ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
имени В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 539.62:621.89;665.753.4

ГРИГОРЬЕВ
Фёдор Андреевич

РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах

Гомель, 2026

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси».

Научный руководитель:	**Мышкин Николай Константинович** доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси, заведующий отделом «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов» Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси»
Официальные оппоненты:	**Жорник Виктор Иванович** доктор технических наук, профессор, начальник отделения технологий машиностроения и металлургии – заведующий лабораторией наноструктурных и сверхтвердых материалов Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»; **Дудан Александр Витальевич** кандидат технических наук, доцент, декан механико-технологического факультета, доцент кафедры автомобильного транспорта учреждения образования «Полоцкий государственный университет имени Ефросиньи Полоцкой»
Оппонирующая организация:	Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится «23» декабря 2026 г. в 16.00 на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси» по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а; e-mail: mpri@mpri.org.by; тел.: +375(0232)34-17-11; факс: +375(0232)34-06-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси».

Автореферат разослан « » ноября 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Н.С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Преодоление сил трения и устранение последствий износа деталей машин и механизмов оцениваются в ~5% мирового ВВП и потребления до 23% всей производимой в мире энергии. Одним из наиболее эффективных способов снижения этих затрат является применение смазочных материалов. Помимо снижения трения и износа, они выполняют ряд критически важных функций в механизмах – защищают детали от коррозии, обеспечивают охлаждение, уплотняют зазоры и демпфируют ударные нагрузки.

Современные смазочные материалы представляют собой сложные композиционные составы на минеральной или синтетической основе с пакетом функциональных присадок. Ежегодный рост мирового потребления смазочных материалов составляет 3–5%, при годовом объеме выпуска около 40 млн тонн и прогнозируемом увеличении до 52–53 млн тонн к 2029 году. Однако рост потребления сопровождается неконтролируемыми потерями. Так, например, при эксплуатации сельскохозяйственной техники на каждые 1000 моточасов теряется 25–75 литров масла. По экспертным оценкам в природную среду попадает до 10% мирового объема выпуска смазочных материалов, что вызывает значительные экологические проблемы. В этих условиях актуальным становится использование биодеградируемых смазок, способных существенно снизить негативное воздействие на окружающую среду.

В настоящее время, в рамках концепции устойчивого развития и внедрения «зеленых» технологий, рядом развитых стран приняты законы о переходе в ряде отраслей на биодеградируемые смазочные материалы. Созданы и выпускаются индустриальные смазки на растительной основе, объем мирового выпуска которых в 2025 году составил около 782 тыс. тонн с прогнозируемым дальнейшим ежегодным приростом порядка 3–4%. Наибольшее распространение такие смазки получили в отраслях деятельности, где риск попадания в почву особенно высок.

Актуальность диссертационного исследования по разработке и внедрению биоразлагаемых смазочных материалов в Республике Беларусь обусловлена высокой степенью урбанизации, развитой промышленностью, транспортной системой, механизацией сельского хозяйства и лесотехнической отрасли, что определяет значительный объем потребления смазочных материалов и, как следствие, высокую потенциальную нагрузку на экосистемы. Замещение традиционных смазочных материалов биоразлагаемыми аналогами позволит повысить уровень промышленной и природоохранной безопасности и реализовать принципы устойчивого развития ключевых отраслей экономики. Достижение цели исследования будет способствовать формированию национальных решений в области разработки и применения смазочных материалов с пониженным экологическим воздействием.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021-2025 годы» (раздел 4 – композиционные и многофункциональные материалы).

Работа выполнена на основании теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных в результате выполнения ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» задание 6.06 «Полимерные материалы и технологии» (номер гос. регистрации 20161513), задание 4.2.3 «Многофункциональные и композиционные материалы» (номер гос. регистрации 20210243), проектов БРФФИ № Т21ЭТ-018 «Исследование электрофизики и механики смазочного действия в электрических контактах с целью разработки смазочных материалов для электротранспорта» (номер гос. регистрации 20211764) и № Т22ВА-003 «Функциональные смазочные материалы с двумерными нанонаполнителями для эффективных и экологически чистых трибосистем» (номер гос. регистрации 20221131).

Цель, задачи, объект и предмет исследования.

Цель исследования: разработка экологичных смазочных материалов (жидких и пластичных) и специальных смазок на основе композиций растительных масел и экологически безопасных модификаторов, а также изучение механизмов трения при их использовании.

Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

– определить целевые параметры разрабатываемых смазочных материалов путем сравнительного анализа триботехнических характеристик растительных и минеральных индустриальных масел;

– установить корреляцию между триботехническими характеристиками растительных масел и их жирнокислотным составом, а также оценить влияние окислительной деградации на эксплуатационные характеристики;

– выбрать базовое растительное масло, разработать и оптимизировать его смеси с другими маслами для достижения целевых функциональных параметров;

– разработать методы модификации композиций путем введения экологически безопасных присадок, дисперсных наполнителей и структурного модифицирования для создания конкурентоспособных смазочных материалов на растительной основе;

– определить и оптимизировать технологические принципы получения пластичных смазочных материалов на базе растительных композиций;

– создать лабораторно-технологические регламенты и рецептуры для экологичных смазок и смазочных материалов специального назначения;

– провести экологическую оценку разработанных смазок по критериям биологической безопасности;

– осуществить апробацию созданных смазочных композиций в натурных условиях на различных промышленных объектах.

Объект исследования: растительные масла и их смеси как экологически безопасная альтернатива минеральным смазочным материалам.

Предмет исследования: механизмы и закономерности трения и изнашивания в присутствии растительных масел, методы модификации их свойств, технологические принципы получения экологически безопасных смазочных материалов общего и специального назначения.

Научная новизна. Наиболее значимыми результатами работы, содержащими научную новизну, являются:

1. Выявлены два основных механизма деградации растительных масел при трении. Установлено, что для триглицеридов мононенасыщенных жирных кислот доминирует механическая деструкция молекул под воздействием высоких сдвиговых нагрузок, а для триглицеридов полиненасыщенных жирных кислот преимущественным является механизм термоокислительной деградации, что подтверждено статистически значимым различием изменения кислотного числа при трении в среде масел с контрастным жирнокислотным составом.

2. Разработан и применен новый метод многокритериального выбора базового сырья и сравнения биоразлагаемых смазок, основанный на проекции многомерного пространства их функциональных признаков на плоскость интегрального показателя качества. Данный метод, в отличие от традиционных подходов, минимизирует субъективность при анализе разнородных свойств и позволяет оценивать интегральное качество объектов анализа по степени их удаленности от гипотетически наихудшего решения.

3. Сформулирован новый принцип проектирования рецептур биоразлагаемых смазочных материалов. Он основан на использовании растительных масел с разным типом окислительного поведения и заключается не в полном подавлении окисления, а в целенаправленном его использовании за счет введения в стабильное базовое масло (например рапсовое) контролируемого количества компонентов, склонных к трибополимеризации и обладающих высокой адгезией (например льняное и касторовое масло), для формирования защитных пленок на поверхностях трения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные результаты, подтверждающие статистически значимые различия в механизмах эксплуатационной деградации при трении три-

глицеридов моно- и полинасыщенных жирных кислот, открывающие возможности к управлению функциональными характеристиками смазочных материалов за счет целевого изменения жирнокислотного состава, реализуемого путем подбора смесей растительных масел с заданным соотношением компонентов, что позволяет оптимизировать процесс формирования трибополимерных пленок, предохраняющих поверхность трения от износа.

2. Состав и экспериментальные данные по исследованию триботехнических характеристик и физико-механических свойств разработанного жидкого смазочного материала на основе смеси рапсового, касторового и льняного масел (78,9, 17,5 и 3,6 масс.%), что обеспечивает улучшение показателей в сравнении с индустриальным маслом И-20А по показателю износа на 46,3%, нагрузке сваривания на 124% и критической нагрузке на 112%, при сохранении коэффициента трения на уровне аналога.

3. Принцип применения экологически безопасной антиокислительной композиции для смазок на растительной основе, заключающейся в использовании смеси токоферол – агидол-1, где второй компонент обеспечивает не только ингибирование окислительных процессов, но и формирование защитных пленок на поверхностях трения, что позволяет в 4,3 раза повысить окислительную стабильность смазок без ухудшения триботехнических характеристик при экологически безопасной концентрации 0,5 – 1,0 масс.%.

4. Режимы получения и состав компонентов биоразлагаемых простых и комплексных пластичных смазок на основе смесей растительных масел с кальциевым загустителем, устанавливающие оптимальные значения времени омыления реакционной смеси 110 мин и последующей термообработки при температуре 118 °С в течение 57 мин, обеспечивающие получение пластичных смазочных материалов на основе растительного сырья с содержанием дисперсной фазы 15 – 16 масс.% и показателем износа 0,75 – 0,83 мм, температуры каплепадения 143 – 290 °С, коллоидной стабильности 7 – 15%.

Личный вклад соискателя ученой степени. Вклад автора состоял в постановке и решении задач исследования, проведении теоретических и экспериментальных работ, подготовке научных публикаций и внедрении разработанных технических решений. Соавторы публикаций участвовали в совместном проведении экспериментов, обсуждении полученных данных, написании статей и оформлении заявок на изобретения. Научным руководителем осуществлялось общее руководство, определение направления исследований и участие в обсуждении результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Республиканская научная конференция студентов, магистрантов, аспирантов «Актуальные вопросы

физики и техники» (г. Гомель, Беларусь, 2018); Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (г. Гомель, Беларусь, 2016, 2018, 2020, 2022, 2024); Международная научная конференция «Трибология – машиностроению» (г. Москва, Россия, 2018, 2020, 2022); Международная научно-техническая конференция «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель, Беларусь, 2018, 2022); Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (г. Гомель, Беларусь, 2019, 2022, 2025); Workshop –2021 IFToMM for Sustainable Development Goals (г. Пиза, Италия, 2021); Международная научная конференция «Молодежь в науке» (г. Минск, Беларусь, 2021, 2022, 2023, 2024); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра» (г. Гомель, Беларусь, 2021); Всероссийская научно-практическая конференция «Наука-Общество-Технологии» (г. Москва, Россия, 2023, 2024).

Разработанные технические решения использованы на ОАО «Гомельстекло», ГОЛХУ «Буда-Кошелевский опытный лесхоз», ОАО «МТЗ», КУП «Горэлектротранспорт», 17-й Белорусской антарктической экспедиции ГУ «Республиканский центр полярных исследований», СОФ 4РУ ОАО «Белуськалий». Теоретические и экспериментальные результаты работы использовались в учебном процессе УО «Белорусский государственный университет транспорта» при подготовке инженерных кадров.

Разработано и зарегистрировано 2 технических условия, 2 лабораторно-технологических регламента, 3 программы и методики испытаний.

Опубликованность результатов диссертации. По теме работы опубликовано 45 научных работ, в том числе: 1 глава в коллективной монографии, 10 статей (5,02 а. л.) в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, 6 статей в сборниках материалах конференций, 23 тезиса докладов на конференциях. Получено 2 патента и 1 заявка на выдачу патента Республики Беларусь, 2 патента на изобретение Российской Федерации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 165 страниц, в том числе: 35 рисунков на 33 страницах и 28 таблиц на 26 страницах, список использованных источников из 119 наименований на 11 страницах, список опубликованных работ автора из 45 наименований на 5 страницах, 17 приложений на 24 страницах.

ОСНОВНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен аналитический обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы о современном состоянии исследований и разработок в области смазочных материалов с акцентом на их экологическую безопасность.

Рассмотрены основные теоретические представления о трении со смазкой. Сделан вывод, что большинство узлов трения в реальных эксплуатационных условиях работает в граничном и смешанном режимах, при котором определяющее значение имеет поверхностная активность молекул смазки и их способность формировать устойчивые граничные слои, обеспечивающие снижение износа и потерь энергии. Отмечен значительный вклад в понимание механизмов смазывания В.Б. Харди, М.Д. Герси, Д. Тейбора и Д. Доусона. Свой вклад в этой области внесли советские, российские и белорусские ученые – А.С. Ахматов, В.А. Белый, Г.В. Виноградов, Б.В. Дерягин, И.В. Крагельский, Б.И. Купчинов, Р.М. Матвеевский, П.А. Ребиндер и многие другие.

Приведен критический обзор свойств современных смазочных материалов. Отмечено увеличение объемов применения смазок на основе растительных масел, обусловленное современными требованиями экологической безопасности технических решений. Проанализированы их преимущества и недостатки. К преимуществам отнесены высокие триботехнические характеристики, а к недостаткам – низкая окислительная и гидролитическая стабильность, а также склонность к коррозионному воздействию.

Рассмотрены современные разработки смазочных материалов на растительной основе. Установлено, что большинство решений базируется на применении присадок, разработанных для минеральных масел, что снижает экологические преимущества растительной основы. Проанализированы альтернативные подходы к повышению триботехнических характеристик растительных масел. Сделан вывод о целесообразности целенаправленного изменения их жирнокислотного состава путем подбора смесей масел, а также применения биоразлагаемых антиокислительных систем и биоинертных дисперсных наполнителей.

Определены наиболее перспективные области применения смазок на растительной основе, к которым отнесены отрасли с высокими экологическими рисками утечек и прямым контактом с почвой или водой (сельскохозяйственная и лесозаготовительная техника, городской электротранспорт, мобильная техника в рекреационных и природоохранных зонах).

На основе проведенного анализа сформулирована цель и определены задачи диссертационного исследования, направленные на создание жидких и пластичных смазочных материалов на основе растительных масел и экологически безопасных добавок.

Во второй главе изложены сведения об объектах и методах экспериментальных исследований. Базовыми объектами исследований выбраны следующие растительные масла: рапсовое техническое (РТ, ГОСТ 31759–2012); рапсовое пищевое (РП, СТБ 1486–2004); льняное пищевое (ЛП, ГОСТ 5791–81); касторовое техническое (КТ, ГОСТ 6757–96) и подсолнечное пищевое (ПП, ГОСТ 1129–2013). Для сравнительного анализа применялись минеральные индустриальные масла И-20А, И-30А, И-40А, И-50А (ГОСТ 20799–88), «Солидол жировой» (ГОСТ 1033–79) и «Солидол синтетический» (ГОСТ 4366–76). В качестве антиокислительной системы исследовались агидол-1 (ионол, пищевая добавка Е321) и α-токоферол (пищевая добавка Е607).

Для получения простых и комплексных пластичных смазок использовали 12-гидроксистеариновую кислоту (ТУ 38.101721–78), уксусную кислоту (ГОСТ 19814–74) и гидроксид кальция (ГОСТ 9179–77). Структурную модификацию растительных масел проводили с применением этиленгликоля, моноэтаноламина и янтарной кислоты.

В качестве дисперсных наполнителей использовали дисульфиды вольфрама и молибдена, гексагональный нитрид бора, графен, омедненный графит и политетрафторэтилен.

Изготовление экспериментальных образцов пластичных смазок осуществлялось на термостатируемой лабораторной установке объемом 0,4 л с якорным перемешивающим устройством. Для изучения процессов структурообразования использовался реактор LR2.St (IKA, ФРГ), обеспечивающий контроль температуры и вязкости реакционной массы.

Морфология дисперсных наполнителей исследовались методом растровой электронной микроскопии (VEGA LSHII, Tescan, Чехия). Размерный состав частиц определяли гравиметрическим методом седиментационного анализа. Число омыления и кислотное число определяли титриметрическими методами (ГОСТ 5478–2014, ГОСТ 6707–76). Состав масел определяли методом газовой хроматографии («Хроматэк Кристалл 5000», ЗАО СКБ «Хроматэк», Россия; колонка WM PEG20M-HT, Welcrom, Китай). Коррозионная активность масел оценивалась по ГОСТ 2917-76.

Физико-механические свойства смазок (вязкость, предел прочности на сдвиг, пенетрация, коллоидная стабильность, температуры каплепадения и вспышки) оценивались по стандартным методикам. Окислительную способность растительных масел и удельное электрическое сопротивление смазок оценивали по программам и методам исследований ПМИ №063–2018 и ПМИ №080–2022 (ИММС НАНБ), разработанным при участии автора.

Триботехнические характеристики (показатель износа, нагрузка сваривания, критическая нагрузка) определялись на четырехшариковой машине трения «ЧШМ-К1» (ООО «Технопромкомплект ЛТД», Украина) согласно

ГОСТ 9490–75. Коэффициент трения измеряли на машине «СМЦ-2» (Ивановский ЗИП, Россия) по методике РД 50-662–88, при схеме трения «вал – частичный вкладыш» из стали.

При отсутствии на графиках и в таблицах разброса экспериментальных данных в работе приводятся средние значения оцениваемых параметров по результатам трех измерений. При указании доверительного интервала результаты были получены не менее чем на пяти измерениях с доверительной вероятностью 95% (α=0,05).

В третьей главе решалась задача научного обоснования выбора базового растительного масла для разработки экологичных смазочных материалов. Ее решение осуществлялось на основе комплексной экспериментальной оценки и сравнительного анализа свойств масел с применением методов многокритериальной оптимизации.

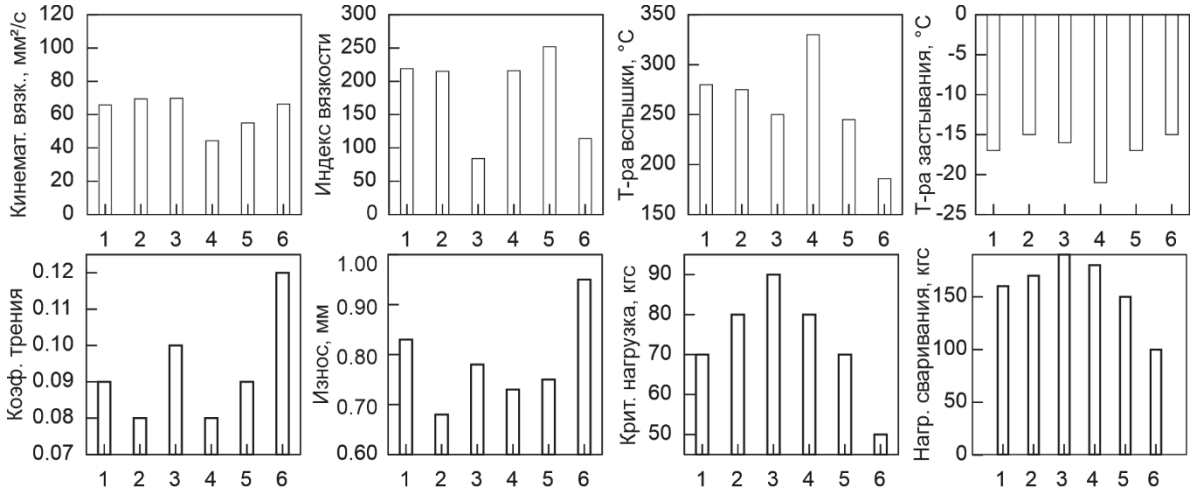
Приведены результаты оценки жирнокислотного состава растительных масел, выбранных в качестве объектов исследования (таблица 1). Представлены результаты комплексной оценки физико-механических свойств и триботехнических характеристик растительных масел в сопоставлении с минеральными индустриальными маслами (рисунок 1).

Таблица 1 – Жирнокислотный состав исследованных растительных масел

Жирнокислотный состав, масс.%	Растительное масло				
	РП	РТ	КТ	ЛП	ПП
С14:0 Миристиновая	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
С16:0 Пальмитиновая	5,0	5,1	1,1	5,5	6,5
С16:1 Пальмитолеиновая	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1
С18:0 Стеариновая	2,1	1,8	1,3	3,5	3,2
С18:1 Олеиновая	62,3	59,9	3,0	16,1	27,6
С18:2 Линолевая	21,0	20,5	4,6	17,0	61,0
С18:3 Линоленовая	7,2	9,6	0,6	57,4	0,1
С20:1 Эйкозеновая	1,4	1,5	0,4	0,2	0,4
С22:0 Бегеновая	0,3	0,3	0,0	0,1	0,9
С22:1 Эруковая	0,4	1,0	0,1	0,1	0,1
С18:1 Рицинолевая	-	-	88,9	-	-

Сравнение с минеральными маслами показало, что растительные масла в целом превосходят минеральные аналоги по комплексу антифрикционных и противоизносных свойств. Экспериментально показано, что особенности жирнокислотного состава масел коррелируют с их функциональными

характеристиками. Масла с преобладанием моно- и полиненасыщенных кислот (рапсовое, льняное) характеризуются склонностью к трибополимеризации с образованием защитных пленок на поверхностях трения, но обладают низкой окислительной стабильностью.



1 – РП; 2 – РТ; 3 – КТ; 4 – ЛП; 5 – ПП; 6 – И-20А

Рисунок 1 – Результаты оценки физико-механических свойств и триботехнических характеристик масел

Для выбора базового масла предложен и реализован многокритериальный анализ их функциональных характеристик на основе метода многомерного шкалирования. Каждое масло представлялось точкой в многомерном пространстве их нормализованных функциональных характеристик. Начало координат соответствовало гипотетическому наихудшему варианту, а выбор оптимума осуществлялся по максимальному расстоянию от него. Это расстояние рассматривалось как интегральный показатель качества. Результаты анализа позволили обосновать выбор рапсового технического масла в качестве базового сырья для разработки жидких и пластичных смазок (рисунок 2).

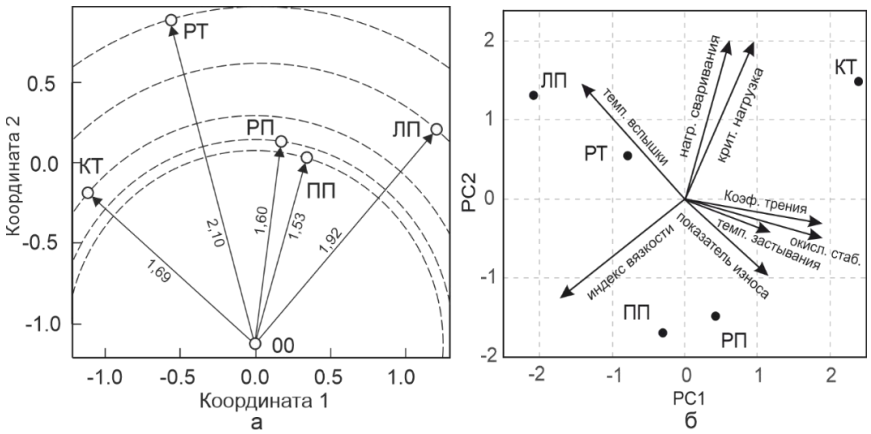


Рисунок 2 – Результаты анализа триботехнических характеристик растительных масел: а – ранжирование растительных масел по интегральному показателю функциональных свойств (метод многомерного шкалирования); б – факторная карта дифференциации растительных масел по функциональным свойствам (метод главных компонент)

Анализ факторной карты триботехнических характеристик растительных масел (рисунок 2, б) позволил выявить различие образцов по отдельным показателям, определить группы сходных масел и установить вклад отдельных характеристик в их дифференциацию. Установлено, что коэффициент трения и показатель износа возрастают с ростом окислительной стабильности масел. Показано, что рапсовое техническое, льняное и касторовое масла по отдельности обладают свойствами, совокупность которых формирует оптимальное сочетание триботехнических характеристик. На основании полученных данных сформулирован новый принцип проектирования рецептур биоразлагаемых смазочных материалов, заключающийся в добавлении к базовому маслу компонентов с различным типом окислительного поведения и адгезии к поверхностям, что должно обеспечивать комплексное улучшение их функциональных характеристик.

Представлены результаты изучения механизмов деградации растительных масел при трении в зависимости от их жирнокислотного состава. Установлено, что для масел с преимущественным содержанием триглицеридов мононенасыщенных жирных кислот статистически значимая корреляция между кислотным числом и показателем износа отсутствует (p-value $>$ 0,05). В совокупности с пропорциональным уменьшением концентрации свободных жирных кислот это свидетельствует о протекании процессов механической деструкции. Для масел, содержащих преимущественно триглицериды полиненасыщенных жирных кислот, рост кислотного числа демонстрирует сильную положительную корреляцию с показателем износа (r = 0,98). Характер зависимости имеет вид кривой с насыщением, что указывает на протекание термоокислительной деградации с формированием защитных трибополимерных слоев на поверхностях трения (рисунок 3).

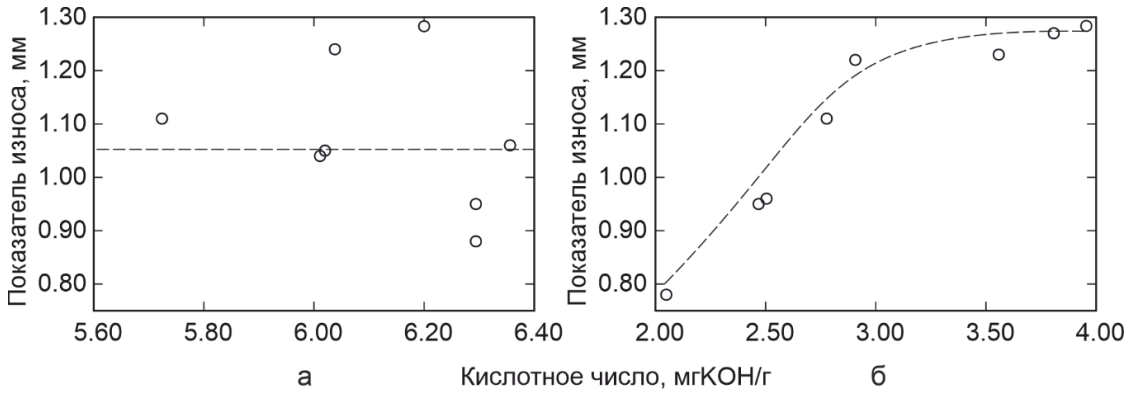


Рисунок 3 – Зависимость показателя износа от кислотного числа масла: а – рапсовое масло; б – льняное масло

Полученные результаты позволили подтвердить перспективность предложенного принципа создания рецептур биоразлагаемых смазочных материалов, заключающегося не в полном подавлении процессов окисления, а в их

целенаправленном использовании путем введения в стабильное базовое масло (рапсовое) контролируемого количества компонентов, склонных к трибополимеризации и обладающих высокой адгезией (льняное и касторовое масла), с целью придания смазочным композициям комплекса улучшенных функциональных характеристик.

В четвертой главе представлены результаты разработки смазочного материала на основе базового рапсового масла, включающие исследования и оптимизацию его функциональных характеристик.

Согласно предложенному принципу, повышение противозадирных и противоизносных свойств базового рапсового масла осуществлялось введением льняного и касторового масел. Их оптимальная концентрация определялись методом математического планирования. Для построения моделей зависимостей триботехнических характеристик от концентраций касторового и льняного масел (z_1 и z_2) применялся метод центрального ротатабельного планирования второго порядка. В качестве целевых параметров выступали: показатель износа (y_1), критическая нагрузка (y_2), нагрузка сваривания (y_3) и коэффициент трения (y_4). В результате реализации матрицы планирования, включавшей 10 экспериментов, были определены коэффициенты регрессионных квадратичных моделей вида:

$$y_i = b_{i0} + b_{i1}z_1 + b_{i2}z_2 + b_{i12}z_1z_2 + b_{i11}z_1^2 + b_{i22}z_2^2 \qquad (1)$$

где b_{i0} – среднее значение отклика на i-й целевой параметр;
b_{i1},b_{i2} – коэффициенты, описывающие влияние касторового и льняного масел;
b_{i12} – коэффициенты совместного влияния касторового и льняного масел их;
b_{i11},bi_{22} – коэффициенты нелинейного влияния.

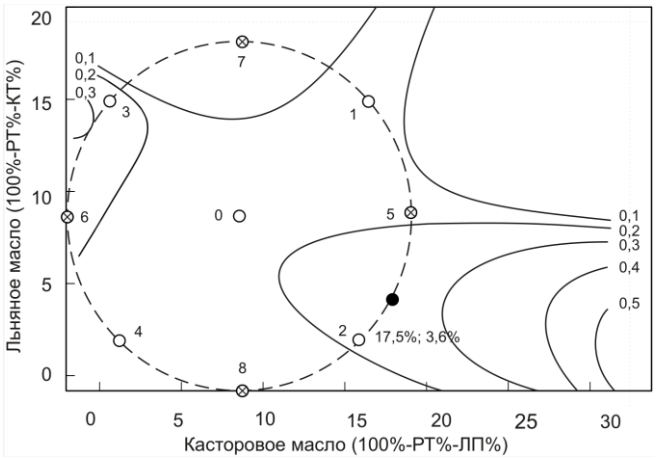


Рисунок 4 – План факторного пространства оптимизации состава масел с изолиниями значений функции «желательности»

Оптимизация целевых параметров проводилась методом расчета функций желательности. Установлено, что оптимальные триботехнические характеристики композиционного смазочного материала достигаются при введении в рапсовое масло 17,5 масс.% касторового и 3,6 масс.% льняного масел (рисунок 4).

Разработанная композиция рапсового, касторового и льняного масла (РКЛ)

продемонстрировала синергетическое действие, обеспечив комплексное улучшение триботехнических характеристик: показатель износа снижен на 25–46%, а критические нагрузка и нагрузка сваривания увеличены на 17–124% по сравнению с исходными рапсовым, касторовым и льняным маслами и минеральным аналогом И-20А (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительная характеристика разработанного смазочного материала РКЛ

Параметры	Масло				
	РКЛ	РТ	КТ	ЛП	И-20А
Показатель износа, мм	0,51	0,68	0,78	0,73	0,95
Критическая нагрузка, кгс	106	80	90	80	50
Нагрузка сваривания, кгс	224	170	190	180	100
Коэффициент трения	0,13	0,08	0,10	0,08	0,12

Представлены результаты повышения окислительной стабильности разработанного смазочного материала, основанные на использовании экологически безопасной антиокислительной системы токоферол–агидол-1 (ТФ/АГ).

Установлено, что данная пара в соотношении 1:2 (ТФ/АГ) реализует принцип «активный антиоксидант – регенератор», где второй компонент обеспечивает восстановление рабочей формы первого, что позволяет в 4,3 раза повысить окислительную стабильность исходного смазочного состава РКЛ при концентрациях 0,5–1,0 масс.% (таблица 3).

Таблица 3 – Окислительная стабильность композиции РКЛ с присадками

Смазочная композиция	Содержание присадок, масс.%					
	0,0	0,5	1,0	1,5	3,0	5,0
РКЛ	0,75	–	–	–	–	–
РКЛ+ТФ	–	1,59	2,03	2,50	2,60	2,80
РКЛ+АГ	–	2,35	3,10	за время испытаний не окислилось		
РКЛ+ТФ/АГ	–	3,21	за время испытаний не окислилось			

Показано, что предложенная антиокислительная система оказывает комплексное действие за счет ингибирования окислительной деградации и способности агидола-1 адсорбироваться на металле. В совокупности это увеличивает ресурс смазочного материала и улучшает его триботехнические характеристики.

Приведены результаты влияния структурной модификация триглицеридов методами этерификации, переэтерификации и амидирования на триботехнические характеристики и физико-механические свойства растительных масел. Установлено, что модификация растительных масел этаноламином обеспечивает снижение показателя износа на 25%, что подтверждает роль -NH групп в формировании эффективного граничного слоя. Применение парных комбинаций реагентов позволило достичь снижения износа на 8-20%, но не

компенсировало ухудшения других параметров, а тройные композиции не показали преимуществ перед исходным образцом.

Исследовано влияние мелкодисперсных наполнителей MoS_2, WS_2, гексагонального нитрида бора hBn и графена Gr на противоизносные свойства разработанной композиции РКЛ.

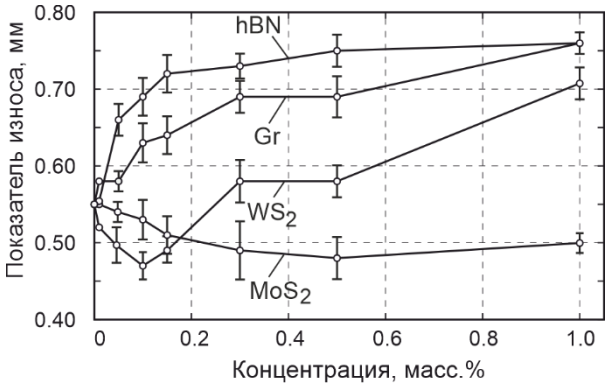


Рисунок 5 – Зависимость показателя износа от содержания дисперсных добавок в базовом растительном масле РКЛ

Установлена ограниченная эффективность применения дисперсных наполнителей в жидких смазочных материалах. Показано, что только дисульфиды молибдена и вольфрама в диапазоне концентраций 0,05-0,20 масс% (рисунок 5) способствуют снижению показателя износа на 10-18%. При этом графит и нитрид бора проявляли абразивное действие даже при минимальных концентрациях, а дисульфид вольфрама обеспечивал наибольший эффект при содержании 0,10 масс.%.

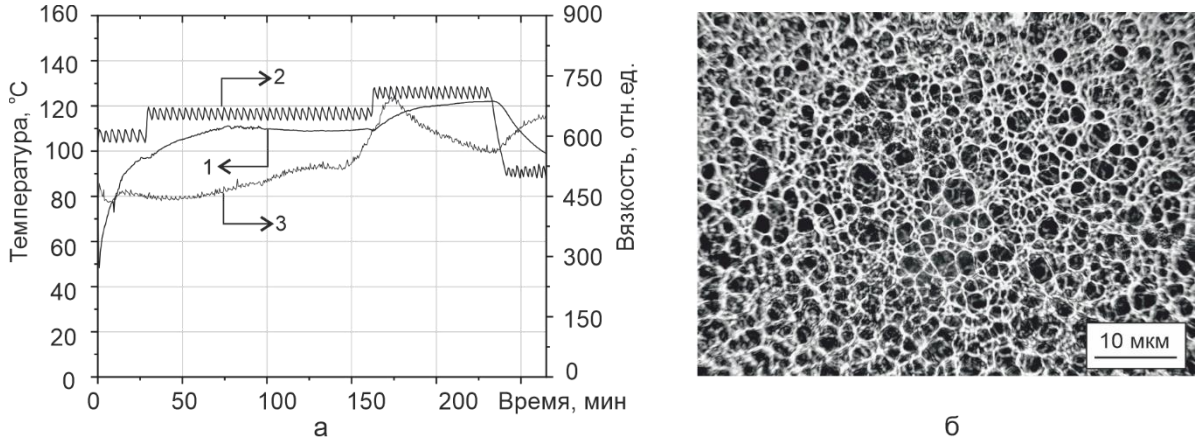
Пятая глава посвящена разработке пластичных смазочных материалов (ПСМ) с дисперсионной средой на основе растительного сырья, оптимизации их состава и технологии изготовления, а также структурной модификации и созданию специальных композиций.

На основе рангового сравнительного анализа триботехнических, эксплуатационных и технологических характеристик различных типов загустителей (натриевых, алюминиевых, кальциевых и литиевых) показано, что для создания биоразлагаемых пластичных смазок предпочтительным является кальциевый загуститель, обеспечивающий наилучший баланс функциональных свойств и технологичности.

Разработана базовая лабораторная методика получения кальциевых пластичных смазок прямым методом («мыло в масле») с использованием в качестве дисперсионной среды индустриального масла И-40А. Данная схема была адаптирована и оптимизирована для создания смазок на основе композиции растительных масел (рапсового, касторового и льняного, РКЛ). Для сокращения объема экспериментов оптимизация проводилась в два этапа.

На первом этапе методом центрального композиционного ротатабельного планирования эксперимента были определены минимально необходимые время и температура обработки реакционной смеси для достижения требуемых триботехнических и физико-механических показателей. В качестве целевых откликов заданы: минимальный показатель износа, предел прочности на

сдвиг не менее 250 Па, коллоидная стабильность не более 15% и температура каплепадения не ниже 120 °С. Реализация плана из 15 опытов позволила определить оптимальные режимы: время омыления 110,6 мин, время термообработки 57,3 мин при температуре 118,5 °С (рисунок 6 а).



1 – температура теплоносителя; 2 – температура реакционной смеси; 3 – изменение вязкости реакционной смеси

Рисунок 6 – Оптимизированный процесс изготовления пластичной смазки на основе смеси РКЛ: а – график изменения параметров процесса; б – структура смазки

На втором этапе было проведено уточнение оптимальной концентрации дисперсной фазы (кальциевого загустителя). В результате серии экспериментов с содержанием загустителя от 10 до 20 масс.% установлена его оптимальная концентрация, составляющая 15–16 масс.%. Полученные образцы смазок (рисунок 6 б) продемонстрировали преимущество над индустриальными аналогами («Солидол С», «Солидол Ж»): показатель износа ниже в 1,2–1,5 раза, температура каплепадения выше в 1,5 раза при сохранении коллоидной стабильности на уровне 7–15% и предела прочности 306–335 Па (таблица 4).

Таблица 4 – Сравнительные характеристики разработанных пластичных смазочных материалов с промышленными аналогами

Смазка	Показатель износа, мм	Температура каплепадения, °С	Коллоидная стабильность %	Предел прочности на сдвиг при 50 °С, Па
К15Б	0,75	143	16	306
К16Б	0,76	145	7	335
Солидол Ж	1,10	99	15	290
Солидол С	0,93	95	11	224

По результатам исследований получена одна приоритетная справка на созданные смазочные материалы. Разработаны и зарегистрированы технические условия на пластичный смазочный материал из растительного сырья «Смазка ЭКСМ-1».

Разработана комплексная кальциевая смазка с введением уксусной

кислоты в качестве модификатора структуры. Показано, что комплексообразование способствует значительному повышению термостойкости материала (температура каплепадения до 297 °С), что превосходит показатель промышленных аналогов («Солидол С», «Солидол Ж») в 2,9–3,1 раза.

Исследовано влияние дисперсных наполнителей MoS_2, WS_2 и политетрафторэтилена (ПТФЭ) на свойства созданной пластичной смазки К15Б. Установлено, что введение 3–5 масс.% данных наполнителей способствует снижению показателя износа в 1,05–1,1 раз без существенного изменения реологических характеристик смазочного пластичного материала К15Б.

Представлены результаты разработки электроконтактных пластичных смазок на минеральной (ЦИАТИМ-201) и растительной (К15Б) основе, наполненные омедненным графитом. Установлены оптимальные концентрации наполнителя (20–25 масс.% для минеральной и 10–15 масс.% для растительной основы), обеспечивающие требуемый баланс электропроводности, механической прочности и триботехнических характеристик (рисунок 7).

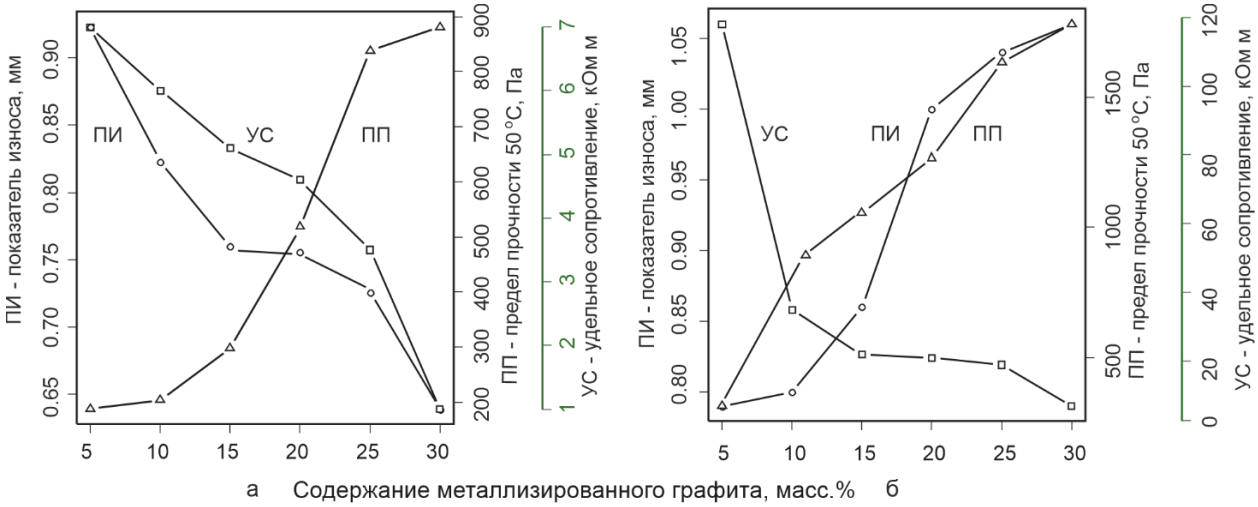


Рисунок 7 – Зависимость функциональных показателей разработанных электроконтактных смазок от содержания металлизированного графита: а – смазка на основе ЦИАТИМ-201; б – смазка на основе К15Б

Смазки успешно апробированы в реальных условиях. По результатам исследования разработан и зарегистрирован лабораторно-технологический регламент получения пластичного смазочного материала СК-1 для электрических контактов.

Проведены исследования воздействия разработанной кальциевой пластичной смазки на основе смеси РКЛ на индикаторные и почвенные микроорганизмы (*Escherichia coli M-17* и *Azotobacter chroococcum*). Установлено, что исследуемый материал не оказывает ингибирующего или токсичного действия на бактериальные культуры, что подтверждает его биосовместимость и возможность применения в экологически чувствительных областях (сельское и лесное хозяйство, рекреационные и природоохранные зоны).

В шестой главе представлены результаты практического применения диссертационных исследований.

Осуществлена нормативно-правовая защита разработанных решений. Получены 4 патента на изобретения, зарегистрированы 2 технических условия («Смазка «Био-ГрОИЛ»» ТУ BY 400084698.3272-023 и «Смазка «ЭКСМ-1»» ТУ BY 400084698.328-2024) на смазочные составы на основе растительного сырья. Созданы методики экспресс-контроля их свойств, что формирует основу для стандартизации и контроля качества биосмазок (ПМИ №063-2018, ПМИ №076-2021 и ПМИ №080-2022).

Результаты диссертационного исследования использованы при выполнении заданий в рамках государственных научно-исследовательских программ и проектов БРФФИ, внедрены в научно-образовательный процесс подготовки инженерных кадров в УО «Белорусском государственном университете транспорта».

Проведены успешные испытания разработанных материалов на предприятиях различных отраслей (ОАО «Гомельстекло», ГОЛХУ «Буда-Кошелевский опытный лесхоз», ОАО «МТЗ», КУП «Горэлектротранспорт», Белорусской антарктической экспедиции ГУ «Республиканский центр полярных исследований», СОФ 4РУ ОАО «Беларуськалий»), что подтверждается соответствующими актами, подтверждающих работоспособность разработанных в ходе диссертационных исследований смазочных материалов.

Подтверждена возможность применения биодеградируемых материалов в экологически чувствительных зонах. Использование пластичной смазки «ЭКСМ-1» и электроконтактного смазочного материала в ходе 17-й Белорусской антарктической экспедиции продемонстрировало их эксплуатационную надежность в экстремальных условиях.

Апробация результатов исследований показала, что разработанные биодеградируемые и специальные смазочные материалы обладают необходимым функционалом для ряда применений, а созданная нормативная и методическая база позволяет рассматривать их для импортозамещения и перехода к более экологичным промышленным технологиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Выявлены два основных механизма деградации растительных масел в условиях трения. Показано, что для масел с преобладанием мононенасыщенных жирных кислот характерна механическая деструкция молекул триглицеридов под действием высоких сдвиговых усилий, давлений и температур в зоне контакта. Для масел с высоким содержанием полиненасыщенных кислот

преобладает термоокислительная деградация, что подтверждается статистически значимым ростом кислотного числа и его корреляцией с износом [2– А,12–А,14–А,18–А,21–А,22–А].

2. Многокритериальным статистическим анализом доказана оптимальность выбора рапсового технического масла в качестве базовой основы смазочных материалов, превосходящей по своим функциональным характеристикам другие растительные масла на 15–20%, а минеральные аналоги в 1,2–1,7 раза. Отмечена роль окислительных процессов растительных масел при трении, заключающаяся в формировании трибополимерных защитных пленок на контактирующих поверхностях, что позволило предложить использование смесей растительных масел с разным жирнокислотным составом и определить методами математического планирования эксперимента оптимальную композицию на основе рапсового масла с добавлением 17,5% касторового и 3,6% льняного масел, превосходящую минеральный аналог И-20А по показателю износа на 46,3%, критической нагрузки на 112%, и нагрузки сваривания на 124% [10–А,19–А,23–А,27–А,28–А].

3. Разработана экологически безопасная антиокислительная композиция на основе синергетической смеси токоферола и агидола-1 (в соотношении 2:1), в которой агидол-1 регенерирует антиокислительную активность токоферола в процессе эксплуатационной деградации. Экспериментально определена оптимальная концентрация присадки в масле 0,5 – 1,0 масс.%, повышающая окислительную стабильность в 2,1 – 4,3 раза. Предложены методы структурной модификации растительных масел с целью достижения улучшенных функциональных характеристик и получения функциональных присадок. На основе продукта модификации рапсового масла янтарной кислотой разработана противоизносная присадка, обеспечивающая при концентрации 0,10 – 0,20 масс.% снижение износа при трении в среде растительных и минеральных масел в 1,7 – 1,9 раза [11–А,16–А,17–А,20–А,30–А,39–А].

4. Разработаны технологические принципы получения экологичных пластичных смазок на основе растительных масел с кальциевым загустителем. Определены оптимальные параметры процесса их получения (время омыления 110 мин, термообработка 57 мин при 118 °С) и содержание дисперсной фазы 15 – 16 масс.%, что обеспечивает получение простых и комплексных пластичных смазочных материалов с показателем износа ниже в 1,1 – 1,5 раз и температуре каплепадения в 1,5 – 3,0 раза выше, чем у промышленных аналогов «Солидол С» и «Солидол Ж». Экспериментально доказана биологическая безопасность разработанных смазок на основные почвенные азотфиксирующие культуры *Azotobacter chroococcum* и индикаторные штаммы *Escherichia coli M-17* [7–А,29–А,35–А,37–А,38–А,40–А].

5. На основе экспериментальных исследований разработаны

конкурентоспособные экологичные смазочные материалы, включая индустриальное масло на основе смеси растительных масел, простую и комплексную пластичные кальциевые смазки, консервационные и электроконтактные пластичные смазочные материалы с экологически безопасными присадками и дисперсными наполнителями [1–А,3–А,4–А,6–А,8–А,9–А,13–А,24–А,26–А,31–А,32–А,33–А,34–А,36–А].

6. Новизна и практическая значимость работы подтверждаются патентами на изобретения, разработкой комплекса нормативно-технической документации, созданием технических условий, методов испытаний, контроля свойств и успешной апробацией разработанных материалов в промышленных условиях, сельскохозяйственной и лесной технике и в природоохранной зоне Антарктиды [5–А,15–А,25–А,41–А,42–А,43–А,44–А,45–А].

Рекомендацию к практическому использованию результатов

Предложенные технические решения представляют собой экологически безопасные аналоги индустриальных масел и пластичных смазок общего назначения. Их применение рекомендовано на промышленных предприятиях, в электротранспорте, а также в технике, используемой в сельском, лесном и коммунальном хозяйстве, в том числе на территориях зон с особыми требованиями к охране экологии. Внедрение данных материалов будет способствовать развитию национального сегмента «зеленых» технологий в соответствии с принципами устойчивого развития. Теоретические результаты работы могут быть использованы в учебном процессе.

Соискатель: Ф.А. Григорьев

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии и главы в монографиях

1-А. Grigoriev, F.A. Bio-lubricants in tribology / F.A. Grigoriev, N.K. Myshkin // Biotribology of Engineering Materials: Principles, Modeling, and Applications / ed. by A. Abdelbary, M.T. Mathew. – Amsterdam : Elsevier, 2026. – Ch. 8. – P. 193–210.

Статьи в рецензируемых журналах

2–А. Ковалева, И.Н. Коррозионное воздействие и окисление растительных масел, используемых в смазочных материалах / И.Н. Ковалева, Ф.А. Григорьев // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 6. – С. 684–688.

3–А. Падгурскас, Ю. Эффективность применения модификатора трения в двигателях внутреннего сгорания по результатам натурных испытаний / Ю. Падгурскас, Е. Яскаускас, Р. Рукуйжа, И.Н. Ковалева, Ф.А. Григорьев // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 5. – С. 641–646.

4–А. Колесников, И.В. Фосфатная керамика как многофункциональная присадка к пластичным смазкам / И.В. Колесников, М.А. Савенкова, А.П. Сычев, С.А. Воляник, Д.Н. Шишияну, И.Н. Ковалева, Ф.А. Григорьев // Трение и износ. – 2022. – Т. 43, № 2. – С. 221–227.

5–А. Мышкин, Н.К. Цели устойчивого развития и зеленая трибология / Н.К. Мышкин, Ф.А. Григорьев // Пожарная и аварийная безопасность. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 44–47.

6–А. Гуцев, Д.М. Функциональные характеристики электроконтактной пластичной смазки / Д.М. Гуцев, Ф.А. Григорьев, Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 1. – С. 68–74.

7–А. Григорьев, Ф.А. Оптимизация концентрации антиокислительной присадки в пластичном смазочном материале на основе рапсового масла / Ф.А. Григорьев, В.В. Подгорная, Л.Н. Марченко, И.Н. Ковалева // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – № 3 (64). – С. 66–72.

8–А. Nguyen V. T. Preparation, thermal and lubricant properties of paraffin based nanofluid containing boron nitride nanoplatelets / V. T. Nguyen, T. H. Tran, D. C. Nguyen, T. Do, V. H. Nguyen, F. A. Grigoriev, N. K. Myshkin // Materials Letters. – 2025. – Vol. 381. – Art. 137765.

9–А. Григорьев, Ф.А. Влияние введения одностенных углеродных нанотрубок на триботехнические характеристики минеральных и растительных масел / Ф.А. Григорьев, В.П. Селькин // Системы Методы Технологии. – 2025. – № 3 (67). – с. 14–19.

10–А. Григорьев, Ф.А. Многокритериальный анализ и сравнение триботехнических характеристик и физико-механических свойств растительных масел при выборе основы смазочных материалов / Ф.А. Григорьев // Трение и износ. – 2026. – Т. 47, № 1. – С. 97–104.

11–А. Григорьев, Ф.А. Экологически безопасные антиокислительные присадки к индустриальному маслу на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев, Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 2026. – Т. 47, № 5. – С. 448–455.

Статьи в сборниках трудов и материалов конференций

12–А. Ковалева, И.Н. Оценка коррозионной активности и окислительной стабильности растительных масел / И.Н. Ковалева, Ф.А. Григорьев // Трибология – машиностроению : сб. тр. XII Междунар. науч. конф., посв. 80-летию ИМАШ РАН. – Москва : ИМАШ РАН, 2018. – С. 232–233.

13–А. Григорьев, Ф.А. Влияние углеродных и алюмосиликатных наполнителей на триботехнические характеристики рапсового масла / Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева // Трибология – машиностроению : сб. тр. XIII Междунар. науч. конф. – Москва : ИМАШ РАН, 2020. – С. 93–96.

14–А. Григорьев, Ф.А. Триботехнические свойства, коррозионная активность и окислительная стабильность растительных масел / Ф.А. Григорьев // Творчество молодых : сб. работ студентов, магистрантов и аспирантов : в 4 ч. – Гомель : ГГУ, 2018. – Ч. 1. – С. 47–51.

15–A. Myshkin, N.K. Green Tribology for Sustainable Development Goals / N.K. Myshkin, Ф.А. Григорьев // Proceedings of I4SDG workshop 2021. IFToMM for Sustainable Development Goals : conference proceedings / eds. G. Quaglia [et al.]. – Switzerland : Springer, 2022. – P. 421–428.

16–А. Григорьев, Ф.А. Оптимизация температуры введения антиокислительных присадок к биодеградируемым пластичным смазкам / Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева, Л.Н. Марченко, В.В. Подгорная // Трибология – машиностроению 2022 : сб. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Москва : ИМАШ РАН, 2022. – С. 93–96.

17–А. Григорьев, Ф.А. Триботехнические свойства пластичной смазки на основе рапсового масла, модифицированной дифениламином при разных температурах / Ф.А. Григорьев. И.В. Колесников, А.П. Сычев, И.Н. Ковалева // Труды Ростовского гос. ун-та путей сообщения. – 2023. – № 1. – С. 36–40.

Тезисы докладов конференций

18–А. Ф.А. Григорьев. Коррозионная активность смазки на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : тез. докл. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2018. – С. 33–36.

19–А. Григорьев, Ф.А. Смазочные материалы на основе смесей растительных масел с добавлением функциональных присадок / Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева // Новые функциональные материалы : тез. докл. VI Республ. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Гомель, 2020. – С. 139–140.

20–А. Григорьев, Ф.А. Применение базовых типов присадок к смазочному материалу на основе рапсового масла // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2019. – С. 186.

21–А. Григорьев, Ф.А. Триботехнические свойства рафинированных растительных масел / Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. IV Республ. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Гомель, 2016. – С. 73–75.

22–А. Григорьев, Ф.А. Окислительная стабильность смазочных материалов на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев, И.Н. Ковалева // Актуальные вопросы физики и техники : тез. докл. VII Республ. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. – Гомель, 2018. – С. 61–64.

23–А. Григорьев, Ф.А. Индустриальное базовое масло на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. V Республ. науч.техн. конф. молодых ученых. – Гомель, 2018. – С. 68–69.

24–А. Григорьев, Ф.А. Влияние мелкодисперсных присадок на триботехнические свойства смазочных материалов на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев // Молодежь в науке – 2021 : тез. докл. XVIII междунар. науч. конф. – Минск, 2021. – С. 229–232.

25–А. Гуцев, Д.М. Оценка перспективы использования экологически безопасных смазочных материалов / Д.М. Гуцев, Ф.А. Григорьев, А.А. Грапов // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : тез. докл. 5-й междунар. науч.-практ. конф. – Гомель, 2021. – С. 30–31.

26–А. Григорьев, Ф.А. Подбор электропроводящих и антифрикционных дисперсных присадок к электроконтактным смазочным материалам / Ф.А. Григорьев, А.А. Грапов, Д.М. Гуцев, И.Н. Ковалева, Н.К. Мышкин // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : тез. докл. 5-й междунар. науч.-практ. конф. – Гомель, 2021. – С. 30–31.

27–А. Григорьев, Ф.А. Параметрическая классификация типов масел по диаметру пятна контакта / Ф.А. Григорьев, В.В. Подгорная, Л.Н. Марченко, И.Н. Ковалева // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2019. – С. 71.

28–А. Григорьев, Ф.А. Статистическая оценка параметрической эквивалентности триботехнических испытаний смазочных материалов на основе растительных масел : тез. докл. / Ф.А. Григорьев, В.В. Подгорная, Л.Н. Марченко, И.Н. Ковалева // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2019. – С. 72.

29–А. Григорьев, Ф.А. Подбор дисперсионной среды из растительного сырья для пластичных смазочных материалов / Ф.А. Григорьев, Н.К. Мышкин

// Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : тез. докл. XXII междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2022. – С. 14–16.

30–А. Григорьев, Ф.А. Использование антиокислительной присадки к дисперсионной среде из растительного сырья для пластичных смазочных материалов / Ф.А. Григорьев, Д.М. Гуцев, И.Н. Ковалева, Н.К. Мышкин // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2022. – С. 60.

31–А. Григорьев, Ф.А. Статистический анализ процессов электроконтактного взаимодействия металлов в среде электропроводной смазки / Ф.А. Григорьев, В.В. Подгорная, Л.Н. Марченко, И.Н. Ковалева // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2022. – С. 77.

32–А. Григорьев, Ф.А. Сравнение показателей электроконтактных смазочных материалов на литиевой и кальциевой основе / Ф.А. Григорьев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. VII Республ. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Гомель, 2022. – С. 73–75.

33–А. Григорьев, Ф.А. Электрофизические характеристики электроконтактного смазочного материала / Ф.А. Григорьев // Молодежь в науке – 2022 : тез. докл. XVIII междунар. науч. конф. – Минск, 2022. – С. 471–474.

34–А. Селькин, В.П. Повышение противоизносных свойств индустриального масла путем введения одностенных углеродных нанотрубок / В.П. Селькин, Ф.А. Григорьев, С.В. Копылов // Наука – Общество – Технологии – 2023 : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Москва, 2023. – С. 227–231.

35–А. Григорьев, Ф.А. Подбор базового загустителя для пластичных смазочных материалов на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев // Молодежь в науке – 2023 : тез. докл. XIX междунар. науч. конф. – Минск, 2023. – С. 573–576.

36–А. Селькин, В.П. Влияние введения одностенных углеродных нанотрубок в смазки на минеральной и растительной основе на коэффициент трения контактной пары сталь–сталь / В.П. Селькин, Ф.А. Григорьев, О.С. Стерехов // Наука – Общество – Технологии – 2024 (SST-2024) : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Москва, 2024. – С. 263–267.

37–А. Григорьев, Ф.А. Использование ацетата кальция в качестве модификатора структуры простой кальциевой смазки на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев, Ю.М. Юркова // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. VIII Республ. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Гомель, 2024. – С. 98–99.

38–А. Григорьев, Ф.А. Разработка кальциевого пластичного смазочного материала с дисперсионной средой на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. VIII Республ. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Гомель, 2024. – С. 86–87.

39–А. Григорьев, Ф.А. Химическая модификация индустриального масла на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев, Ю.М. Юркова // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2025. – С. 52.

40–А. Григорьев, Ф.А. Влияние пластичных смазочных материалов на бактериальные культуры Azotobacter chroococcum и Escherichia coli М-17 / Ф.А. Григорьев, Д.И. Мисюля, Ю.М. Юркова // Полимерные композиты и трибология : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Гомель, 2025. – С. 87.

Патенты

41–А. Смазочная композиция: пат. BY 24465 / Ф.А. Григорьев, В.П. Селькин. – Заявл. 27.03.2023.

42–А. Смазочная композиция: пат. BY 24464 / В.П. Селькин, Ф.А. Григорьев. – Заявл. 27.03.2023.

43–А. Смазочная композиция: пат. RU 2839042 / В.П. Селькин, Ф.А. Григорьев

44–А. Смазочная композиция: пат. RU 2851803 / Ф.А. Григорьев, В.П. Селькин

45–А. Пластичная смазка на биоразлагаемой основе : заявка на выдачу патента Респ. Беларусь на изобретение № a20250147 / Ф. А. Григорьев, В. П. Селькин, В. Т. Нгуен, В. Х. Тран, В. Т. Фам, Д. Ф. Доан. – № a20250147 ; заявл. 27.06.2025.

РЭЗЮМЭ

Грыгор’еў Фёдар Андрэевіч

Распрацоўка экалагічных змазачных матэрыялаў на аснове раслінных алеяў з рэгуляванымі трыбатэхнічнымі характарыстыкамі

Ключавыя словы: раслінныя алеі, трэнне і знос, вадкія, пластычныя і спецыяльныя змазочныя матэрыялы, экалагічна бяспечныя прысадкі.

Мэта даследавання: Распрацоўка экалагічных змазачных матэрыялаў (вадкіх і пластычных) і спецыяльных змазак на аснове кампазіцый раслінных алеяў і экалагічна бяспечных мадыфікатараў, а таксама вывучэнне механізмаў трэння пры іх выкарыстанні.

Метады даследавання: трыбатэхнічныя выпрабаванні, метады ацэнкі фізіка-механічных характарыстык алеяў, газавая храматаграфія, расцровая і аптычная мікраскапія, матэматычныя метады планавання эксперыменту.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню выяўлены і класіфікаваны два асноўных механізму эксплуатацыйнай дэградацыі раслінных алеяў пры трэнні. Распрацаваны метад шматкрытэрыяльнага выбару сыравіны для раслінных змазак. Сфармуляваны новы прынцып праектавання рэцэптур біярасладальных змазачных матэрыялаў, заснаваны на выкарыстанні раслінных алеяў з розным тыпам акісляльных паводзін. Вызначаны аптымальныя саставы і тэхналагічныя рэжымы атрымання змазак на аснове раслінной сыравіны. Распрацаваны і апрабаваны вадкія, пластычныя і электроконтактные якія змазваюць матэрыялы з комплексам характарыстак, не якія саступаюць мінеральным аналогам.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: прапанаваныя тэхнічныя рашэнні ўяўляюць сабой экалагічна бяспечныя аналагі індустрыяльных алеяў і пластычных змазак агульнага прызначэння. Распрацаваныя рэцэптуры і тэхнічныя ўмовы рэкамендуюцца для імпартазамяшчэння традыцыйных змазак і арганізацыі іх серыйнай вытворчасці.

Вобласць прымянення: прымяненне распрацаваных змазачных матэрыялаў магчыма на прамысловых прадпрыемствах, на электратранспарце, а таксама ў тэхніцы, якая выкарыстоўваецца ў сельскай, лясной і камунальнай гаспадарцы, у тым ліку на тэрыторыях рэкрэацыйных зон. Склады электраканктактавых і кансервацыйных змазачных матэрыялаў эфектыўныя ў экстрэмальных кліматычных умовах і ў экалагічна адчувальных рэгіёнах з высокай рызыкай уцечак.

РЕЗЮМЕ

Григорьев Фёдор Андреевич

Разработка экологичных смазочных материалов на основе растительных масел с регулируемыми триботехническими характеристиками

Ключевые слова: растительные масла, трение и износ, жидкие, пластичные и специальные смазочные материалы, экологически безопасные присадки.

Цель исследования: Разработка экологичных смазочных материалов (жидких и пластичных) и специальных смазок на основе композиций растительных масел и экологически безопасных модификаторов, а также изучение механизмов трения при их использовании.

Методы исследования: триботехнические испытания, методы оценки физико-механических характеристик масел, газовая хроматография, растровая и оптическая микроскопия, математические методы планирования эксперимента.

Полученные результаты и их новизна: впервые выявлены и классифицированы два основных механизма эксплуатационной деградации растительных масел при трении. Разработан метод многокритериального выбора сырья для растительных смазок. Сформулирован новый принцип проектирования рецептур биоразлагаемых смазочных материалов, основанный на использовании растительных масел с разным типом окислительного поведения. Определены оптимальные составы и технологические режимы получения смазок на основе растительного сырья. Разработаны и апробированы жидкие, пластичные и электроконтактные смазочные материалы с комплексом характеристик, не уступающих минеральным аналогам.

Рекомендации по использованию: предложенные технические решения представляют собой экологически безопасные аналоги индустриальных масел и пластичных смазок общего назначения. Разработанные рецептуры и технические условия рекомендуются для замещения традиционных смазок и организации их серийного производства.

Область применения: применение разработанных смазочных материалов возможно на промышленных предприятиях, на электротранспорте, а также в технике, используемой в сельском, лесном и коммунальном хозяйстве, в том числе на территориях рекреационных зон. Составы электроконтактных и консервационных смазочных материалов эффективны в экстремальных климатических условиях и в экологически чувствительных регионах с высоким риском утечек.

SUMMARY

Grigoriev Feodor

Development of ecological lubricants based on vegetable oils with adjustable tribotechnical characteristics

Keywords: vegetable oils, friction and wear, liquid, plastic, and special lubricants, environmentally friendly additives**.**

The purpose of the work: development of biodegradable lubricants (liquid and grease) and specialty lubricants based on vegetable oil compositions and environmentally friendly modifiers, as well as the study of friction mechanisms during their use.

Research Methods: tribological testing, methods for assessing the physicomechanical characteristics of oils, gas chromatography, scanning and optical microscopy, mathematical methods for experiment planning.

Obtained Results and Their Novelty: Two primary mechanisms of operational degradation of vegetable oils under friction have been identified and classified for the first time. A multi-criteria method for selecting raw materials for vegetable-based lubricants has been developed. A new design principle for biodegradable lubricant formulations has been established, based on the use of vegetable oils with distinct oxidative behavior patterns. Optimal compositions and processing conditions for the production of vegetable-based lubricants have been determined. Liquid, grease-type, and electrical-contact lubricants have been developed and tested, exhibiting a range of performance characteristics comparable to those of mineral-based counterparts.

Recommendations for use: the proposed technical solutions represent environmentally safe alternatives to general-purpose industrial oils and greases. The developed formulations and technical specifications are recommended for replacing traditional lubricants and for establishing their serial production.

Scope of application: the developed lubricants can be used in industrial facilities, in electric transport systems, and in machinery employed in agriculture, forestry, and municipal utilities including in recreational areas. The electrical-contact and preservative lubricants remain effective under extreme climatic conditions and in environmentally sensitive regions where the risk of leakage is high.

Научное издание

ГРИГОРЬЕВ
Фёдор Андреевич

РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах»

Подписано в печать 12.11.2026. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Напечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 60 экз. Зак № 223р/26

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации»
Специальное разрешение (лицензия) № 02330/464 от 27.03.2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:
издателя печатных изданий № 1/138 от 08.01.2014 г. (06.08.2026 г.);
распространителя печатных изданий № 3/293 от 30.12.2013 г.
Пр. Октября, 50, 246029, г. Гомель