УТВЕРЖДАЮ
Директор Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси», д.т.н., доцент
_____Ю.М. Кривогуз
«30» _____ 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по предварительной экспертизе диссертационной работы Григорьева Фёдора Андреевича «Разработка смазочных материалов на основе экологичных компонентов для специальных трибосистем», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

1 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» (далее ИММС НАН Беларуси). Назначен приказом директора ИММС НАН Беларуси №87 от 03.12.2021 г.

2 Тема диссертационной работы

Тема работы «Разработка смазочных материалов на основе экологичных компонентов для специальных трибосистем» утверждена приказом директора ИММС НАН Беларуси №87 от 03.12.2021 г. на основании решения Ученого совета ИММС НАН Беларуси (протокол №15 от 30.11.2021 г.). Диссертация представлена к защите впервые.

3 Актуальность темы диссертации

Тематика диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь, утвержденным 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).

Исследования по теме диссертации проведены в рамках Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» (задания 6.06 № госрегистрации 20161513 и 4.2.3 № госрегистрации 20210243), а также проектов БРФФИ Т21ЭТ-018 № госрегистрации 20211764 и № Т22ВА-003 № госрегистрации 20221131.

Затраты на преодоление последствий трения и износа оцениваются около 5 % глобального ВВП и до 23 % мирового потребления энергии. Ежегодный рост потребления смазочных материалов составляет 3–5 % при мировом выпуске около 40 млн тонн. Однако, при эксплуатации сельскохозяйственной техники на каждые 1000 моточасов теряется 25–75 литров масла, а в природную среду попадает до 10 % мирового объёма выпуска смазочных материалов, что вызывает значительные экологические проблемы. В рамках концепции устойчивого развития законодательство ряда развитых стран стимулирует переход от смазочных материалов на минеральной основе к биодеградируемым смазочным материалам, рост рынка которых составляет 3–4 % в год. Мировой выпуск индустриальных смазочных материалов на растительной основе в 2025 году составил около 782 тысяч тонн.

В Республике Беларусь есть все предпосылки для использования биоразлагаемых смазочных материалов, что обусловливает актуальность работы по их разработке: развитая промышленность, транспорт, механизация сельского и лесного хозяйства, что определяет значительный объем потребления смазочных материалов и высокую потенциальную нагрузку на экосистемы. Замещение традиционных смазок биоразлагаемыми аналогами позволит снизить экологическую нагрузку, обусловленную применением смазочных материалов на основе минеральных масел, и обеспечит развитие ключевых отраслей экономики. С другой стороны, значительную долю выращиваемых в Республике Беларусь сельскохозяйственных культур занимают масличные культуры, такие как рапс, лен и другие, которые обеспечивают многотоннажный выпуск технических и пищевых растительных масел. Растительные масла, как известно, обладают удовлетворительными триботехническими характеристиками, что позволяет рассматривать их как основу для создания биоразлагаемых смазочных материалов.

Вместе с тем широкому применению растительных масел в качестве основы биоразлагаемых смазочных материалов препятствует их низкая окислительная и гидролитическая стабильность, а существующие подходы к их модифицированию базируются на применении присадок и антиоксидантов, разработанных для минеральных масел, что снижает экологические

преимущества растительной основы. Для преодоления этого препятствия автор диссертации применяет оригинальный подход – использование комплекса растительных масел, варьируя жирнокислотным составом которого, можно управлять формированием трибополимерных защитных плёнок на поверхностях трения. Также автор в качестве антиокислительной присадки использует двухкомпонентную систему токоферол-агидол-1, которая является экологически безопасной и в то же время, улучшая антиокислительные свойства баоразлагаемых смазочных материалов, участвует в формировании прочной защитной пленки, способствующей снижению коэффициента трения и повышению износостойкости узла трения. Таким образом, предложенная антиокислительная двухкомпонентная присадка позволяет целенаправленно регулировать баланс между антиокислителными свойствами и триботехничекими характеристиками биоразлагаемых смазочных материалов.

При этом механизмы деградации растительных масел, а также биоразлагаемых смазочных материалов на их основе в процессе трения остаются недостаточно изученными. Отсутствие системных знаний в этой области не позволяет научно обоснованно формировать рецептуры биоразлагаемых смазочных материалов с заданным комплексом триботехнических и экологических характеристик, прогнозировать изменения их физико-химических свойств и триботехнических характеристик в процессе эксплуатации, а также их работоспособность и ресурс, что определяет актуальность настоящей диссертационной работы. Результаты, полученные автором, о влиянии состава и свойств растительной смазочной основы и функциональных присадок на триботехнические характеристики узлов трения, содержащих биодеградируемые смазочные материалы – это значимый вклад в науку о трении, что определяет теоретическую и практическую значимость результатов диссертационной работы.

4 Соответствие названия диссертации ее содержанию

Название диссертационной работы «Разработка смазочных материалов на основе экологичных компонентов для специальных трибосистем» не в полной мере соответствует ее содержанию. Работа охватывает широкий спектр вопросов: от фундаментальных исследований механизмов трения и износа в среде растительных масел до прикладных разработок в области создания жидких, пластичных и электроконтактных смазочных материалов. Экспертная комиссия рекомендует корректировку названия для более точного отражения содержания работы и проведенных исследований. Предлагаем следующую формулировку: «Разработка экологичных смазочных материалов на основе растительных масел с регулируемыми триботехническими характеристиками».

5 Соответствие содержания диссертации отрасли науки и специальности

Содержание диссертационной работы соответствует специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах», а именно пункту 2 паспорта специальности: «Создание антифрикционных, фрикционных, смазочных материалов и покрытий, экологически чистых смазочных материалов и триботехнических систем, связь их строения и свойств с характеристиками трения и изнашивания».

Критерием отнесения работы к указанному пункту является решение комплексной задачи создания экологически чистых смазочных материалов на основе растительного сырья и установления связи их строения и свойств с характеристиками трения и изнашивания. Объектом исследования являются растительные масла, их смеси и смазочные материалы на их основе.

Установлена статистически значимая связь между жирнокислотным составом растительных масел и механизмами их эксплуатационной деградации при трении: для мононенасыщенных масел характерна механическая деструкция триглицеридов, для полиненасыщенных – термоокислительная деградация. Показано, что целенаправленное изменение жирнокислотного состава позволяет управлять формированием трибополимерных защитных плёнок на поверхностях трения.

Разработаны составы жидких, пластичных и электроконтактных смазочных материалов на растительной основе с экологически безопасными присадками и наполнителями, характеризующиеся показателем износа 0,51–0,83 мм, нагрузкой сваривания до 281 кгс, температурой каплепадения 143–290 °С и коллоидной стабильностью 7–15 %. Разработана нормативно-техническая документация (ТУ BY 400084698.327-2023, ТУ BY 400084698.328-2024, ТР № 112-2021, ТР № 113-2021).

Основные направления исследования диссертационной работы посвящены изучению связи жирнокислотного состава растительных масел и антиокислительных присадок с триботехническими характеристиками узлов трения, их влиянию на формирование трибополимерных защитных пленок на поверхностях трения, а также изменению триботехнических характеристик узлов трения при деградации свойств биоразлагаемых смазочных материалов в процессе эксплуатации. Получены экспериментально-статистические модели, отражающие корреляцию состава, режимов получения и триботехнических характеристик биоразлагаемых смазочных материалов. Разработаны составы и способы получения смазочных материалов на растительной основе, обеспечивающих

экологическую безопасность при эксплуатации и улучшенные характеристики по сравнению со смазочными материалами на минеральной основе.

6 Достоверность результатов проведенных исследований, обоснованность выводом и рекомендаций

Достоверность основных результатов определяется корректностью поставленных задач, применением современных физико-химических методов исследования, большим объемом экспериментальных данных и их статистической обработкой с использованием методов математического планирования эксперимента. Полученные результаты прошли апробацию на международных научно-технических конференциях и конгрессах, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а также подтверждены актами приёмки-передачи и опытно-промышленных испытаний на электротранспорте, промышленных предприятиях, в лесном хозяйстве и в природоохранной зоне Антарктиды. Выводы и рекомендации диссертационной работы не противоречат положениям специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах», являются обоснованными и достоверными, подтверждаются экспериментальными результатами и положительным опытом практического применения.

7 Степень новизны научных результатов, выносимых на защиту

Сформулированные в диссертационной работе Григорьева Ф.А. научные положения и выводы соответствуют критериям новизны. К наиболее существенным результатам диссертационной работы, обладающим новизной, относятся следующие:

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 удалённости от гипотетически наихудшего решения.

3. Сформулирован принцип проектирования рецептур биоразлагаемых

смазочных материалов, основанный на использовании растительных масел с разным типом окислительного поведения. Принцип заключается не в полном подавлении окисления, а в его целенаправленном использовании за счёт введения в стабильное базовое масло (например, рапсовое) контролируемого количества компонентов, склонных к трибополимеризации и обладающих высокой адгезией (например, льняное и касторовое масло), для формирования *in situ* защитных плёнок на поверхностях трения.

4. Разработаны составы и технологические режимы получения биоразлагаемых пластичных смазочных материалов на основе смесей растительных масел с кальциевым загустителем, обеспечивающие получение смазочных материалов с показателем износа 0,75–0,83 мм, температурой каплепадения 143–290 °С и коллоидной стабильностью 7–15%, что не уступает, а по ряду показателей превосходит промышленные аналоги.

5. Разработаны составы экологически безопасных электроконтактных смазочных материалов на минеральной и растительной основе, наполненных омеднённым графитом, обеспечивающие требуемый баланс электропроводности, механической прочности и триботехнических характеристик.

8 Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертационного исследования

Научная значимость работы состоит в установлении закономерностей влияния состава биоразлагаемых смазочных материалов на триботехнические характеристики смазываемых узлов трения; в выявлении механизмов эксплуатационной деградации растительных масел при трении в зависимости от их жирнокислотного состава; в создании способов получения биоразлагаемых пластичных смазок, отличающихся снижением влияния технологической воды и высоких температур на растительный компонент; в разработке экспериментально-статистических моделей жидких и пластичных биоразлагаемых смазочных материалов, позволяющих определять параметры компонентного состава и режимы изготовления смазочных материалов с заданными эксплуатационными свойствами и уровнем биоразлагаемости.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные теоретические и экспериментальные результаты явились научной основой создания экологически безопасных биоразлагаемых смазочных материалов, на которые разработана нормативно-техническая документация: ТУ BY 400084698.327-2023 – смазка «БИО-ГРОИЛ»; ТУ BY 400084698.328-2024 – смазка «ЭКСМ-1». Разработаны технологические регламенты и организовано производство: ТР № 112-2021 – смазка для электрических контактов СК-1; ТР №

113-2021 – смазка с мелкодисперсным абляционным ПТФЭ.

Экономическая значимость работы подтверждается результатами опытно-промышленной проверки и эксплуатации разработанных биодеградируемых смазочных материалов. Расчётный экономический эффект от использования 1 литра масла «БИО-ГрОИЛ» в ГОЛХУ «Буда-Кошелевский опытный лесхоз» составил 1,32 белорусских рубля; применение масла позволило снизить износ узлов трения на 45–50 % и сократить частоту замены смазочного материала в 1,5 раза. Разработанные биодеградируемые смазочные материалы производятся из возобновляемого отечественного сырья, что способствует снижению валютной нагрузки за счет решения проблемы импортозамещения.

Высока *социальная значимость* диссертационной работы, результаты которой способствуют снижению техногенной нагрузки на окружающую среду за счет применения биоразлагаемых смазочных материалов при эксплуатации машин и механизмов в сельском и лесном хозяйстве, а также на территориях природоохранных зон.

9 Апробация диссертации и сведения об использовании ее результатов, подтверждающие научную и практическую значимость, экономическую и социальную ценность диссертации

Основные положения работы доложены и обсуждены на международных научных, научно-технических конференциях и конгрессах: «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб) (Гомель, 2017, 2019, 2022, 2025 гг.); «Инновации в машиностроении» (Минск, 2017, 2020, 2021 гг.); «Трибология – машиностроению» (Москва, 2018, 2020, 2022 гг.); «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2018, 2021, 2022 гг.); «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах» (Минск, 2018 г.); «Альтернативные источники сырья и топлива» (АИСТ-2019) (Минск, 2019 г.); «МЕХАНИКА–2019» (Минск, 2019 г.); «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, 2020 г.); «Технология органических веществ» (Минск, 2021 г.); «Молодежь в науке» (Минск, 2021–2024 гг.).

При выполнении диссертации разработана программа и методика оценки величины электрического сопротивления смазочных материалов; программа статистичекого анализа кислотного числа смазочных материалов; программа, на базе которойо реализовано математическое планирование экспериментов; программа и методика экспрессных измерений окислительной стабильности смазочных материалов;

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 «Беларуськалий», что подтверждено Актами приемки-передачи опытных образцов смазочных материалов и Актами полевых испытаний смазочных материалов.

Теоретические и экспериментальные результаты работы использовались в учебном процессе УО «Белорусский государственный университет транспорта» при подготовке инженерных кадров по курсу «Смазка узлов трения» (Акт о внедрении результатов НИОКР в учебный процесс).

10 Полнота изложения положений и результатов, выносимых на защиту, в опубликованных работах

По материалам диссертации 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 материалов конференций, 23 тезиса докладов на конференциях. Получено 2 патента на изобретение Республики Беларусь, 2 патента на изобретение Российской Федерации и 1 приоритетная справка. Опубликованные материалы в полной мере отражают научные результаты и положения, представленные в диссертационной работе.

Наиболее значимые публикации, посвящённые решению задач исследования:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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, 15 February. – Art. 137765.

8. 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. DOI: 10.18324/2077-5415-2025-3-14-19.

9. 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.

10. Григорьев Ф.А. Экологически безопасные антиокислительные присадки к индустриальному маслу на основе растительного сырья / Ф.А. Григорьев, Н.К. Мышкин // Трение и износ. – 2026. – в печати.

11 Конкретное личное участие автора в получении научных результатов, представленных в диссертации

Диссертация является самостоятельной работой, обобщившей экспериментальные результаты, полученные лично автором. Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора, академика НАН Беларуси Н.К. Мышкина, совместно с которым проведены обсуждения и интерпретация полученных результатов. Основные выводы сформулированы автором.

12 Выполнение требований пункта 26 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий ВАК

В диссертационной работе, представленной Григорьевым Ф.А., соблюдены требования, перечисленные в п. 26 Положения о присуждении учёных степеней и присвоении учёных званий в Республике Беларусь.

В работе соискателем приведены ссылки на собственные публикации и на публикации, написанные в соавторстве, а также на использованные при написании литературные источники. Все положения, выносимые на защиту,

подтверждаются ссылками на собственные публикации. Заимствований без цитирования и использования неавторских результатов не выявлено.

Проверка диссертации на корректность использования в ней материалов, содержащихся в опубликованных работах других авторов, проводилась с помощью программного средства «Антиплагиат» (http://nlb.antiplagiat.ru). Уникальность текста составляет 93,19 %. Результаты проверки представлены в приложении 1.

13 Соответствие автореферата содержанию диссертации

Автореферат содержит основные научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе, и полностью соответствует её содержанию. Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют результатам и выводам, изложенным в диссертации и публикациях соискателя.

Экспертная комиссия по диссертации в составе председателя к.т.н., доцента Волнянко Е.Н., к.т.н., доцента Целуева М.Ю., к.т.н., доцента Богдановича С.П. назначена приказом директора ИММС НАН Беларуси № 86 от 01.09.2026 г. на основании заявления Григорьева Ф.А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Диссертация Григорьева Ф.А. «Разработка смазочных материалов на основе экологичных компонентов для специальных трибосистем» является законченной научной работой, соответствует специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» и отвечает требованиям Положения о присуждении учёных степеней и присвоении научных званий.

2. Название диссертационной работы Григорьева Ф.А. требует корректировки. Рекомендуемое название «Разработка и исследование смазочных материалов на основе растительных масел с экологически безопасными присадками».

3. Григорьев Ф.А. может быть допущен к защите диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности за новые научно обоснованные результаты, включающие:

– экспериментальные результаты, подтверждающие статистически значимые различия в механизмах эксплуатационной деградации при трении триглицеридов 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.

– 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.

– 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.%.

– 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%.

что в совокупности позволило выявить непосредственную корреляционную связь триботехнических характеристик узлов трения и жирнокислотного состава смазочной основы и создать биоразлагаемые смазочные материалы на основе отечественного растительного сырья, обладающих повышенной окислительной стойкостью, различного функционального назначения для нужд лесного и сельского хозяйства, транспорта и других отраслей экономики Республики Беларусь.

Диссертационная работа Григорьева Ф.А. заслушана на заседании Ученого Совета ИММС НАН Беларуси (протокол № 16 от 30.10.2026).

На заседании присутствовало 8 из 12 членов Ученого Совета, в т.ч. с правом решающего голоса – 8, из которых 3 человека с ученой степенью доктора технических наук и 5 человек с ученой степенью кандидата технических наук. Приглашенные – 8 человек.

Результаты голосования: «за» – 8 , «против» – *нет*, воздержавшихся – *нет*.

С результатом голосования 8/0 принято заключение в целом и решение рекомендовать работу Григорьева Ф.А. к защите.

Председатель экспертной комиссии,
ст. научн. сотр., к.т.н., доцент _____ Е.Н. Волнянко

Члены комиссии:

вед. научн. сотр., к.т.н., доцент _____ М.Ю. Целуев

зав. отделом №5, к.т.н., доцент _____ С.П. Богданович

Секретарь Ученого Совета
к.т.н., доцент _____ В.В. Кончиц