



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

ПАРФЕНОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОПРИСАДКАМИ В УСЛОВИЯХ
АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ**

2.5.3. Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново
2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановская государственная медицинская академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО ИвГМА Минздрава России) на кафедре химии, физики, математики.

Научный руководитель: **Березина Елена Владимировна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химии, физики, математики ФГБОУ ВО «Ивановская государственная медицинская академия» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Иваново

Официальные оппоненты: **Цветков Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология судоремонта» ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург

Киселев Вячеслав Валериевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры механики, ремонта и деталей машин (в составе УНК «Пожаротушение») ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», г. Иваново

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Защита состоится «16» мая 2023 года в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета У.2.5.3.30 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера П, Главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.2.5.3.30
кандидат технических наук

Москалец А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. Проблема снижения износа при эксплуатации оборудования актуальна для машин, работающих в различных отраслях. Изнашивание влияет на эксплуатационную и экономическую эффективность транспортных, сельскохозяйственных, текстильных и других машин. Повышенный износ является основной причиной выхода из строя узлов трения машин. Одним из факторов, влияющих на снижение износа деталей машин, являются антиизносные свойства смазочных материалов (СМ). Ввиду изложенного, остро встает вопрос о модификации СМ трибоактивными компонентами. Актуальной задачей, в частности, становится повышение ресурса узлов трения машин за счет использования наноразмерных присадок (НРП), например, на основе углерода. Вопрос о применении НРП в специфических условиях абразивного вида изнашивания остается мало исследованным.

Работа выполнялась в рамках проекта РФФИ (Грант № 18-29-19150_мк) «Разработка физико-химических основ создания высокоэффективных смазочных материалов на основе углеродных наноструктур для импортозамещения в машиностроении».

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности СМ за счет применения присадок аллотропных модификаций углерода в условиях абразивного изнашивания.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие **задачи:**

1. Построить физическую модель смазочного действия НРП в СМ, загрязненных абразивными частицами.
2. Разработать метод, технические и программные средства для измерения параметров трения и величины изнашивания в случае наличия в СМ абразивных частиц.
3. Выявить влияние включения НРП на триботехнические и связанные с ними физико-химические, реологические и экологические свойства СМ.
4. Определить оптимальное соотношение трибоактивных компонентов СМ, обеспечивающих снижение абразивного износа в узлах трения.
5. Определить эффективность оптимизированных по составу смазочных материалов в ходе производственных испытаний.
6. Оценить экономическую эффективность применения смазочных материалов, содержащих НРП.

Объект диссертационного исследования – смазочные материалы, содержащие наноразмерные присадки аллотропных модификаций углерода.

Предмет исследования – триботехнические свойства масляных СМ (жидкотекучих и пластических), содержащие НРП.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложена концепция влияния на износ металлических поверхностей полидисперсной взвеси (суспензии) твердых абразивных частиц в СМ, учитывающая роль взаимодействия продуктов изнашивания и НРП в зоне трения, основанная на кинетике массопереноса НРП из объема СМ на поверхности трения.

2. Построена математическая модель молекулярного транспорта НРП в контактную зону для условий абразивного изнашивания.

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. Разработана и верифицирована физическая адсорбционная модель массопереноса НРП в смазочном материале, загрязненном абразивными частицами.

2. Разработано программное обеспечение для расчета величины износа, исходя из адсорбционной модели транспорта НРП.

3. Получены результаты экспериментальных исследований триботехнических, физико-химических и экологических свойств модифицированных СМ.

4. Разработаны метод и технические средства для измерения в лабораторных условиях параметров трения и величины изнашивания в случае наличия в СМ абразивных частиц, программное обеспечение для сбора и цифровой обработки информации.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке физической модели для расчета параметров изнашивания в случае применения СМ, модифицированных НРП.

Практическая значимость:

1. Разработаны и введены в действие экспериментальная установка и методика для проведения лабораторных испытаний в условиях абразивного изнашивания по незакрепленному абразиву в точечном контакте и по схеме «кольцо-плоскость», позволяющие производить исследования для оценки интенсивности изнашивания в среде СМ.

2. Проведены исследования по модификации ряда СМ различного состава, а также модельных смазочных композиций с целью оптимизации химической природы и концентрации НРП. Разработана программа для

определения оптимальной концентрации присадки (свидетельство государственной регистрации №2022616722 от 15.04.2022).

3. Выполнены производственные испытания оптимизированных смазочных композиций на основе индустриального масла И20 и пластичного СМ Литол-24 в условиях ткацкого производства. В результате производственных испытаний установлено снижение величины износа на 32,5-34% по сравнению с немодифицированными СМ.

Методология и методы исследований:

Проведен анализ российской и зарубежной научно-технической литературы: процессы, причины и способы снижения абразивного износа деталей машин, способы модификации смазочных материалов присадками. Аналитические зависимости были получены при помощи методов интегрального и дифференциального исчисления. Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном оборудовании. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с помощью методов математической статистики.

На защиту выносятся:

1. Физическая модель адсорбционного массопереноса наноразмерной присадки в смазочном материале.

2. Методика и системы измерения параметров трения на испытательной машине МТУ-01 с использованием тензометрии и цифровых систем обработки данных, а также программное обеспечение, реализующее регистрацию сигналов.

3. Результаты экспериментальных исследований триботехнических, физико-химических и экологических свойств СМ, представляющих собой масляные суспензии абразивных частиц и содержащие НРП.

4. Оптимизированный состав СМ, реализующий эффект массопереноса и повышающий износостойкость узлов трения в условиях абразивного вида изнашивания.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается рациональными методами обработки данных с использованием современных пакетов программного обеспечения, достаточным объемом экспериментальных исследований, верификацией аналитических моделей при помощи лабораторных экспериментов, а также актом о проведении промышленных испытаний модифицированных смазочных материалов на ткацком предприятии.

Математические модели разработаны на основе законов теории вероятностей, теории адсорбции. Результаты экспериментальных

исследований обработаны при помощи статистических методов с доверительной вероятностью 95%.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на всероссийской школе-конференции молодых ученых «Органические и гибридные наноматериалы» (г. Иваново, 2019, 2021 гг.); всероссийских научно-практических конференциях «Надёжность и долговечность машин и механизмов» (г. Иваново 2018, 2020, 2021, 2022 гг.); международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению» (г. Москва, 2018, 2020 гг.); международной научно-технической конференции «Поликомтриб» (г. Гомель, 2019, 2022 гг.), конкурсе-конференции по программе «Участник молодежного научного инновационного конкурса» («УМНИК» 2021 г.); финальном этапе всероссийского молодежного конкурса «Легпромнаука» (2021 г.); всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» ИИМ-2022 (г. Санкт-Петербург, 2022 г.).

Личный вклад автора. Соискателю принадлежит основная роль в постановке и решении научных задач исследования, разработке концепции адсорбционной модели транспорта НРП в трибосистемах, создании конструкции и изготовлении лабораторного стенда для проведения испытаний смазочных материалов, экспериментальном исследовании параметров трения. Автором создано программное обеспечение для оптимизации составов смазочных композиций с НРП на основе углеродных нанотрубок.

Публикации. Основные материалы диссертации изложены в 22 печатных работах, в числе которых 8 статей в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus, 1 – в журнале из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук», 12 публикаций в сборниках материалов научно-технических конференций различных уровней. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Доля соискателя в опубликованных с соавторами работах по теме диссертации составляет от 30 до 80 %.

Соответствие паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует следующим областям исследования паспорта специальности 2.5.3. – Трение и износ в машинах: п.1. Механические, тепловые, физико-химические, магнитные, электрические,

биотрибологические явления при трении; п.3. Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения при трении; 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. 13. Микро- и нанотрибология.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными выводами по работе, библиографического списка и приложений. Содержание работы изложено на 123 страницах, включает 33 рисунка, 12 таблиц. В диссертации 3 приложения на 6 страницах. Библиографический список насчитывает 149 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены использованные методы исследований и апробация результатов.

В **первой главе** представлены результаты комплексного анализа проработанности выбранного направления. Проанализированы исследования по изучению факторов и механизмов изнашивания узлов трения, работающих в условиях высокой загрязненности. В результате анализа характерных режимов трения выявлены основные причины выхода из строя высоконагруженных элементов машин: абразивное и усталостное изнашивание, фреттинг-износ. К основным параметрам, влияющим на интенсивность абразивного изнашивания, можно отнести: твердость и модуль упругости поверхностей деталей трения, твердость и модуль упругости частиц абразива, режущую способность (форму, размер) частиц абразива, величину зазора между поверхностями трения. Установлено, что в качестве мер повышения ресурса сопряжений используется как совершенствование уплотнительных устройств, призванных изолировать контактную зону от проникновения частиц абразива, так и непосредственное упрочнение поверхностей узлов трения, применение присадок-модификаторов различной природы для СМ.

Проведен обзор основных методов расчета интенсивности изнашивания, рассмотрены аналитические зависимости, предложенные в трудах таких ученых, как И.В. Крагельский, Д.Н. Гаркунов, М.М. Хрущов, А.В. Чичинадзе, Т. Малхери, Л. Самуэлс, Д. Холм, Д. Екимото, Т. Цукидзо, С.Б. Ратнер. Выявлено, что во многих аналитических моделях не учитываются эффекты

физико-химических механизмов влияния присадки для СМ на интенсивность изнашивания.

В ходе анализа присадок для СМ были отмечены наноразмерные структуры, обладающие высокой удельной поверхностью. Выделены основные категории присадок на основе углеродных наночастиц в виде аллотропных модификаций углерода: одностенных и многостенных углеродных нанотрубок, графена и оксида графена, шунгитовых наночастиц. Сформулированы цели и задачи исследования, направленные на повышение ресурса узлов трения деталей машин путем применения модифицированных СМ.

Во **второй главе** предложена модель взаимодействия наноразмерных частиц присадки (в виде углеродных нанотрубок) с абразивными частицами. В условиях того, что абразивные частицы как внешней природы (твердые загрязнения смазочного материала), так и появившиеся в процессе трения (частицы износа поверхностей, представляющие собой оксиды металлов, чья твердость выше, чем твердость контактных поверхностей) выступают в роли транспорта присадки, повышение концентрации присадки приводит к тому, что большее количество абразивных частиц в объеме адсорбируют поверхностью материалы присадки, что снижает износ.

Активность присадки можно сопоставить с ее градиентом к поверхностям трения (контакта) из объема смазочного материала. Если динамику износа сопоставить с динамикой адсорбции присадки в местах абразивного контакта, то в условиях стационарного процесса износа приток присадки к поверхностям контакта можно выразить скоростью адсорбции $\frac{\partial a}{\partial t}$.

Кинетику адсорбции присадки на твердом теле в трибосистеме определим уравнением:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(a_p - a) = \beta(k\sqrt{C} - a), \quad (1)$$

где β – «коэффициент структурирования» (или агрегации) трибоактивной присадки, отвечающий за изменение поведения трибоактивного компонента в объеме, являющийся функцией концентрации.

В уравнении (1) $a_p = k\sqrt{C}$ – равновесная концентрация адсорбата, описываемая степенной моделью Фрейндлиха; k – постоянная в законе Фрейндлиха; C – концентрация присадки. Интегрируя по времени (1), получим:

$$a = k\sqrt{C}(1 - e^{-\beta(C)t}). \quad (2)$$

Используя модель линейной зависимости износа от величины адсорбции присадки, принимаем, что:

$$K(C) = K(0) - n \cdot a(C), \quad (3)$$

где $K(C)$ — коэффициент износа как функция концентрации, $K(0)$ — коэффициент износа в отсутствии адсорбции присадки, n — коэффициент пропорциональности.

Подставляя (2) в (3), получим:

$$K(C) = K(0) - n \cdot k \cdot \sqrt{C} (1 - e^{-\beta(C)t}) = K(0) - A \cdot \sqrt{C} (1 - e^{-\beta(C)t}). \quad (4)$$

Из уравнения (1) следует, что $\beta(C)$ имеет размерность $[c^{-1}]$. Тогда

$$\beta(C) \sim \frac{1}{\tau(C)}, \quad (5)$$

где $\tau(C)$ — характерное время адсорбции.

Подставляя (5) в (4), получим:

$$K(C) = K(0) - A \cdot \sqrt{C} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau(C)}} \right), \quad (6)$$

где t — параметр времени, $A = nk$ — постоянная.

В случае линейной зависимости характерного времени адсорбции от концентрации присадки $\tau(C) = \tau_0 + \gamma \cdot C$, где γ — коэффициент пропорциональности, характеризующий агрегацию присадки:

$$K(C) = K(0) - A \cdot \sqrt{C} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0 + \gamma \cdot C}} \right). \quad (7)$$

Применение аналитического выражения (7) для анализа результатов лабораторных испытаний модельного СМ (вазелиновое масло) на испытательной машине МТУ-01 позволяет произвести оценку характера изнашивания и выделить ряд характерных областей (рис. 1):

I — до 0,5 мас. % присадки;

II — от 0,5 мас. % до 2,0-2,5 мас. % присадки (в зависимости от концентрации абразива);

III — свыше 2,0-2,5 мас. % присадки (в зависимости от концентрации абразива).

В качестве характеристики эффективности присадки на малых концентрациях можно ввести параметр активности присадки при данных режимах изнашивания.

В случае отсутствия в СМ абразивных частиц (рис. 1, кривая а) наибольшим вкладом будет обладать адгезионный износ. Можно сделать предположение, что в области I активность присадки близка к нулю, в результате чего не происходит уменьшения интенсивности изнашивания. Образующихся в процессе трения частиц износа (которые выполняют роль абразивных частиц) недостаточно, чтобы использовать их в качестве транспорта для присадки, при этом малая концентрация присадки не позволяет ей эффективно поступать в зону трения.

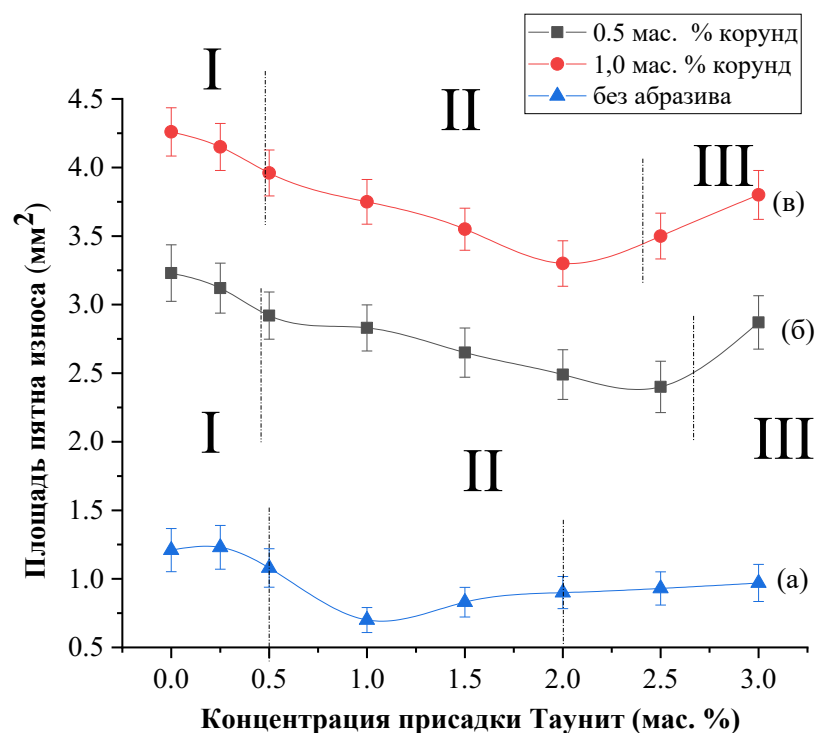


Рис. 1. Зависимость величины износа от концентрации присадки и абразива

При повышении концентрации присадки и переходе в область **II** достигается максимальное снижение интенсивности изнашивания вплоть до величины 40%, при этом дальнейшее увеличение концентрации присадки и переход в область **III** приводит к снижению эффективности работы присадки, что может быть связано с эффектами агрегации наночастиц, увеличением их размеров и соответствующим снижением вероятности поступления в зону трения.

В случае абразивного изнашивания (рис. 1, кривые *б* и *в*) большую роль играет концентрация абразивного загрязнителя, который привнесен в трибосистему извне. В области **I** при концентрации абразива 0,5 мас. % наблюдается высокая активность присадки и выраженная зависимость эффективности от концентрации. Характер такого процесса можно описать активным увеличением числа частиц износа за счет абразивного режущего воздействия на поверхности трения, а значит, более выраженным транспортным действием дисперсной фазы в суспензии.

При переходе в область **II** аналогично адгезионному изнашиванию наблюдается оптимум эффективности действия присадки. При этом можно рассмотреть два конкурирующих процесса: экранирующий эффект присадки, вносимой в зону трения с абразивными частицами и частицами износа, и начало переходных процессов в объеме присадки, приводящих к агрегации наночастиц, увеличению их размеров и снижению активности. В области **III**

происходит стабилизация процесса износа во всех трех случаях (адгезионный и абразивный износ). При достаточно больших массовых концентрациях наноприсадки активность снижается за счет образования агрегатов наночастиц, что может подтверждаться ускоренной седиментацией подобных систем.

При анализе выражения (7) путем вариации коэффициентов можно отметить следующие факты. Вариация параметра агрегации γ приводит к значительному изменению характерной зависимости коэффициента износа от концентрации (рис. 2). Так, при увеличении параметра от $\gamma_a = 300 \frac{c}{\text{мас.}\%}$ до $\gamma_e = 1500 \frac{c}{\text{мас.}\%}$ с шагом $300 \frac{c}{\text{мас.}\%}$ хорошо прослеживается смещение оптимальной концентрации в сторону уменьшения при значительном снижении эффективности действия присадки.

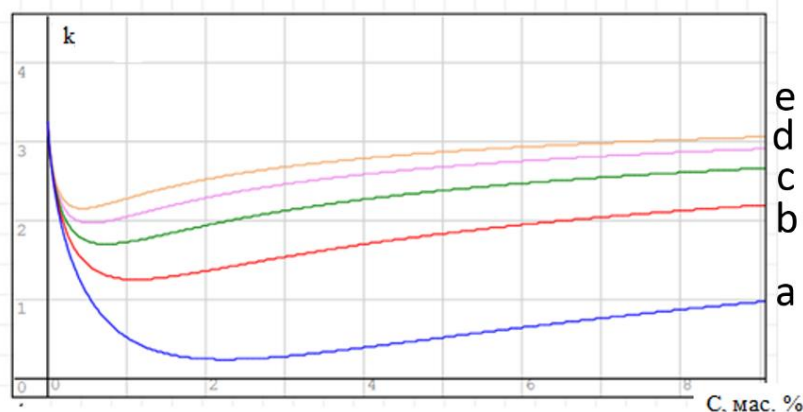


Рис. 2. Зависимость коэффициента износа от параметра агрегации присадки в соответствии с формулой (7) при вариации параметра γ_a от $300 \frac{c}{\text{мас.}\%}$ (кривая a) до $1500 \frac{c}{\text{мас.}\%}$ (кривая e) с шагом $300 \frac{c}{\text{мас.}\%}$

В третьей главе приводятся схема и основные характеристики разработанной лабораторной установки по определению параметров трения при испытаниях модифицированных СМ, результаты триботехнических, физико-химических и микробиологических испытаний модифицированных СМ.

Выделены основные группы СМ, имеющих потенциал для модификации. В группу жидких СМ выбраны ВНИИ НП-406 (ТУ 38.101289-72), индустриальные масла И20А, И40А (ГОСТ 20799-88), вазелиновое масло (ГОСТ 3164-78); в группу пластичных смазочных материалов (ПСМ) – Литол-24 (ГОСТ 21150-87), петролатум (ГОСТ 3582-84). В качестве ПСМ для сравнения выбраны высокомодифицированные материалы Газпромнефть LXEP2 и Claas AgriGrease EP2.

В качестве присадок для СМ выбран широкий ряд углеродных наноматериалов. В роли абразивного загрязнителя был выбран Электрокорунд 25А 0,063-0,125 (F180). Абразивное вещество и присадка УНТ вводились в смазочный материал путем механического смешивания и последующего ультразвукового диспергирования. Характеристики НРП и модельного абразивного материала приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики использованных углеродных наноструктур (УНС)

Вид углеродной наноприсадки / абразивного агента	Основные характеристики
Многостенные углеродные нанотрубки (MWCN)	Диаметр: 5–10 нм Длина: 5–20 мкм Чистота: > 95 мас. % Аморфный углерод: < 3% Удельная поверхность: > 500 м ² /г Теплопроводность: ~ 2000 Вт/(м·К)
Одностенные углеродные нанотрубки (SWCN)	Диаметр: 1–2 нм Длина: 5–20 мкм Чистота: > 90 мас.% Аморфный углерод: < 5% Удельная поверхность: > 400 м ² /г Теплопроводность: ~ 4000 Вт/(м·К)
Многослойный окисленный графен (Gr)	Пластины толщиной 3–5 нм Размер пластинок в плоскости: 2–10 мкм Теплопроводность поперек пластин: 6 Вт/(м·К)
Наночастицы шунгитового углерода (Sh)	Базовый элемент ~ 1 нм, кластеры < 100 нм Графеноподобный углерод: 96 мас.% Удельная поверхность по БЭТ: 325 м ² /г Теплопроводность: ~ 3,2 Вт/(м·К)
Многостенные нанотрубки Таунит-М	Внешний диаметр: 10–30 нм Внутренний диаметр: 5–15 нм Длина: ≥ 2 мкм Удельная поверхность: ≥ 270 м ² /г
Электрокорунд 25А 0,063-0,125 (F180)	Фракционный состав: 0,063–0,125 мм Основной размер фракции: 0,075–0,090 мм Содержание Al ₂ O ₃ : 96-99% Плотность от 3,9 г/см ³ до 3,95 г/см ³ Микротвердость – от 19,6 ГПа до 20,9 ГПа

Для проведения исследований СМ на изнашивание в присутствии абразивного загрязнителя была разработана измерительная система для испытательной машины (рис. 3) и оснастка, представляющая собой трехшариковый трибометр (схема трения три пальца по плоскости).

Для автоматизации сбора данных разработан программно-технический комплекс на базе Owen ПЛК150-220.А-М, модуля ввода сигналов тензодатчиков MB110-220-4ТД. Измерение температуры производится при

помощи трех термосопротивлений с кабельным вводом ДТС014-50М.В3.25/1.6, которые подключаются к аналоговым входам ПЛК. Подключение модуля ввода сигналов тензодатчиков МВ110-224.4ТД производится при помощи протокола MODBUS посредством асинхронного интерфейса RS-485.

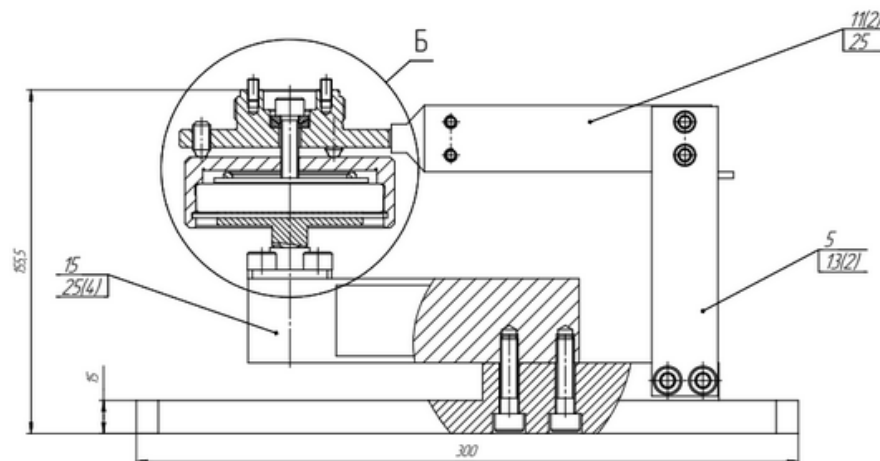


Рис. 3. Измерительная система для испытательной машины МТУ-01

Для получения данных нагрузки использовали датчик SL6Q-C3-100kg-2В, для измерения момента трения — датчик SL6D-C3-10kg-1.5В. Тарировка датчиков производилась при помощи встроенного программного обеспечения ОВЕН по набору грузов. Передача данных производилась путем Ethernet-подключения к персональному компьютеру, обработка и визуализация данных осуществлялись в сконфигурированной SCADA-системе.

Произведенная модификация жидких СМ (вазелиновое масло, индустриальные масла И20, И40, высоколегированное масло ВНИИ НП 406) многостенными углеродными нанотрубками приводит к незначительному увеличению коэффициента трения композиций (рис. 4), что может быть связано с высокой жесткостью и упругими свойствами наночастиц.

В результате лабораторных испытаний жидких СМ, загрязненных абразивными частицами и модифицированных углеродными нанотрубками, установлено снижение износа пар трения (рис. 5). В случае отсутствия в жидких СМ абразивных загрязнений происходит снижение величины износа поверхностей трения до 10%.

В рамках предложенной физической модели можно интерпретировать подобное поведение следующим образом: дополнительное введение абразивного загрязнителя увеличивает эффективность присадки. Углеродные нанотрубки оказывают экранирующее действие и снижают режущее действие абразивных частиц, электростатически взаимодействуя с ними. Таунит-М, обладая достаточно большой жесткостью и малыми размерами, закрепляясь

на частицах абразива, демпфирует удар абразивной частицы о поверхность трения, переходя при этом непосредственно на саму поверхность.

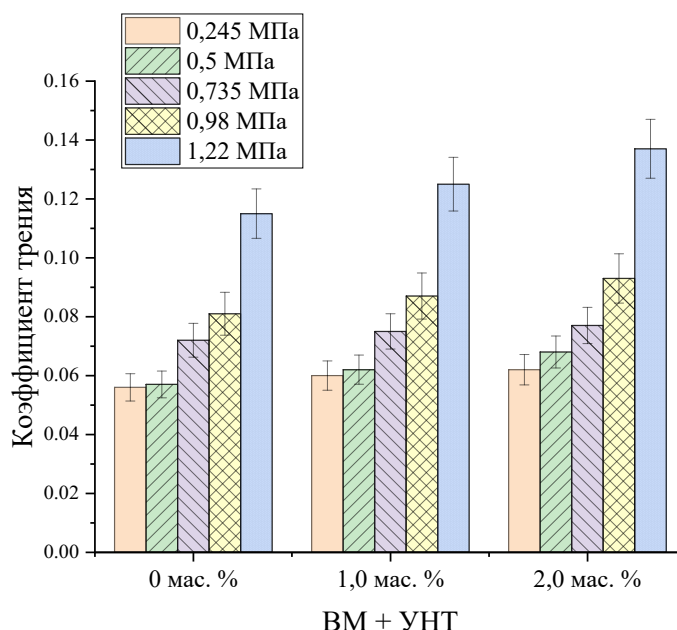


Рис. 4. Величина коэффициента трения при испытаниях суспензий углеродных нанотрубок в вазелиновом масле

Лабораторные испытания загрязненных СМ с присадкой углеродных нанотрубок подтверждают предложенную физическую модель: эффективность снижения величины износа изменяется от 15% в случае модифицированных жидких смазочных материалов до 23% при применении промышленных масел и вазелинового масла (рис. 5).

В результате испытаний суспензий, состоящих из жидкого СМ, углеродных нанотрубок и микропорошка меди, доказано, что введение углеродных наноструктур Таунит-М в качестве присадки снижает износ как в базовом масле И40, так и в смазочном материале с добавкой микропорошка меди. Характерный минимум величины износа в системе И40-УНТ наблюдается при концентрации 1,0 мас. %, при введении микропорошка меди происходит дальнейшее снижение износа, в то же время оптимальная концентрация УНТ равна 1,5 мас. %, что может свидетельствовать о синергетическом действии присадок.

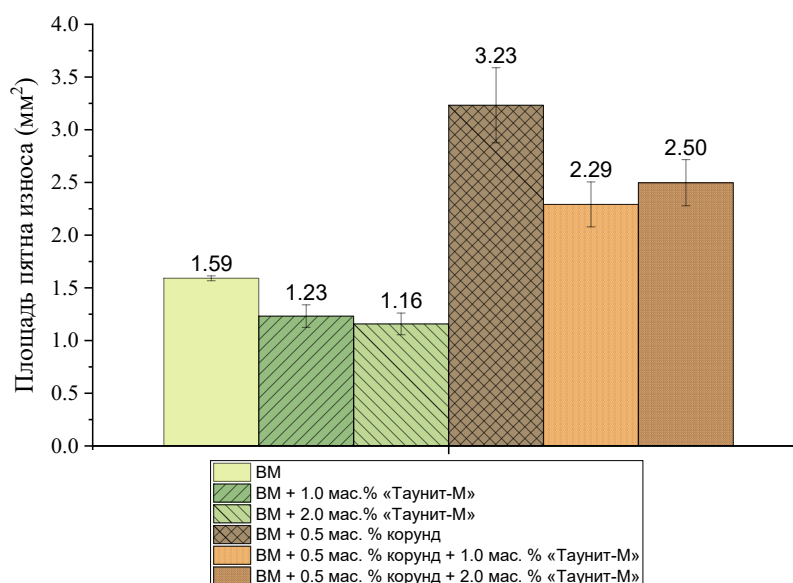
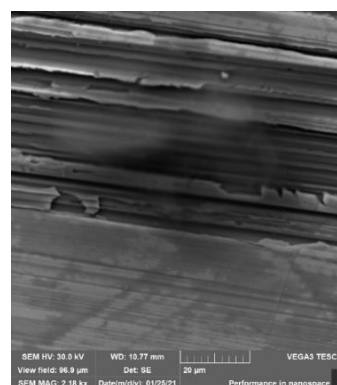


Рис. 5. Площадь пятен износа при испытаниях суспензий углеродных нанотрубок в вазелиновом масле в присутствии абразивного загрязнителя

В случае применения композиций с абразивными частицами и углеродными нанотрубками на поверхностях трения практически не наблюдается следов углерода и УНТ. В этом случае можно рассматривать взаимодействие углеродных нанотрубок непосредственно с частицами абразива. Исследование поверхностей трения методами оптической микроскопии приведены на рисунке 6 (а), методами электронной микроскопии – на рисунке 6 (б). Абразивный износ может снижаться по причине «экранирующего» эффекта наночастиц, которые, вступая в контакт с корундом, снижают режущее воздействие частиц.



а



б

Рис. 6. Исследование поверхностей трения: а – методами оптической микроскопии (микроскоп Биолам М, увеличение 200х), б – методами электронной микроскопии (микроскоп Tescan Vega 3 SBH)

Исследование температурных зависимостей, полученных в результате лабораторных испытаний (рис. 7), позволяет сделать вывод о том, что модификация СМ углеродными нанотрубками увеличивает теплопроводность

суспензий и эффект присадки, помимо снижения величины износа, заключается в увеличении теплоотвода из зоны трения.

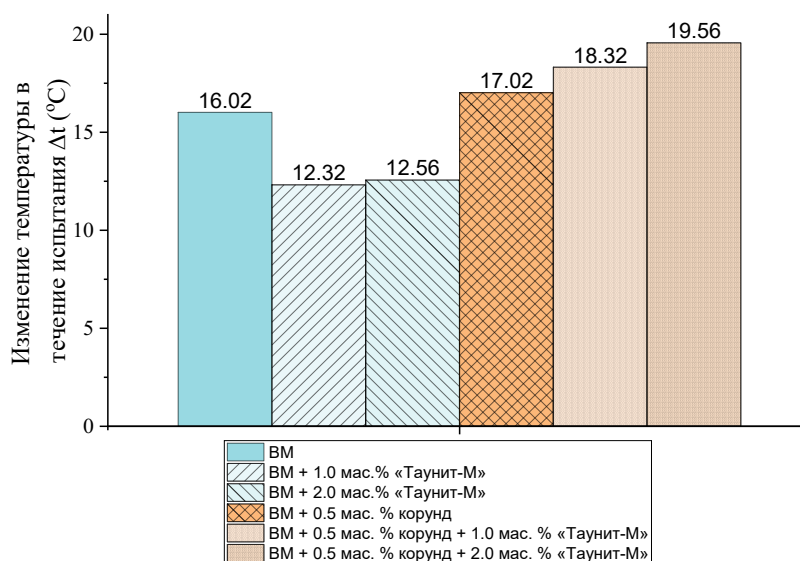


Рис. 7. Изменение температуры в результате лабораторных испытаний суспензий жидких смазочных материалов с углеродными нанотрубками в вазелиновом масле

По результатам выполненных экспериментов по оценке экологической (антибактериальной) безопасности возможно сделать заключение, что тестируемые вещества практически не оказывают ингибирующего воздействия на развитие бактериальных тест-культур (как грамположительных, так и грамотрицательных штаммов бактерий), что можно оценить как отсутствие антибактериальной активности. Произведенная модификация СМ растительного происхождения (в целях оценки возможности создания экологически чистых СМ) может преследовать сразу несколько целей: улучшение триботехнических характеристик СМ за счет повышения его теплопроводности и снижение коэффициента трения.

В ходе изучения триботехнических свойств смазочных систем на основе ПСМ (петролатума) с добавками УНС с различными концентрациями и пространственным строением установлены две группы УНС, одна из которых приводит к снижению коэффициента трения (максимально на 67%), а другая – к его повышению (максимально на 33%) по сравнению с базовым СМ. К первой группе можно отнести многослойный окисленный графен, одностенные и многостенные нанотрубки. Во вторую группу входят многостенные нанотрубки Таунит-М и фуллерен C60. Эффект от введения присадки в виде наночастиц шунгитового углерода незначителен (снижение коэффициента трения не превышает 12%).

На следующем этапе исследовано влияние углеродных наноструктур на коэффициент трения и задиростойкость трех ПСМ: импортного Claas AgriGrease EP2 и отечественных — Газпромнефть LX EP2 и Литол-24. Показано, что введение всех типов углеродных наноструктур в отечественный ПСМ Литол-24 (рекомендованный для применения в узлах трения ткацких станков СТБ) уменьшает коэффициент трения (рис. 8) в области низких нагрузок.

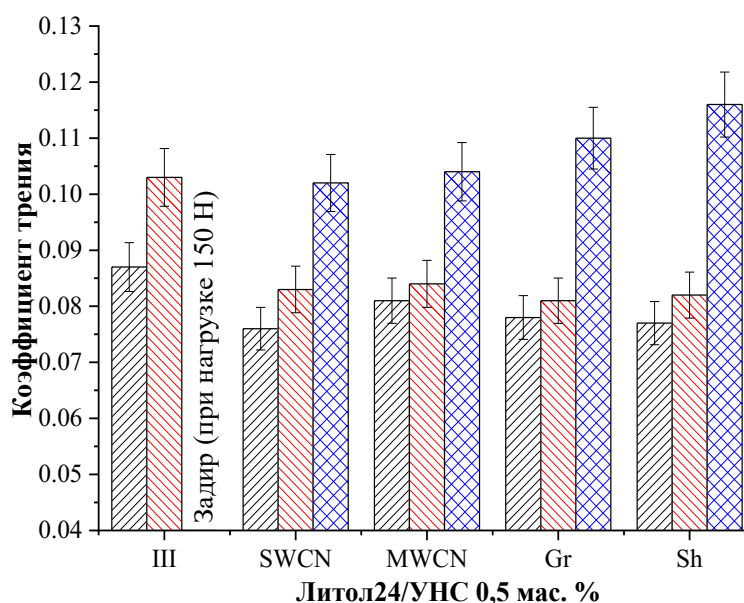


Рис. 8. Коэффициент трения композиций Литол-24 с углеродными наноструктурами при нагрузках: 60 Н – , 110 Н – , 160 Н – 

В результате лабораторных исследований стабильности композиций, состоящих из жидких СМ и углеродных нанотрубок Таунит-М, установлено, что суспензии, прошедшие ультразвуковую диспергацию в течение 15 минут, проявляют высокую стабильность. Оптическая плотность, измеренная спектрофотометрическим способом, изменяется не более, чем на 20% после отстаивания в течение 168 часов. Это позволяет делать выводы о возможности применения подобных наноструктур в качестве присадки для СМ, удовлетворяющей условиям хранения и транспортировки готового продукта. Высокая стабильность суспензий с углеродными наноприсадками позволяет сохранять эффективность модифицированных СМ при простоях оборудования.

Лабораторный эксперимент по исследованию поверхностного натяжения суспензий показал незначительное увеличение величины поверхностного натяжения, что свидетельствует об инертности присадки.

Реологические испытания методом ротационной вискозиметрии при помощи вискозиметров Brookfield DV-II+Pro и РПЭ-1М позволили сделать вывод о том, что введение углеродных нанотрубок в СМ незначительно увеличивает кинематическую вязкость суспензий, при этом зависимость вязкости от концентрации носит экспоненциальный характер. Следует отметить, что введение присадки не изменяет характер течения СМ, тем самым не нарушая режимы работы узлов трения, рассчитанных на строго определенные характеристики смазки.

В четвертой главе описана оптимизация составов СМ методами факторного эксперимента. Установлено, что оптимальной является концентрация 2,0 мас. % углеродных нанотрубок для жидких СМ и 2,5 мас. % для ПСМ. По данным лабораторного эксперимента построена математическая модель зависимости величины износа поверхностей от вязкости смазочного материала, концентрации присадки и контактного давления в зоне трения.

В ходе производственных испытаний в условиях текстильного производства модифицированный СМ на основе индустриального масла И40 и 2,0 мас. % углеродных нанотрубок был залит в коробку батанного механизма ткацкого станка СТБ 2 – 180. Длительность испытаний составила 3 месяца. По результатам испытаний путем исследования пар трения при помощи микроскопов МПБ-2 и DTX 700 установлено снижение приращения величины канавки износа по сравнению с контрольным станком: в ходе испытаний в течение 3 месяцев установлен эффект снижения износа на 30,5-31,2%.

В соответствии со стандартной методикой проведена оценка экономической эффективности разработанных СМ. Экономический эффект от совместного использования модифицированных НРП жидких и пластичных СМ составляет 8579 руб. в год на одну единицу станочного парка.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработана и верифицирована физическая адсорбционная модель массопереноса наноразмерной присадки в смазочном материале, загрязненном абразивными частицами.

2. Разработаны методы и технические средства для измерения в лабораторных условиях параметров трения и величины изнашивания в случае наличия в смазочном материале абразивных частиц, программное обеспечение для сбора и цифровой обработки информации. Разработано программное обеспечение для расчета величины износа, исходя из адсорбционной модели транспорта наноприсадки. Получено свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ «Программа оптимизации состава смазочных материалов для узлов трения батанного механизма ткацкого станка СТБ» (RU2022616722 от 15.04.2022).

3. Экспериментально исследован ряд смазочных материалов с наноразмерной присадкой углеродных нанотрубок и модельным абразивным загрязнителем при помощи испытательных машин СМЦ-2 и МТУ-01 (ТУ 4271-001-29034600-2004). В результате применения модифицированных СМ достигнуто снижение интенсивности изнашивания на величину до 35% в случае применения композиции, состоящей из индустриального масла и 2,0 мас. % углеродных нанотрубок.

4. Методом факторного эксперимента определен оптимальный состав присадок для жидких и пластичных смазочных материалов. В случае использования малолегированных жидких индустриальных масел оптимальной является концентрация 2,0 мас. %, для пластичного СМ Литол-24 оптимальной является концентрация 2,5 мас. %.

5. Проведенные в течение 3 месяцев производственные испытания модифицированных смазочных материалов (на основе индустриального масла И40 и 2,0 мас. % присадки Таунит-М) выявили снижение интенсивности изнашивания на величину 30,1-32,5% по сравнению с базовыми смазочными материалами.

6. Экономический эффект от совместного использования модифицированных жидких и пластичных смазочных материалов составляет 8579 руб. в год на одну единицу станочного парка.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные исследования могут служить основой для разработки новых специальных смазочных композиций, использующих эффекты переноса присадки в условиях абразивного изнашивания в зону трения. Одной из важных перспектив является дальнейшее исследование полидисперсных смесей, состоящих из смазочных материалов, НРП, абразивных частиц и поверхностно-активных веществ.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных

Web of Science / Scopus

1. **Parfenov, A. S.** Tribological effect of the combined use of micro- and nano- scale additives in the textile machinery lubricants / A.S. Parfenov, A.A. Tuvina // AIP Conference Proceedings 2467, 020039. -2022. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)
2. **Парфенов, А. С.** Снижение износа кулачкового механизма ткацкого станка за счет применения смазочных материалов с наноразмерной присадкой / А.С. Парфенов, А.А. Тувин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 1. – С. 282-287. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.)
3. **Парфенов, А. С.** Адсорбционная модель формирования мезоморфного граничного смазочного слоя, образуемого наноразмерной присадкой в трибосистеме с абразивным износом / А.С. Парфенов, А.В. Волков, Е.В. Березина, В.А. Годлевский // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2022. – № 1. – С. 76–83. (0,6 п.л. / 0,36 п.л.)
4. **Parfenov, A. S.** Influence of Various Carbon Allotropes on Tribological and Rheological Characteristics of Model Lubricating Systems / A. S. Parfenov, M. A. Shilov, A. I. Smirnova, E. V. Berezina, A. G. Tkachev, A. A. Burkov, N. N. Rozhkova, N. V. Usol'tseva // Journal of Friction and Wear. – 2021. – Vol. 42. – No. 3. – Pp. 217–224. (0,6 п.л. / 0,12 п.л.)
5. **Stolbov, D. N.** Influence of different types of carbon nanoflakes on tribological and rheological properties of plastic lubricants / D. N. Stolbov, A. I. Smirnova, S. V. Savilov, M. A. Shilov, A. A. Burkov, **A. S. Parfenov**, N. V. Usol'tseva // Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures. – 2022. – Vol. 30. – No. 1,2. – Pp. 177–184. (0,6 п.л. / 0,08 п.л.)
6. **Parfenov, A. S.** Tribological activity of ultradisperse organic lubricant additives for cam mechanisms subject to abrasive wear / A.S. Parfenov, E.V. Berezina, I.V. Berezina, A.V. Volkov, V.A. Godlevsky // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 996. – Pp. 012018 (0,55 п.л. / 0,22 п.л.)
7. **Parfenov, A. S.** Tribological properties of plastic lubricants in compositions with various carbon nanostructures / A.S. Parfenov, E.V. Berezina, A.I. Smirnova, M.A. Shilov, N.V. Usol'tseva, A.A. Gvozdev, T.P. Dyachkova, N.N. Rozhkova, S.V. Savilov // Journal of Friction and Wear. – 2019. – Vol. 40. – No. 5. – Pp. 453–460. (0,7 п.л. / 0,08 п.л.)
8. **Berezina, E. V.** The likelihood description of lubrication layer formation structured at the molecular level / E. V. Berezina, A. V. Volkov, V. A. Godlevskiy, **A.S. Parfenov**, A.G. Zheleznev // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Saint Petersburg : Springer. – 2018. – Vol. PartF5. – Pp. 17-24. (0,6 п.л. / 0,12 п.л.)

***Статьи в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, ученой
степени доктора наук»***

9. **Парфенов, А. С.** Применение смазочных материалов растительного происхождения модифицированных углеродными наночастицами в условиях абразивного трения / А.С. Парфенов, Ю.А. Сенатов, П.А. Родинова, А.А. Тувин // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – Т. 68. – №4. – С. 63-68. (0,5 / 0,25 п.л.)

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616722. Программа оптимизации состава смазочных материалов для узлов трения батанного механизма ткацкого станка СТБ / **Парфенов А. С.** Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 15.04.2022.

Публикации в других изданиях

11. **Парфенов, А. С.** Противоизносное действие присадок различной природы в смазочных материалах ткацких станков / А.С. Парфенов, А.А. Тувин // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2021. – № 1. – С. 282-285. (0,18 п.л. / 0,09 п.л.)
12. **Парфенов, А. С.** Механизм абразивного износа в присутствии наноразмерной присадки / А.С. Парфенов, Е.В. Березина, Н.С. Скобелева, А.В. Волков, В.А. Годлевский // Механика и трибология транспортных систем: сборник статей международной научной конференции. Ростов н/Д. – 2021. – С.227-231. (0,18 п.л. / 0,04 п.л.)
13. **Парфенов, А. С.** Трибологические свойства и стабильность суспензий углеродных нанотрубок в индустриальном масле / А.С. Парфенов, Е.В. Березина, А.В. Волков // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS–2021) Материалы IV Международной научно-практической конференции. – 2021. – С.245-247. (0,12 / 0,04 п.л.)
14. **Парфенов, А. С.** Влияние введения углеродных нанотрубок как присадок на абразивное изнашивание деталей ткацких машин / А.С. Парфенов, И.В. Березин, В.А. Годлевский // Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново. – 2021. – С. 436-440. (0,24 п.л. / 0,08 п.л.)
15. Усольцева, Н. В. Модельные пластичные смазочные материалы с углеродными наноструктурами / Н.В. Усольцева, А.И. Смирнова, М.А. Шилов, А.А. Бурков, **А.С. Парфенов**, Е.В. Березина, Д.Н. Столбов, Р.В. Азиев, С.В. Савилов, Н.Н. Рожкова // Органические и гибридные наноматериалы. VIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. Иваново. – 2021. – С. 61-65. (0,24 п.л. / 0,024 п.л.)

16. **Парфенов, А. С.** Влияние ультрадисперсных углеродных присадок для смазочных материалов на абразивное изнашивание кулачковых механизмов / А.С. Парфенов, И.В. Березин // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы VI Республиканской научно-технической конференции молодых ученых, посвящённой памяти члена-корреспондента НАН Беларуси С. С. Песецкого. Гомель: ИММС НАН Беларуси. – 2020. – С.152-153. (0,06 п.л. / 0,03 п.л.)
17. **Парфенов, А. С.** Особенности смазочного действия ультрадисперсных органических присадок в присутствии частиц абразива в жидком смазочном материале / А.С. Парфенов, И.В. Березин, В.А. Годлевский // Трибология – машиностроению: Труды XIII Международной научно-технической конференции. – М.: ИМАШ РАН. – 2020. – С.206-209 (0,18 п.л. / 0,06 п.л.)
18. **Парфенов, А. С.** Экспериментальное исследование влияния углеродных наночастиц на трибологические свойства пластичных смазочных материалов / А.С. Парфенов, Е.В. Берёзина, А.И. Смирнова, А.А. Гвоздев, Н.В. Усольцева // Органические и гибридные наноматериалы. VII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – 2019. – С. 147-148. (0,06 / 0,01 п.л.)
19. **Парфенов, А. С.** Влияние присадок углеродных наноструктур на коэффициент трения в композициях с вазелином / А.С. Парфенов, Е.В. Березина, А.И. Смирнова, Т.П. Дьячкова, Н.Н. Рожкова, Н.В. Усольцева // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2019). – 2019. – С. 203-204. (0,06 / 0,01 п.л.)
20. Усольцева, Н. В. Графен и родственные структуры в реологических и трибологических процессах конденсированных фаз / Н.В. Усольцева, А.А. Гвоздев, А.И. Смирнова, **А.С. Парфенов**, М.А. Шилов, Е.В. Березина // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение (GRS-2019). – 2019. – С. 205-206. (0,06 / 0,01 п.л.)
21. Усольцева, Н. В. Наноматериалы в трибологических процессах / Н.В. Усольцева, **А.С. Парфенов**, Е.В. Березина, А.И. Смирнова, А.А. Гвоздев, С.В. Савилов // Органические и гибридные наноматериалы. VII Всероссийская школа-конференция молодых ученых. – 2019. – С. 57-58. (0,06 / 0,01 п.л.)
22. **Парфенов, А. С.** Трибологические свойства ряда пластичных смазочных материалов в композициях с углеродными наноструктурами различного строения / А.С. Парфенов, Е.В. Берёзина, А.И. Смирнова, А.А. Гвоздев, Т.П. Дьячкова, Н.Н. Рожкова, С.В. Савилов, Н.В. Усольцева // ПОЛИКОМТРИБ-2019: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель: ИММС НАН Беларуси. – 2019. – С.173 (0,06/0,01 п.л.)
23. Березина, Е. В. Трибологические свойства пластичных смазочных материалов с присадками наноструктурного действия / Е.В. Березина, А.М. Корчагин, А.И. Смирнова, **А.С. Парфенов**, Н.В. Усольцева, М.А. Шилов, А.А. Гвоздев // Трибология – машиностроению. Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН. – 2018. – С. 55-56. (0,06 п.л. / 0,01 п.л.)