеризуется дисперсией оценок коэффициентов.

Погрешность в определении коэффициентов регрессии возникает из-за естественных колебаний значений функции отклика при повторении экспериментов в рамках каждого опыта.

Особую важность представляет ситуация, когда коэффициенты имеют малые значения — в этом случае абсолютная погрешность их определения может существенно превышать допустимые пределы из-за неточности в измерении функции отклика. При выявлении такой ситуации коэффициент признаётся статистически незначимым и исключается из регрессионной модели, поскольку его влияние на исследуемый процесс фактически отсутствует.

Таблица 3.3 – Коэффициенты уравнения регрессии, дисперсии коэффициентов, средние квадратические ошибки эксперимента и доверительные интервалы

Коэффициенты		Дисперсии коэффициентов		Средние квадратические ошибки эксперимента		Доверительные интервалы		Статистическая значимость коэффициентов
обозначение	значение	обозначение	значение	обозначение	значение	обозначение	значение	
b_0	673,76	$S^2(b_0)$	10,18	$S(b_0)$	3,191	Δb_0	6,50964	Значим
b_1	235,93	$S^2(b_1)$	412,27	$S(b_1)$	20,304	Δb_1	41,42016	Значим
b_2	–171,41	$S^2(b_2)$	412,27	$S(b_2)$	20,304	Δb_2	41,42016	Значим
b_3	–122,73	$S^2(b_3)$	412,27	$S(b_3)$	20,304	Δb_3	41,42016	Значим
b_{12}	–2,516	$S^2(b_{12})$	618,4	$S(b_{12})$	24,868	Δb_{12}	50,73072	Не значим
b_{13}	–224,39	$S^2(b_{13})$	618,4	$S(b_{13})$	24,868	Δb_{13}	50,73072	Значим
b_{23}	72,44	$S^2(b_{23})$	618,4	$S(b_{23})$	24,868	Δb_{23}	50,73072	Значим
b_{123}	148,3	$S^2(b_{123})$	927,61	$S(b_{123})$	30,457	Δb_{123}	62,13228	Значим

Для оценки значимости коэффициентов необходимо рассчитать дисперсию их оценок, используя соответствующую формулу:

$$S^2(b_i) = \frac{S^2(y)}{r \cdot \sum_{u=1}^n X_{iu}^2}.$$

На основе вычисленных значений дисперсий коэффициентов регрессионного уравнения выполним расчёт средних квадратических ошибок эксперимента. Данный показатель позволяет оценить точность проведённых измерений и надёжность полученных результатов исследования:

$$S(b_i) = \sqrt{S^2(b_i)}.$$

Полученные значения дисперсий коэффициентов уравнения регрессии и средние квадратические ошибки эксперимента представлены в таблице 3.3.

Выполним вычисление доверительного интервала для коэффициентов регрессионного уравнения с использованием соответствующей формулы. Этот интервал позволит определить диапазон значений, в котором с заданной вероятностью находятся истинные значения коэффициентов регрессии, что важно для оценки точности построенной математической модели:

$$\Delta b_i = t \cdot S(b_i),$$

где t – t-критерий Стьюдента для дисперсионного анализа эксперимента с параметрами уровня значимости α и степеней свободы f_2 :

$$f_2 = (r - 1) \cdot n = (3 - 1) \cdot 27 = 54.$$

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $f_2 = 54$, из таблицы [93, 95, 98, 105] находим табличное значение t-критерия Стьюдента – $t(0,05;54) = 2,04$.

Далее вычисляем доверительный интервал для коэффициентов регрессии и оформляем результаты в таблице 3.3.

Коэффициенты регрессионного уравнения считаются статистически значимыми, если их абсолютное значение не меньше доверительного интервала.

$$|b_i| \geq \Delta b_i.$$

Статистическая значимость коэффициентов регрессии определяется тем, что их абсолютные значения должны превосходить абсолютную ошибку определения как минимум в t раз.

Удовлетворительную точность оценки демонстрируют следующие коэффициенты: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{13}, b_{23}$ и b_{123} .

Коэффициент b_{12} не обладает статистической значимостью и должен быть исключён из модели из-за недостоверности его значения.

После подстановки значимых коэффициентов формируется итоговое уравнение регрессии:

$$y = 673,76 + 235,93 \cdot X_1 - 171,41 \cdot X_2 - 122,73 \cdot X_3 - 224,39 \cdot X_1 \cdot X_3 + 72,4 \cdot X_2 \cdot X_3 + 148,3 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Чтобы вычислить расчётное значение параметра оптимизации (ресурса однократного нанесения смазочного материала), следует последовательно подставить кодовые значения изменяемых факторов в полученное уравнение регрессии. При этом важно соблюдать порядок, указанный в матрице плана эксперимента.

Результаты вычислений выходного параметра оптимизации, выполненные на основе уравнения, сведены в таблицу 3.4.

После этого необходимо проверить, насколько полученная регрессионная модель соответствует экспериментальным данным. Для проверки гипотезы об адекватности модели требуется проанализировать расхождения между расчётными значениями уравнения регрессии и фактическими результатами опытов в разных точках факторного пространства.

Степень разброса экспериментальных точек относительно линии отклика, которая описывает функциональную зависимость, можно оценить через показатель остаточной дисперсии адекватности. Данный показатель применим в случае, когда количество повторных (дублирующих) опытов одинаково.

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{r}{n - \lambda} \cdot \sum \Delta_{\text{ад}}^2 = \frac{r}{n - \lambda} \cdot \sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2,$$

где r – число параллельных (дублирующих) опытов;

n – общее число опытов эксперимента;

λ – число значимых коэффициентов аппроксимирующего полинома, включая свободный член;

$\sum \Delta_{\text{ад}}^2 = \sum (\bar{y} - \hat{y})^2$ – суммарное квадратичное отклонение опытов (по таблице 3.4) и определяется числом степеней свободы:

$$f_{\text{ад}} = n - \lambda,$$

где $f_{\text{ад}}$ – количество степеней свободы для дисперсии адекватности рассчитывается путём вычитания числа коэффициентов уравнения регрессии из общего количества различных экспериментальных испытаний (n), результаты которых были задействованы при вычислении коэффициентов регрессии.

Таблица 3.4 – К расчёту дисперсии адекватности и множественного коэффициента корреляции

№	Средний отклик $\bar{y}$	Расчётный отклик $\hat{y}$	Отклонение $\Delta_{\text{ад}} = \bar{y} - \hat{y}$	Квадратичное отклонение $\Delta_{\text{ад}}^2 = (\bar{y} - \hat{y})^2$
1	399,14	431,72	–32,584	1061,717
2	1349,33	609,24	740,092	547736,168
3	388,33	786,76	–398,425	158742,481
4	538,5	336,18	202,322	40934,192
5	472,17	437,83	34,332	1178,686
6	393,667	539,49	–145,825	21264,931
7	230,61	240,63	–10,02	100,4
8	270	266,43	3,571	12,752
9	480,22	292,23	187,997	35342,872
10	256	1040,34	–784,343	615193,942
11	942,67	845,17	97,497	9505,665
12	999,5	650	349,503	122152,347
13	620,33	796,5	–176,165	31034,107
14	360,63	673,76	–313,131	98051,023
15	266,83	551,03	–284,197	80767,935
16	567,31	552,65	14,655	214,769
17	414,83	502,36	–87,524	7660,451
18	472,85	452,06	20,785	432,016
19	2427,89	1648,96	778,929	606730,387
20	927,19	1081,1	–153,909	23687,98
21	455,83	513,24	–57,403	3295,104
22	906,75	1256,82	–350,068	122547,605
23	620,94	909,7	–288,748	83375,408
24	805,33	562,57	242,766	58935,331
25	1197,67	864,67	332,993	110884,338
26	754,67	738,29	16,381	268,337
27	672,42	611,9	60,519	3662,549
Суммарное значение квадратичного отклонения дисперсии адекватности опытов				$\sum \Delta_{\text{ад}}^2 = 2784773,5$

В нашем случае:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{3}{27-7} \cdot (2784773,5) = 417716;$$

$$f_{\text{ад}} = 27 - 7 = 20.$$

После того как коэффициенты модели были вычислены, первоочередной задачей становится оценка того, насколько хорошо модель отражает исследуемый физический процесс – иными словами, проверка её адекватности.

Для проверки адекватности окончательного уравнения регрессии применялся F-критерий (критерий Фишера). Суть метода заключается в анализе соотношения между дисперсией адекватности и дисперсией воспроизводимости эксперимента.

Вычисление расчётных значений F-критерия осуществлялось через определённое соотношение показателей.

$$F_p = \frac{S_6^2}{S_m^2},$$

где S_6^2 – большее значение из рассмотренных дисперсий;

S_m^2 – меньшее значение из рассмотренных дисперсий.

Основное преимущество критерия Фишера заключается в простоте его применения: проверка гипотезы сводится к сопоставлению полученного значения с табличным показателем.

Если вычисленный показатель F-критерия оказывается меньше или равен табличному значению, модель можно с определённой степенью достоверности считать адекватной. При таком результате становится возможным приступить к поиску точки экстремума методом крутого восхождения.

В рассматриваемом примере мы имеем дело с двумя дисперсиями, причём одна из них больше другой. Соответственно за большую дисперсию принимается именно большее значение. В этом случае:

$$F_p = \frac{S^2(y)}{S_{\text{ад}}^2} = \frac{601088,6}{417716} = 1,439.$$

Чтобы подтвердить гипотезу адекватности модели, необходимо определить критическую точку с помощью таблицы распределения Фишера.

Для этого мы обращаемся к таблице критических значений и находим соответствующее значение, которое позволит нам сделать вывод о пригодности модели для описания исследуемого процесса:

$$F_{\text{кр}}(\alpha; f_1; f_2),$$

где α – уровень значимости, $\alpha = 0,05$;

$f_1 = f_E$ – число степеней свободы большей дисперсии (средней дисперсии),

$$f_E = n \cdot (r - 1) = 27 \cdot (3 - 1) = 54;$$

$f_2 = f_{\text{ад}}$ – число степеней свободы меньшей дисперсии (адекватности модели), по формуле $f_{\text{ад}} = n - \lambda = 27 - 7 = 20$.

$$F_{\text{кр}}(0,05; 54; 20) \cong 1,97.$$

Результаты сопоставления расчётного значения F-критерия с его табличным аналогом продемонстрировали следующее:

$$F_{\text{кр}} = 1,97 > F_p = 1,439,$$

это подтверждает корректность построенной математической модели (уравнения регрессии) и её соответствие реальным данным исследования. Иными словами, полученная модель достоверно отражает исследуемый процесс и может быть использована для дальнейших расчётов и прогнозирования.

После преобразования кодовых значений в натуральные величины был определён следующий оптимальный состав компонентов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения, которому соответствует максимальный ресурс работы смазочного материала (2 427 890 оборотов/г): концентрация диоксида кремния – 10 %, графита – 10 %, дисульфида молибдена – 1 %, остальное – битум.

На графике (рисунок 3.1) представлены поверхности отклика и линии равного уровня в трёх плоскостях факторного пространства: в плоскости факторов X_1 – X_2 , в плоскости факторов X_1 – X_3 и в плоскости факторов X_2 – X_3 . Эти

визуальные материалы наглядно демонстрируют характер парного взаимодействия между исследуемыми факторами.

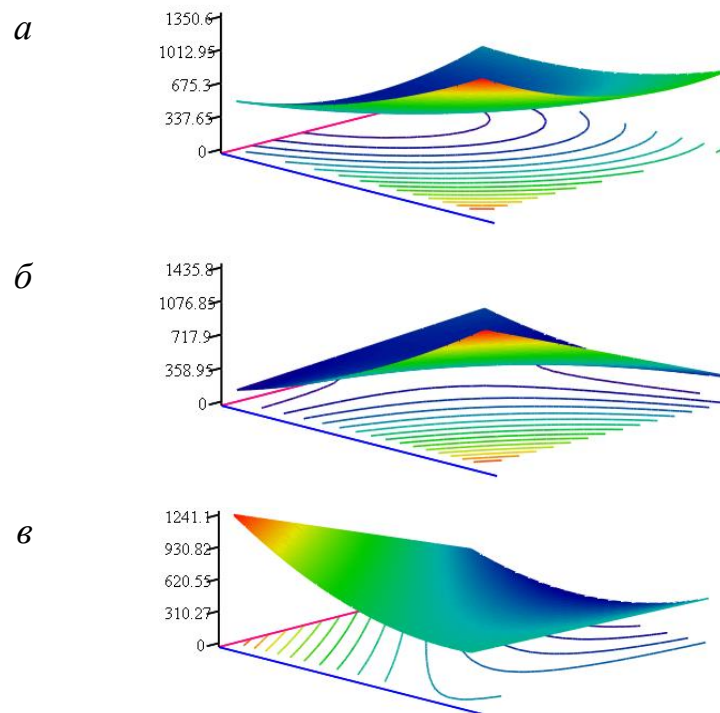


Рисунок 3.1 – Влияние парного взаимодействия факторов на целевую функцию y : *a* – X_1X_2 ; *б* – X_1X_3 ; *в* – X_2X_3

3.2 Выводы по главе

В ходе проведения статистической обработки результатов экспериментальных исследований с применением теории планирования эксперимента и метода полного факторного эксперимента было получено уравнение регрессии, коэффициенты которого характеризуют степень влияния входных факторов (концентрация компонентов смазочного материала) на выходной параметр оптимизации (ресурс работы смазочного материала при разовом нанесении). Анализ данного уравнения позволяет сделать следующие выводы:

1 Эффект тройного взаимодействия всех компонентов положителен и способствует повышению ресурса работы смазочного материала.

2 Наибольшее влияние на ресурс работы смазочного материала оказывают концентрация диоксида кремния и эффект парного взаимодействия диоксида кремния с дисульфидом молибдена.

3 Наименьшее влияние на ресурс работы смазочного материала оказывает парное взаимодействие графита и дисульфида молибдена.

4 В исследуемом диапазоне концентраций компонентов ресурс работы смазочного материала имеет максимальное значение 2 427 890 об/г при следующей концентрации компонентов: диоксид кремния – 10 %, графит – 10 %, дисульфид молибдена – 1 %, остальное – битум. Данный состав принимается за оптимальный.

4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОТКРЫТЫХ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Следует учитывать, что физико-химические, механические и эксплуатационные свойства смазочных материалов определяются не только типом и концентрацией подобранных компонентов, но и условиями технологического процесса изготовления смазочного материала.

Процесс добавления различных присадок и наполнителей при производстве смазочных материалов требует тщательного подхода и не допускает произвольных решений.

В каждом конкретном случае важно провести детальный расчёт и определить наилучшие условия, принимая во внимание характеристики дисперсионной среды, свойства дисперсной фазы, особенности самой добавки и параметры их возможных комбинаций.

Такой комплексный подход позволяет достичь оптимальных результатов при создании смазочных материалов [82].

4.1 Этапы изготовления наноструктурированного материала

Процесс изготовления наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения состоит из следующих основных стадий:

- подготовка сырья и дозирование исходных материалов;
- получение жидкой базы;
- смешивание компонентов;
- тепловое диспергирование добавок;
- гомогенизация смазочного материала;
- придание формы;
- охлаждение смазочного материала.

Стадия подготовки сырья заключается в подготовительной фильтрации, дозировании исходных материалов и получении жидкой базы нужного свойства. Дозирование материалов осуществляется путём взвешивания компонентов с применением весового оборудования (например, весы электронного типа WA-35 и ВЛК-500г). Для получения жидкой основы в реактор-мешалку с внешним обогревом загружают расчётное количество дисперсионной среды (основы) и нагревают до температуры на 15–20 °С выше температуры плавления.

Затем, на стадии смешения компонентов, при постоянном перемешивании и постоянной температуре в реактор подают небольшими порциями расчётное количество загустителя (дисперсной фазы) и тщательно перемешивают. В процессе производства происходит растворение твёрдой фазы в жидкой основе, что приводит к формированию коллоидных систем.

Ключевую роль в этом процессе играет тепловое диспергирование, которое значительно интенсифицируется при активном перемешивании компонентов.

Диспергирование неорганических загустителей в базовой основе осуществляется преимущественно за счёт энергичного механического перемешивания при температурном режиме от 80 до 100 градусов Цельсия.

Завершающим этапом является постепенное введение предварительно рассчитанного количества наполнителей в готовый диспергированный смазочный материал.

В процессе изготовления наноструктурированного смазочного материала после стадии теплового диспергирования (по окончании загрузки всех компонентов) следует стадия гомогенизации смазочного материала. Во время данной стадии в результате интенсивного механического воздействия на смазочный материал происходит формирование его структуры. С целью гомогенизации смесь в реакторе тщательно перемешивают в течение 20–25 минут до равномерного распределения компонентов и приобретения смазочным материалом однородного состояния и равномерной окраски.

Формирование цилиндрической формы продукта (с параметрами: длина 220 мм, диаметр 20 мм) осуществляется с помощью гидравлической системы. Процесс

включает продавливание подготовленных смесей через специальную фильеру, расположенную в цилиндрическом патрубке.

Финальная стадия производства – остывание и кристаллизация – играет решающую роль в формировании структуры смазочного материала. Особое значение имеет скорость охлаждения, напрямую влияющая на эксплуатационные свойства готового продукта.

В ходе охлаждения расплавленного состава имеют место два взаимосвязанных процесса: образование и развитие кристаллических структур (волокон) и их последующее объединение в единый структурный каркас смазочного материала.

Характеристики волокон (размер и форма) определяются двумя ключевыми параметрами: начальной температурой и скоростью охлаждения. При быстром охлаждении формируются мелкие волокна загустителя, при медленном – более крупные.

Изотермический режим охлаждения (при постоянной температуре) способствует образованию кристаллов равномерного размера, что приводит к формированию более упорядоченной структуры смазочного материала.

Для создания большей прочности смазочного материала, применяемого в тяжелонагруженных узлах трения, необходим быстрый способ охлаждения расплава.

Время полного застывания смазочного материала составляет 2–3 часа.

На сегодняшний день в производстве и технике эксплуатируется огромное количество машин и механизмов, в которых используются открытые тяжелонагруженные узлы трения, требующие особого вида обслуживания, а в частности – постоянного присутствия смазочного материала в зоне фрикционного контакта, определённого способа подачи и нанесения смазочного материала с конкретными свойствами и т. д. В железнодорожной отрасли и метрополитене к наиболее уязвимым узлам трения с высокой нагрузкой относится контакт между колёсными парами подвижного состава и верхним строением пути.

4.2 Технология подачи смазки в зону контакта

Именно взаимодействие колёс и рельсов лежит в основе передвижения поездов, определяя не только безопасность движения, но и ключевые показатели эффективности: грузоподъёмность составов, скорость передвижения и размер эксплуатационных затрат.

Колёсные пары представляют собой критически важные элементы ходовой части, от работоспособности которых зависит эффективность всей железнодорожной техники. В процессе движения происходит трение между гребнями колёсных пар и боковыми поверхностями рельсов в зоне контакта.

Данное трение провоцирует активный износ как колёсных гребней, так и рельсов, что несёт ряд негативных последствий. Создаются риски для безопасности движения, повышается сопротивление при движении, увеличивается расход топлива и электроэнергии (на 10–15 % при тяге поезда), растёт объём эксплуатационных затрат, и требуются значительные вложения в ремонт и замену изношенных узлов.

В связи с этим приоритетной задачей становится обеспечение надёжного антифрикционного взаимодействия между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса.

Наиболее эффективным и оперативным способом снижения трения между гребнями бандажей колёсных пар и боковой поверхностью головки рельса является лубрикация – процесс подачи смазочных материалов в зону контакта.

Применение лубрикации обеспечивает множество положительных эффектов: существенно снижается сопротивление движению железнодорожного состава, сокращается потребление топливно-энергетических ресурсов при тяге, увеличивается срок службы колёс и рельсов, минимизируется риск подъёма колеса на головку рельса, а также улучшаются экологические показатели, в частности, снижается уровень шума на железнодорожных путях.

В современной практике железнодорожного транспорта применяются разнообразные смазочные материалы, различающиеся по составу, физическому

состоянию (от жидких до твёрдых) и эксплуатационным характеристикам. Для лубрикации контакта гребня колеса с боковой поверхностью рельса активно используются такие составы, как КР-400, Пума-МР, Пума-МГ, Пума-МЛ, СРК, РС-6 «В», РС-6 «Ву», СПЛ, РАПС-2 и СС-1.

Характеристики выбранного смазочного материала определяют специфические требования к технологии его нанесения и конструкции смазывающего устройства. Главная задача такого устройства – обеспечить надёжную подачу смазочного материала в зону трения в процессе эксплуатации.

В настоящее время в качестве технических средств подачи смазочного материала используют системы форсуночного бесконтактного типа, использующие жидкий, гелеобразный или консистентный смазочный материал. Однако при эксплуатации данных устройств возникают существенные проблемы, обусловленные, в частности, неконтактным способом смазывания (напыление смазочного материала при помощи форсунки), который в реальных условиях эксплуатации узлов трения приводит к невозможности попадания смазочного материала точно в зону контакта, разбрызгиванию и потерям смазочного материала вследствие ветровой и динамической нагрузки.

Еще одной серьёзной проблемой является ограничение скорости эксплуатации узла трения во время нанесения смазочного материала. Так, при реализации технологий, основанных на дистанционном нанесении смазочного материала при скорости движения узла трения больше 50–60 км/ч, создаются условия, затрудняющие попадание смазывающего материала в зону трения. Неудобство также вызывает необходимость широкой номенклатуры смазочных материалов (для различных способов подачи и смазывающих устройств), а также разделение их по сезонам. Кроме этого, применяемые жидкие, гелеобразные или консистентные смазочные материалы в существующих системах лубрикации обладают низкими ресурсными характеристиками и экологическими показателями.

Существующие системы подачи смазочных материалов не принимают во внимание важную особенность эксплуатации открытых узлов трения, например, в месте контакта колёсных пар с верхним строением железнодорожного пути.

Проблема заключается в специфике конструкции: антифрикционная поверхность (гребень колеса) постепенно переходит во фрикционную поверхность (тяговую часть колеса), где присутствие смазки категорически недопустимо. Притом действующие нагрузки достигают предела текучести как колёсного, так и рельсового материала.

Ключевой технической сложностью при регулировании трения в паре «гребень колеса – боковая поверхность головки рельса» выступает необходимость чёткого определения границ нанесения смазочного материала с заданными свойствами.

В связи с этим для лубрикации открытых узлов трения с высокой нагрузкой оптимальным решением становится контактный метод подачи смазки непосредственно в зону трения.

На основе многолетних исследований в области трибологии в Ростовском государственном университете путей сообщения создана технология подачи смазочного материала в зону трения открытых тяжело нагруженных узлов трения (для лубрикации контакта гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса – технология ГРС-РГУПС). В основе рассматриваемой технологии лежит ротапринтно-контактный метод подачи смазочных материалов. Этот процесс реализуется с помощью специальной системы модификации поверхностей трения, состоящей из приводного механизма подачи смазки 1 и смазочного материала 2 в форме стержня (рисунок 4.1).

Главное преимущество данного метода заключается в точном дозировании и адресной подаче смазки непосредственно в зону фрикционного контакта (например, в область гребня колеса).

Использование ротапринтно-контактного метода обеспечивает достижение нескольких важных результатов: эффективное снижение трения и интенсивности изнашивания, сохранение оптимальных условий взаимодействия контактирующих поверхностей (включая процессы тяги и торможения), а также исключение загрязнения смазочным материалом других компонентов оборудования и окружающей среды.

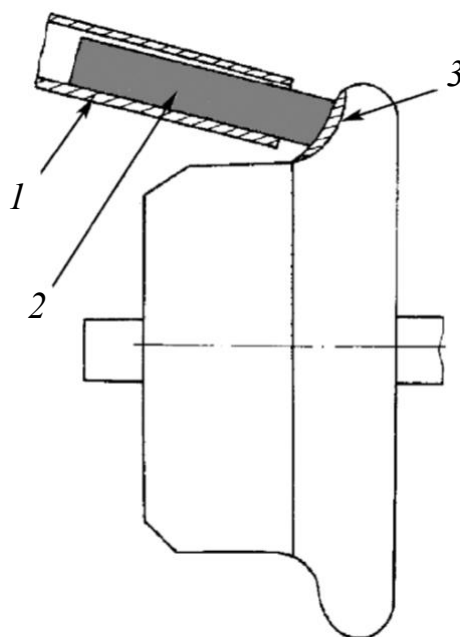


Рисунок 4.1 – Технология ротапринтно-контактного способа нанесения наноструктурированного смазочного материала на примере гребня колеса:

1 – привод подачи смазочного материала; 2 – смазочный стержень;

3 – зона нанесения смазочного материала (зона смазывания)

Такой подход позволяет максимально эффективно решать задачи по снижению трения при полном сохранении эксплуатационных характеристик механизма.

Ротапринтно-контактный метод подачи смазки функционирует по следующему принципу.

В процессе работы смазочный стержень постепенно изнашивается, совершая поступательное движение в направлении смазываемой поверхности. При этом происходит равномерное нанесение смазочного материала.

Особенность системы заключается в автоматическом дозировании смазки. Механизм регулирования основан на изменении коэффициента трения между смазочным стержнем и обрабатываемой поверхностью.

Принцип работы основан на следующей зависимости: когда на поверхности уже есть смазка, коэффициент трения между стержнем и поверхностью снижается, что приводит к минимальному износу стержня и практически прекращает подачу нового смазочного материала.

При отсутствии смазки на поверхности коэффициент трения возрастает, что вызывает интенсивный износ стержня и увеличивает объём подаваемого смазочного материала.

Таким образом, система самостоятельно регулирует количество подаваемой смазки в зависимости от текущих условий трения, обеспечивая оптимальное смазывание поверхности.

На рисунке 4.2 представлена расчётная схема сил, действующих на смазочный элемент в условиях самоподачи, на примере смазывания гребня колеса.

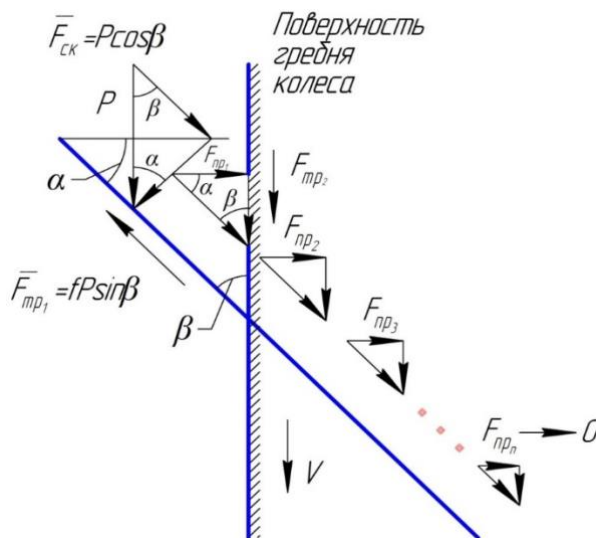


Рисунок 4.2 – Расчётная схема сил, действующих на смазочный элемент в условиях самоподачи

Теоретические основы сервоэффекта фрикционных систем:

$$N = P \sin \alpha + F_{mp} \sin \alpha;$$

$$N = P \sin \alpha + N \sin \alpha \cdot f = \text{const};$$

$$N - N \sin \alpha \cdot f = P \sin \alpha$$

$$1) \quad P \cos \beta > f_1 P \sin \beta \quad (Q_p = Q_n);$$

$$2) \quad \cos \beta < f_1 \sin \beta \text{ или } \text{ctg} \beta > f_1 \quad (Q_p = 0);$$

где Q – расход смазочного материала;

Q_p – расчётный расход смазочного материала;

Q_n – номинальный расход смазочного материала.

$$F_{\text{ск}} - F_{\text{тр1}} = P \cos \beta - f_1 P \sin \beta;$$

$$F_{\text{тр2}} = [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta)] \sin \beta = P';$$

$$f_1 = f(n, \theta^\circ, A, N) P \sin \beta;$$

$$f_2 = f(n, \theta^\circ, A, N) P \sin \beta;$$

$$F''_{\text{тр2}} = \{ [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta)] \cos \beta - f_1 \{ [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta) \sin \beta] \} \} f_2 \sin \beta = P'';$$

$$P''' = F_{\text{тр2}} = \{ \{ [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta) \sin \beta] \cos \beta - f_1 \{ [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta)] \} f_2 \sin \beta \} \} \cos \beta - f_1 f_2 \{ [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta) \sin \beta] \cos \beta - f_1 \{ [f_2 P (\cos \beta - f_1 \sin \beta) \sin \beta] \} f_2 \sin \beta \} \sin \beta;$$

$$\sum F_{\text{тр2}} = F'_{\text{тр2}} + F''_{\text{тр2}} + F'''_{\text{тр2}} + \dots + F^n_{\text{тр2}},$$

$$F'''_{\text{тр2}} \rightarrow 0.$$

Для внедрения разработанного ротапринтно-контактного метода подачи смазочных материалов при смазывании контакта между гребнем колеса и боковой поверхностью головки рельса на предприятиях ОАО «РЖД» планируется применение различных типов смазывающих устройств, соответствующих техническим условиям ТУ 3183-002-01116006-2005.

В качестве примера можно привести систему ГРС 20.07, которая прошла необходимую сертификацию и серийно поставляется через Росжелдорснаб для использования на железнодорожных путях ОАО «РЖД» (рисунок 4.3).

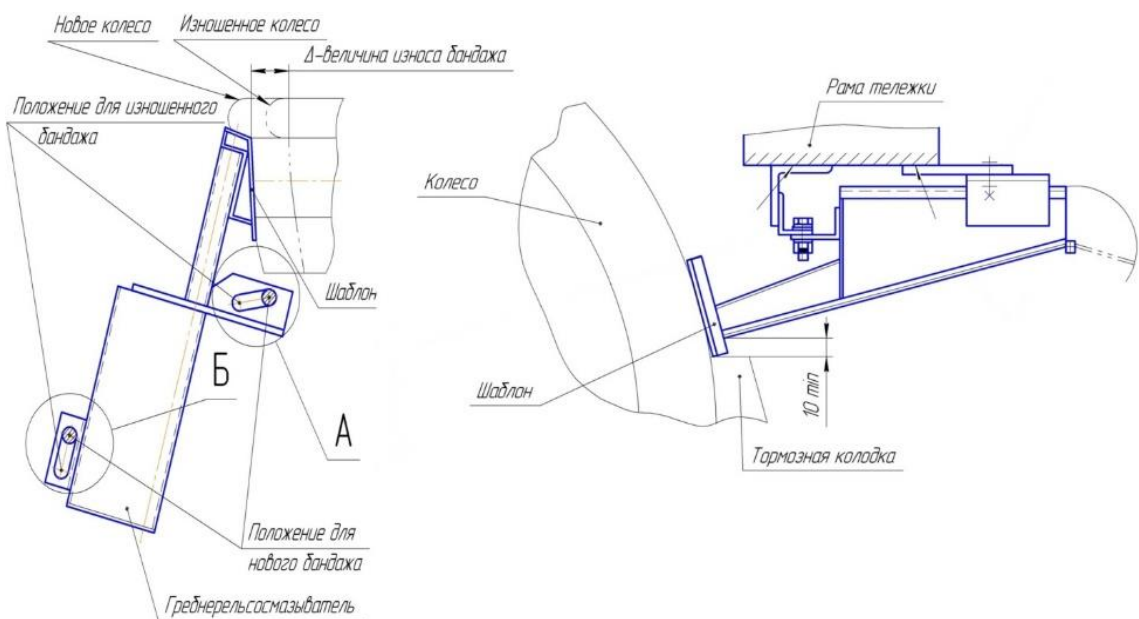


Рисунок 4.3 – Схема системы подачи смазочного материала ГРС-20.07

Согласно «Концепции развития лубрикации в системе “колесо – рельс”», специалисты РГУПС рекомендуют использовать бортовой гребнерельсосмазыватель последнего поколения АГРС-10.01 небалансирного типа (рисунок 4.4). Это устройство было создано в сотрудничестве с немецкой компанией «ФЕСТО».

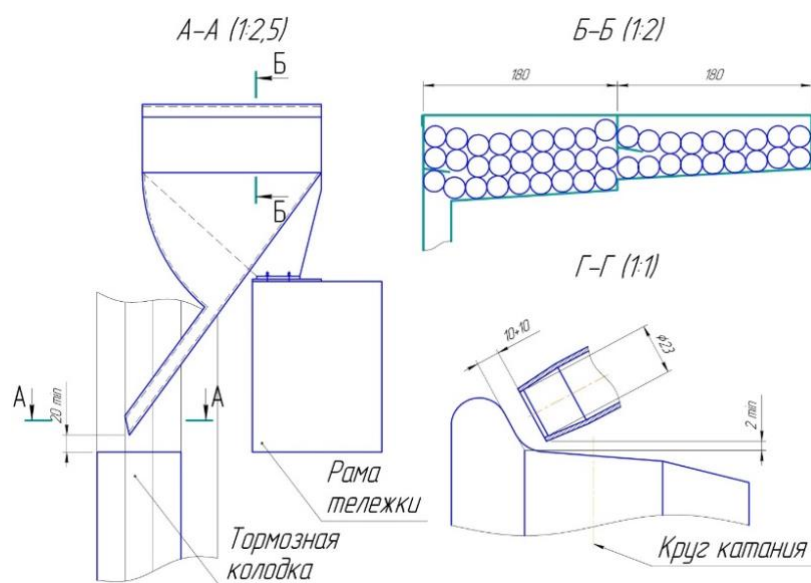


Рисунок 4.4 – Схема системы подачи смазочного материала АГРС-10.01 небалансирного типа

Данная технология и соответствующее оборудование разработаны с учётом технических требований к смазочным материалам для зоны контакта колеса и рельса. Эти требования были введены в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 24 февраля 2010 года № 375р.

На предприятиях ОАО «РЖД» для реализации предложенного способа подачи смазочного материала может применяться практически любой подвижной состав или его комбинации: локомотивы, вагоны, моторвагонный подвижной состав и другие транспортные средства.

5 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В период с 03.08.2025 по 05.05.2026 осуществлялись эксплуатационные испытания 27 единиц опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения, отличающихся комбинацией концентраций компонентов (Приложение А).

В качестве подвижного состава для проведения эксплуатационных испытаний использовались локомотивы серии ВЛ-80 приписки к цеху ремонта Батайск (ТЧЦР-45) локомотивного ремонтного депо Каменоломни – структурного подразделения Северо-Кавказской дирекции по ремонту тягового подвижного состава – Дирекции по ремонту тягового подвижного состава – филиала ОАО «РЖД».

Бортовые гребнесмазыватели кассетного типа ГРС 20.07, заправляемые смазочными стержнями типа РАПС, установленные на локомотивах, заправлялись опытными образцами наноструктурированного смазочного материала.

Эффективность работы опытных образцов наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения оценивалась визуально по наличию слоя смазочного материала на гребнях колёсной пары, оборудованной бортовыми гребнесмазывателями. Степень распределения слоя смазочного материала на фрикционных поверхностях гребней колёсной пары фиксировалась методом снятия слепков.

В результате проведённого осмотра было установлено наличие необходимого и достаточного слоя смазочного материала на гребнях колёсной пары, оборудованной бортовыми гребнесмазывателями кассетного типа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

В результате проведенного исследования было показано, что одним из сильных и перспективных направлений повышения ресурса и долговечности открытых тяжело нагруженных узлов трения может служить применение высокоэффективных смазочных материалов, преимущество которых является оригинальная структура, полученная с помощью современных наноматериалов и нанокomпонентов.

1 С целью создания высокоэффективного смазочного материала была разработана рецептура с применением наноструктурированных добавок в концентрации 21 %, обеспечивающей заданные трибологические характеристики.

2 В результате исследований определён компонентный состав смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения: диоксид кремния – 10 %, графит – 10 %, дисульфид молибдена – 1 %, битум – до 79 %, – обеспечивающий заданный ресурс работы смазочного материала при разовом нанесении (2 427 890 об/г).

3 Разработана технология изготовления наноструктурированного смазочного материала для открытых тяжело нагруженных узлов трения с заданными физико-механическими и трибологическими свойствами, позволяющая получить необходимые механические, физико-химические и трибологические свойства смазочного материала: диаметр пятна износа $\leq 0,7$ мм; критическая нагрузка заедания ≥ 940 Н; степень перетира ≤ 50 мкм.

4 Определена расчётная схема установки гребнерельсосмазывателей кассетного типа с учётом обеспечения стабильного объёма подаваемого материала в температурном диапазоне от -40 до $+110$ градусов Цельсия.

5 Представлен метод оценки основных триботехнических характеристик смазочного материала, позволяющий осуществить оценку эффективности применения смазок различного агрегатного состояния с высоким уровнем достоверности – погрешность измерения момента трения составляет не более 1 %, частоты вращения ± 3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Космодамианский, А. С. Основы трибосистемы «колесо – рельс» локомотивов нового поколения / А. С. Космодамианский, В. О. Корчагин, В. И. Воробьев // Локомотив. – 2022. – № 6 (786). – С. 28–31. – ISSN 0869-8147. – EDN DEQOND.

2 Воробьев, Д. В. Улучшение фрикционных характеристик пары трения «колесо – рельс» за счет воздействия на контакт электрического тока и магнитного поля : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Воробьев Дмитрий Владимирович. – Брянск, 2005. – 20 с. – EDN NIJORN.

3 Романова, А. Т. Влияние триботехнических процессов в системе «колесо – рельс» на экономические показатели железнодорожного транспорта / А. Т. Романова, Ю. М. Лужнов // Транспортное дело России. – 2022. – № 2. – С. 10–15. – DOI 10.52375/20728689_2022_2_10. – EDN DFYFTQ.

4 Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учётом реологических свойств микрополярного смазочного материала / М. А. Мукутадзе, Х. Н. Абдулрахман, В. Е. Шведова [и др.] // Омский научный вестник. – 2023. – № 3(187). – С. 3–14. – DOI 10.25206/1813-8225-2023-187-5-14. – EDN IKFMSX.2

5 Разработка математической модели течения ферромагнитного смазочного материала в высоконагруженной клиновидной опоре скольжения / М. А. Мукутадзе, В. М. Приходько, В. Е. Шведова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 8 (134). – Порядковый номер : 7. – DOI 10.23670/IRJ.2023.134.15. – EDN UUPRSB.

6 Исследование износостойкости в подшипнике с металлическим покрытием при учёте зависимости вязкости от давления / М. А. Мукутадзе, В. И. Кирищикева, Г. А. Бадахов [и др.] // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – № 35. – С. 30–38. – DOI 10.26160/2474-5901-2023-35-30-38. – EDN HJYMFA.

7 Патент RU 2595200 C1. Способ повышения ресурса элементов системы «колесо – рельс» и профили рельсовой колеи и обода железнодорожного колеса на его основе / И. А. Пухов. – № 2015123953/11 ; заявл. 19.06.2015 ; опубл. 20.08.2016, Бюл. № 32. – 21 с.

8 Улучшение условий функционирования фрикционной системы «Колесо-рельс». Разработка ГОСТа для определения трибологических характеристик твёрдых смазочных материалов / И. В. Колесников, А. М. Лубягов, Э. Э. Фейзов [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 4-3. – С. 753–758. – ISSN 1990-5378. – EDN PCLRZT.

9 Геометрия трения. Итоги проекта «Колесо – рельс» ОАО «РЖД». – Текст : электронный // МояКолея1520.рф [сайт]. – 27.06.2024. – URL: <https://xn--1520-u4d3ahgsb9pe.xn--p1ai/new/10150/> (дата обращения: 18.05.2026).

10 Трифионов, А. В. Влияние трибологического состояния рельсов на взаимодействие колёс подвижного состава и пути : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Трифионов Алексей Валерьевич. – Москва, 2019. – 24 с.

11 Эффективность лубрикации рельсов. – Текст : электронный // Железные дороги мира. – 2011. – № 1. (S. Kumar. Railway Track & Structures, 2009, № 5, p. 35–38; материалы компании Tranergy (www.tranergy.com)). – URL: https://zdmira.com/images/pdf/_dm2011-01_65-68.pdf (дата обращения: 23.05.2026).

12 Патент RU 2197677 C2. Система смазки поверхностей трения / В. В. Шаповалов, С. Г. Деркачев, А. Ю. Сопельник [и др.]. – № 2001101508/06. ; заявл. 15.01.2001 ; опубл. 27.01.2003. – 8 с.

13 Глазунов, Д. В. Способы снижения износа колёсных пар подвижного состава / Д. В. Глазунов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 2 (54). – С. 107–114. – DOI 10.21440/2307-2091-2019-2-107-114. – EDN RTTIPB.

14 Ozyabkin, A. L. Dynamic monitoring of railway tribosystems / A. L. Ozyabkin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2011. – No. 2 (42). – P. 35–49. – ISSN 0201-727X. – EDN ODVHTF.

15 Харламов, П. В. Повышение эффективности взаимодействия подвижного состава и пути / П. В. Харламов, С. Л. Горин // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 318–322. – ISBN 978-5-907295-88-9. – EDN KODHUK.

16 Challenges and methodology for pre-processing measured and new rail profiles to efficiently simulate wheel-rail interaction in switches and crossings / Y. Bezin, B. Sambo, H. Magalhaes [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2023. – Vol. 61, No. 3. – P. 799-820. – DOI 10.1080/00423114.2021.2014897. – EDN XTBPUE.

17 Глазунов, Д. В. Исследование материалов и методов нанесения на трибосистему «колесо – рельс» : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.02.04 / Глазунов Дмитрий Викторович. – Ростов-на-Дону, 2021. – 144 с.

18 Корчагин, В. О. Улучшение тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт трибосистемы колесо – рельс : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Корчагин Вадим Олегович. – Москва, 2017. – 175 с.

19 Харламов, П. В. Проектирование системы подачи модификаторов трения к фрикционным поверхностям трибологического контакта «колесо – рельс» / П. В. Харламов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2 (82). – С. 58–66. – DOI 10.46973/0201–727X_2021_2_58.

20 Стручков, А. В. Разработка способа и устройства для повышения износостойкости рабочей поверхности головки рельса. – Текст : электронный / А. В. Стручков, А. А. Климов // Решетневские чтения. – 2015. – № 19. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sposoba-i-ustroystva-dlya-povysheniya-iznosostoykosti-rabochey-poverhnosti-golovki-relsa> (дата обращения: 21.05.2026).

21 Comparison between ANCF and B-spline surfaces / A. Mikkola, A. A. Shabana, C. Sanchez-Rebollo, J. R. Jimenez-Octavio // Multibody System Dynamics. –

2013. – Vol. 30, No. 2. – P. 119-138. – DOI 10.1007/s11044-013-9353-z. – EDN RNOIAR.

22 Патент RU 2446969 C2, МПК B61C 15/10. Способ снижения сопротивления движению поездного состава и снижения износа системы «колесо – рельс» / О. В. Мельниченко, Ю. В. Газизов, С. А. Горбатов. – № 2010118844/11 ; заявл. 11.05.2010 ; опубл. 10.04.2012. – EDN QFQKVQ.

23 Патент RU 2449910 C2, МПК B61F 3/00, B61F 5/50, B61F 5/38. Способ снижения износа системы «колесо – рельс» и конструкция для его осуществления / О. В. Мельниченко, Е. В. Чупраков, С. А. Горбатов. – № 2010129656/11 ; заявл. 15.07.2010 ; опубл. 10.05.2012. – EDN ZLCXVJ.

24 Патент RU 2181754 C2, МПК C10M 163/00, C10M 101/02, C10M 107/04. Композиция для уменьшения износа в паре трения колесо – рельс / Н. С. Назаров, О. В. Мельниченко, Б. А. Мороз [и др.]. – № 2000111297/04 ; заявл. 06.05.2000 ; опубл. 27.04.2002. – EDN NUZIZP.

25 Патент RU 2196807 C2, МПК C10M 169/04, C10M 107/04, C10M 125/02. Композиция для лубрикации и упрочнения поверхности в зоне трения «колесо – рельс» / Г. А. Якимова, О. В. Мельниченко, Я. Н. Силинская [и др.]. – № 2001100992/04 ; заявл. 09.01.2001 ; опубл. 20.01.2003. – EDN UNTNBF.

26 Майба, И. А. Экономическое обоснование выбора гребнесмазывателя для электровоза ВЛ-80 / И. А. Майба, Д. В. Глазунов, И. И. Майба // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 1. – С. 80–82. – DOI 10.36652/0042-4633-2025-104-1-80-82. – EDN PPNDTX.

27 Майба, И. А. Оценка эффективности оснащения локомотива устройством смазывания гребня / И. А. Майба, Д. В. Глазунов, И. И. Майба // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № 1. – С. 77–81. – DOI 10.52261/02346206_2024_1_77. – EDN HGWMCI.

28 Применение ресурсосберегающих технологий для увеличения срока службы пар трения / И. А. Майба, М. И. Никитина, Е. И. Никитин [и др.] // Обеспечение надежности, качества и безопасности технологических машин и оборудования : сборник научных трудов конференции, Ростов-на-Дону, 10 марта

2023 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 44–47. – ISBN 978-5-907295-99-5. – EDN RSWDEF.

29 Bowden, F. P. The Friction and Lubrication of Solids / Frank Philip Bowden, David Tabor. – Oxford University Press, London, 1950. – 374 p.

30 Archard, J. F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces / J. F. Archard // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24. – P. 981–988. – DOI 10.1063/1.1721448.

31 A Hamper, M. B. Use of ANCF Surface Geometry in the Rigid Body Contact Problems: Application to Railroad Vehicle Dynamics / M. B. Hamper, A. A. Shabana, C. Wei // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2015. – Vol. 10, No. 2. – P. 021008. – DOI 10.1115/1.4027442. – EDN VGNKOZ.

32 Dmitrochenko, O. N. Generalization of plate finite elements for absolute nodal coordinate formulation / O. N. Dmitrochenko, D. Yu. Pogorelov // Multibody System Dynamics. – 2003. – Vol. 10, No. 1. – P. 17-43. – DOI 10.1023/A:1024553708730. – EDN LIBDGF.

33 Воробьев, А. А. Износ в системе «колесо – рельс» / А. А. Воробьев, В. В. Котова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 3. – С. 24–31. – ISSN 1818-5509. – EDN TUICDH.

34 Марченко, Е. А. О природе износа поверхностей металлов при трении / Е. А. Марченко. – Москва : Наука, 1979. – 118 с.

35 Лихтман, В. И. Физико-химическая механика материалов / В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1962. – 303 с.

36 Буйносов А. П. Износ бандажей и рельсов: причины и возможности сокращения / А. П. Буйносов // Железнодорожный транспорт. – 1994. – № 10. – С. 39–41. – ISSN 0044-4448. – EDN YROQGB.

37 Буйносов, А. П. Повышение износостойкости колёсных пар электроподвижного состава за счёт обработки гребней триботехническим составом / А. П. Буйносов, В. А. Тихонов // Транспорт Урала. – 2011. – № 3 (30). – С. 59–64. – ISSN 1815-9400. – EDN OGIPZV.

38 Буйносов, А. П. Математическая модель повышения ресурса бандажей колёсных пар электровозов / А. П. Буйносов, Д. Л. Худояров, В. Л. Балдин // Ремонт, восстановление, модернизация – 2011. – № 4. – С. 43–48. – ISSN 1684-2561. – EDN NTDGJJ.

39 Балановский, А. Е. Комплексная оценка качества технологии плазменного поверхностного упрочнения бандажей локомотивов. / А. Е. Балановский, И. А. Плетников // Сварка и диагностика. – 2012. – № 5. – С. 49–55. – ISSN 2071-5234. – EDN PFNXJ.

40 Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колёс / М. Ф. Вериго. – Москва, 1997. – 207 с.

41 Просви́ров, Ю. Е. Пути снижения износа гребней колёсных пар локомотивов / Ю. Е. Просви́ров, К. О. Лютикова // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. – 2007. – Вып. 8 (12). – С. 73–77. – EDN IJKXGN.

42 Гончаров, С. Е. Износ гребней колёсных пар грузовых вагонов / С. Е. Гончаров // Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог. – 2017. – № 4 (40). – С. 32–37. – ISSN 1998-9318. – EDN YNSCYO.

43 Коржин, С. Н. Анализ и выбор технологических решений по повышению износостойкости гребней колёсных пар : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Коржин Сергей Николаевич. – Москва, 2009. – С. 54–60.

44 Сакин, А. Е. Исследование износа поверхностей катания грузовых вагонов / А. Е. Сакин // Железнодорожный транспорт за рубежом. – 1979. – № 7. – С. 33–35.

45 Tuning of freight wagon bogies using inter-axle linkages / A. Orlova, Y. Boronenko, H. Scheffel [et al.] // ZEV Rail Glasers Annalen. – 2002. – Vol. 126, No. SPEC.. – P. 200-212. – EDN LHNIUB.

46 ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия : межгосударственный стандарт : издание официальное. – Введен 01.01.2012. – Москва : Стандартиформ, 2011. – 33 с.

47 Филиппов, В. Н. Снижение износа гребней колёс грузовых вагонов за счет рационализации параметров узлов опирания кузова / В. Н. Филиппов, А. А. Тармаев, И. Жайсан // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4 (40). – С. 11–17. – DOI 10.20291/2079-0392-2018-4-11-17.

48 Saidova, A. Refining the parameters of Archard's wear model for calculating wear of wheels applied for 25 t per axle freight wagons on Russian railways / A. Saidova, A. Orlova // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2014. – Vol. 52, Suppl. 1, Special Iss. : IAVSD Proceeding Supplement. – P. 3–15. – DOI 10.1080/00423114.2013.874564. – EDN SPGKZF.

49 Ларин, Т. В. Низколегированная сталь для колёс грузовых вагонов / Т. В. Ларин, Ю. М. Парышев, А. М. Вихрова // Производство железнодорожных колёс и рельсов : отраслевой сборник научных трудов. – Харьков, 1975. – С. 103–107.

50 Патент RU 2111141 C1. Способ защиты от износа головки рельса и гребней бандажей колесных пар / Г. М. Яковлев. № 94005250/11 ; заявл. 14.02.1994 ; опубл. 20.05.1998, Бюл. № 14. 6 с.

51 Успешное решение проблем трения с помощью автоматических стационарных путевых и устанавливаемых на подвижном составе систем смазки SKF и Lincoln. UB LS/S2 14824 RU 1-2024-RU. – Текст : электронный // SKF Group. – 2014. – 20 с. – URL: <https://elsmascentr.ru/wp-content/uploads/2020/05> (дата обращения: 23.05.2026).

52 Афанасов, А. М. Анализ влияния условий сцепления на фактор износа гребней колёсных пар локомотивов / А. М. Афанасов, А. И. Кийко, С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2012. – № 41. – С. 71–74. – ISSN 1993-9175. – EDN SMLXDR.

53 Применение магнитоуправляемых контактов в устройствах гребнесмазывания электроподвижного состава промышленного

железнодорожного транспорта / Г. Г. Муратов, А. Ш. Жураев, Н. О. Полвонов, Ф. М. Буриев // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей IV Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 1. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 38–41. – ISBN 978-5-907135-87-1. – EDN YRBPKX.

54 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.

55 Шалыгин, М. Г. Недостатки систем смазывания гребня колёсной пары локомотива / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники : материалы Международной научно-технической конференции, Брянск, 19–20 февраля 2020 года / БГТУ. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 67–70. – DOI 10.30987/978-5-907271-27-2. – EDN ETCBOU.

56 Anand, O. N. Anti-friction, anti-wear and load-carrying characteristics of environment friendly additive formulation / O. N Anand, V. Kumar, A. K. Singh // Lubrication Science. – 2007. – No. 19. – P. 159–167. – DOI 10.1002/lis.35.

57 Basset, D. Oil-Soluble Fluorinated Compounds as Antiwear and Antifriction Additives D. Basset, M. Hermant // ASLE Transactions. – 1983. – Vol. 27, No. 4. – P. 380–388.

58 Tribological Behavior of Lamellar Molybdenum Trioxide as a Lubricant Additive / W. Tang R., Liu, X. Lu [et al.] // Materials. – 2018. – No. 11 (12). – Article no. 2427. – EDN YFIJZJ.

59 Antipin, D. Ya. Study of dynamic loads in traction drive of freight locomotive under the influence of railway track irregularities / D. Ya. Antipin, D. A. Bondarenko,

O. V. Izmerov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206 (1). – P. 1583–1586. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.681. – EDN XOGXDV.

60 Antipin, D. Ya. Evaluation of inter-car connections dynamic loading at train – obstacle emergency collision / D. Ya. Antipin, O. I. Polushko, S. G. Shorokhov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206 (1). – P. 1587–1591. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.682.

61 Шалыгин, М. Г. Обзор причин интенсивного износа гребня колёсной пары и способов его уменьшения / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Механики XXI века : материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции, Братск, 20–22 мая 2020 года / ФГБОУ ВО БрГУ. – 2020. – № 19 – С. 196–203. – EDN UWLXNH.

62 Increasing coupling properties of locomotive by magnetizing contact area of wheel with rail / D. Y. Antipin, V. I. Vorobyov, V. O. Korchagin [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Series : Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering – Mechanical Engineering. – 2017. – Article no. 082003. – EDN XOAKWC.

63 Antipin, D. Improving the construction of magnetic clutch amplifiers of locomotive wheels with rails / Dmitry Antipin, V. I. Vorobiev, M. A. Maslov // In book : Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (pp. 2331–2338). – DOI 10.1007/978-3-319-95630-5_251. – EDN NKVZVW.

64 Блудов, А. Н. Методы снижения износа колёсных пар подвижного состава / А. Н. Блудов, В. В. Кошелев // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : материалы XX Всероссийской научно-практической конференции, Старый Оскол, 21 декабря 2023 года. – Старый Оскол : Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2024. – С. 155–163. – EDN DCVJPI.

65 Шаповалов, В. В. Разработка лубрикатора картриджного типа для узлов трения транспортных машин / В. В. Шаповалов, А. А. Семенов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 26–28 апреля 2023 года. Т. 3 :

Технические и гуманитарные науки. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 47–50. – ISBN 978-5-907295-90-2. – EDN ABEOOM.

66 Технологии лубрикации для смешанного движения поездов / П. Н. Щербак, В. Б. Мишиненко, В. В. Шаповалов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2023. – № 4 (220). – С. 77–84. – DOI 10.17213/1560-3644-2023-4-77-84. – EDN LWIEBF.

67 Оптимизация взаимодействия в системе колесо – рельс / С. А. Виноградов, А. В. Сухов, А. А. Лунин [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 3. – С. 37–45. – ISSN 0044-4448. – EDN PEVIFYZ.

68 Яновский, А. С. Взаимодействие колеса и рельса в новых условиях эксплуатации / А. С. Яновский // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 3. – С. 15, 2 с. обл. – ISSN 0131-5765. – EDN XIGGWA.

69 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. – EDN AJJMMW.

70 Упруго-диссипативные характеристики тяжело нагруженных модифицированных пар трения / С. Л. Чернышев, В. И. Колесников, В. Д. Верескун [и др.] // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 1. – С. 58–67. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67. – EDN WTIKDZ.

71 Кротов, С. В. Аппроксимация кривой износа профиля обода железнодорожного колеса, примыкающего к гребню / С. В. Кротов, Д. П. Кононов, А. П. Буйносов // Транспорт Урала. – 2023. – № 4 (79). – С. 47–53. – DOI 10.20291/1815-9400-2023-4-47-53. – EDN FSFYRO.

72 Матяш, Ю. И. Исследования возможности снижения степени износа гребня колеса в грузовом вагоне / Ю. И. Матяш, А. Д. Родченко, А. Г. Петракова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2023. – № 1 (77). – С. 51–59. – DOI 10.26731/1813-9108.2023.1(77).51-59. – EDN KOGWTL.

73 Абдурашитов, А. Ю. Оптимизация профиля поверхности катания рельсов с целью снижения напряжений в контакте колесо – рельс / А. Ю. Абдурашитов, В. П. Сычев, А. А. Сальников // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2023. – Т. 19. – С. 48–62. – EDN TYDWCO.

74 Повышение работоспособности колёсных пар подвижного состава / О. С. Валинский, А. А. Воробьев, С. И. Губенко [и др.]. – Казань : Издательство «Бук», 2022. – 324 с. – ISBN 978-5-00118-870-4. – EDN TXAHYI.

75 Инновационная технология термометаллоплакирования / В. В. Шаповалов, П. Н. Щербак, П. В. Харламов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 12. – С. 34–37. – ISSN 0044-4448. – EDN FXSFMZ.

76 Повышение эффективности системы колесо – рельс на базе инновационных импортозамещающих технологий / В. В. Шаповалов, П. Н. Щербак, Э. Э. Фейзов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 7. – С. 52–54. – ISSN 0044-4448. – EDN VLEWSG.

77 Игнатъев, О. Л. Возможности применения управляемых стержневых гребнесмазывателей для снижения износа колёсных пар двухэтажных пассажирских вагонов / О. Л. Игнатъев, О. В. Игнатьева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 23–28. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_23. – EDN SXBXFP.

78 Кротов, В. Н. Смазочный материал для системы «колесо – рельс» / В. Н. Кротов, Н. Р. Осипова, Н. Н. Зинченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 511–514. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-2-511-514. – EDN DUVBUJ.

79 Карпущенко, Н. И. Интенсивность бокового износа рельсов в кривых в зависимости от эксплуатационных условий / Н. И. Карпущенко, Е. М. Река // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2 (61). – С. 57–66. – DOI 10.52170/1815-9265_2022_61_57. – EDN POMROM.

80 Пути снижения износа гребней колёсных пар в тележках грузовых вагонов / В. Н. Филиппов, А. А. Петров, Е. Г. Курзина, А. М. Курзина //

Транспортное машиностроение. – 2022. – № 8 (8). – С. 44–55. – DOI 10.30987/2782-5957-2022-8-44-55. – EDN GDVFFI.

81 Курзина, А. М. Способы снижения интенсивности износа гребней колёсных пар грузовых вагонов : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : 05.22.07 / Курзина Ангелина Михайловна. – Москва, 2021. – 171 с. – EDN YYULWY.

82 Иванова, Т. В. Влияние лубрикации на ресурс рельсов по предельному боковому износу / Т. В. Иванова, И. В. Мурзин, Д. Г. Налабордин // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 13–15. – ISSN 0131-5765. – EDN VWNHTO.

83 Сладкова, Л. А. Новый взгляд на проблему изнашивания колёс подвижного состава / Л. А. Сладкова, А. Н. Неклюдов // Трение и износ. – 2021. – Т. 42, № 2. – С. 162–169. – DOI 10.32864/0202-4977-2021-42-2-162-169. – EDN FDGNSY.

84 Глазунов, Д. В. Способы упрочнения бандажей колёсных пар / Д. В. Глазунов, В. Н. Кротов, Е. Ю. Черкесов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17, № 2 (194). – С. 51–54. – DOI 10.36652/1813-1336-2021-17-02-51-54. – EDN VIROJJ.

85 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.

86 Парахненко, И. Л. Управление трением на дорожке катания как способ снижения силового взаимодействия в контакте «колесо – рельс» / И. Л. Парахненко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 3 (71). – С. 165–170. – DOI 10.26731/1813-9108.2021.3(71).165-170. – EDN EVTKAC.

87 Оценка износа колёс грузовых вагонов при существующих нормативах выпуска трехэлементных тележек с осевой нагрузкой 23,5 тс из ремонта / А. В. Саидова, В. И. Федорова, Ю. Б. Житков [и др.] // Известия Петербургского

университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18, № 1. – С. 52–61. – DOI 10.20295/1815-588X-2021-1-52-61. – EDN RIJCY.

88 Майба, И. А. Трибологические испытания антифрикционных материалов для смазывания колёс подвижного состава / И. А. Майба, Д. В. Глазунов // Известия Транссиба. – 2021. – № 1 (45). – С. 75–84. – EDN EXVUES.

89 Analytical Assessment of the Sliding Friction Coefficient Influence on Durability, Wear and Contact Pressure in Spur Gears / M. Chernets, A. Kornienko, Y. Chernets, S. Fedorchuk // FME Transactions. – 2021. – Vol. 49, No. 2. – P. 472–479. – DOI 10.5937/fme2102472C. – EDN ZTWPRF.

90 Патент RU 2720188 C1, МПК G01L 1/22. Способ измерения боковых сил, действующих от колеса на рельс, и устройство для его осуществления / Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, А. С. Даукша. – № 2019114559 ; заявл. 13.05.2019 ; опубл. 27.04.2020. – EDN RDQKED.

91 Маслова, М. А. Эффективность способов нанесения триботехнических материалов и их состава на износостойкость колёсных пар подвижного состава / М. А. Маслова, В. Г. Кондратенко, Е. В. Пакулина // Прогрессивные технологии, применяемые при ремонте железнодорожного подвижного состава : сборник трудов Национальной научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Санкт-Петербург, 29 ноября 2019 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2020. – С. 105–112. – EDN JTHIDA.

92 Майба, И. А. Применение модификатора трения в зоне контакта «колесо – рельс» / И. А. Майба, М. И. Никитина, Е. И. Никитин // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 09–11 ноября 2020 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 153–156. – ISBN 978-5-907295-21-6. – EDN QWBTPS.

93 Кострюков, А. А. Синтез триботехнологий на основе самоорганизации для повышения эксплуатационных характеристик элементов системы «колесо –

рельс» / А. А. Кострюков, А. В. Щедрин, Н. Ю. Чихачева // Будущее машиностроения России : сборник докладов Тринадцатой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием), Москва, 22–25 сентября 2020 года. В 2 т. Т. 1. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – С. 277–280. – ISBN 978-5-7038-5547-8. – EDN SOOOMU.

94 Шалыгин, М. Г. Недостатки систем смазывания гребня колёсной пары локомотива / М. Г. Шалыгин, А. П. Ващишина // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники : материалы Международной научно-технической конференции, Брянск, 19–20 февраля 2020 года. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 67–70. – ISBN 978-5-907271-27-2. – EDN ETCBOU.

95 Основные причины повышенного износа рельсов и гребней колёсных пар грузовых вагонов / Л. А. Мугинштейн, В. М. Богданов, А. В. Сухов, Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 7. – С. 43–51. – ISSN 0044-4448. – EDN WYOIYI.

96 Металлоплакирование рабочих поверхностей трения пары «колесо – рельс» / В. В. Шаповалов, Ю. Ф. Мигаль, А. Л. Озябкин [и др.] // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 4. – С. 464–474. – DOI 10.32864/0202-4977-2020-41-4-464-474. – EDN WPTWDK.

97 Кохановский, В. А. Смазочный материал для ротапиритной смазки системы «колесо – рельс» / В. А. Кохановский, Д. В. Глазунов // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 6. – С. 717–724. – DOI 10.32864/0202-4977-2020-41-6-717-724. – EDN OAHXIJ.

98 Парахненко, И. Л. Влияние лубрикации на безопасность движения грузовых поездов / И. Л. Парахненко // Инновационный транспорт. – 2020. – № 1 (35). – С. 43–45. – DOI 10.20291/2311-164X-2020-1-43-45. – EDN JETCHK.

99 Игнатьев, О. Л. Инновационный подход к снижению износа колёсных пар нетягового подвижного состава для повышения эксплуатационной эффективности / О. Л. Игнатьев, О. В. Игнатьева // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1(50). – С. 30–32. – EDN ECVFKZ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



УТВЕРЖДАЮ: Главный инженер
эксплуатационного локомотивного
депо Батайск В.В. Салтыков

«17» апреля 2026 г.

АКТ

использования в Ростовской дистанции пути результатов
диссертационной работы Н.В. Зиновьева

Мы, нижеподписавшиеся, главный инженер ПЧ-3 В.А. Степаненко, д.т.н., зав. каф. «Проектирование и технология производства машин» П.В. Харламов, аспирант Н.В. Зиновьев составили настоящий акт о том, что в условиях работы Ростовской дистанции пути испытан твердый смазочный материал с применением наноструктурированных добавок для систем гребнерельсосмазывания.

Результаты испытания показали, что твердый смазочный материал с применением наноструктурированных добавок с применением дисульфида молибдена и высокодисперсного диоксида кремния, разработанного аспирантом Н.В. Зиновьевым в сравнении с традиционной рецептурой, обладает стабильными трибологическими характеристиками, что сокращает расход смазки при подаче. Наблюдается наличие состава смазочного материала на контактирующих поверхностях головки рельса и гребня колеса.

Предлагаемый компонентный состав смазочного материала может быть рекомендован к использованию в бортовых системах гребнерельсосмазывания.

Зав. каф. ПТТИМ
ФГБОУ ВО РГУПС

д.т.н., доцент

П.В. Харламов

Главный инженер ПЧ-3

В.А. Степаненко

Аспирант кафедры
«ПТТИМ» ФГБОУ ВО РГУПС

Н.В. Зиновьев