

На правах рукописи

ТОХМЕТОВА АЙГЕРИМ БАУЫРЖАНОВНА

**ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СМАЗОЧНОГО МАСЛА ЛЕГИРОВАНИЕМ МИКРО-
/НАНОДОБАВКАМИ**

Специальность: 2.5.3 – Трение и износ в машинах

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН)

Научный руководитель: **Албагачиев Али Юсупович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Гайдар Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Материаловедение и
технология машиностроения»
ФГБОУ ВО «Российский государственный
аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева

Хопин Пётр Николаевич
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология
производства и эксплуатации двигателей
летательных аппаратов»
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени
И.М. Губкина» (ГУБКИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)

Защита состоится «25» апреля 2023 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 99.0.033.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» и Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», а также на сайте университета <https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/tokhmetova-aygerim-bauyrzhanovna>

Автореферат разослан «__»_____2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.0.033.02
кандидат технических наук, доцент

В.А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для обеспечения ресурса работы подвижных сопряжений машин применяют смазочные материалы. Подавляющее большинство современных узлов трения смазывают жидкими смазочными материалами – маслами. В настоящее время в моторных маслах содержится 5–7% присадок, повышающих смазочную способность этих масел. Существующая тенденция к повышению режимов работы узлов трения современной техники, а также необходимость обеспечения энерго- и ресурсосбережения, при одновременном требовании повышения уровня экологической безопасности, при изготовлении, хранении, эксплуатации и утилизации смазочных материалов не позволяет решить проблему повышения антифрикционных, противоизносных и противозадирных свойств масла за счёт дальнейшего увеличения содержания в них химически активных присадок.

В последние десятилетия была установлена эффективность масел с микро-/нанодобавками, в которых в качестве твёрдой фазы использовали микро-/наночастицы графита, молибденита (дисульфида молибдена), природных геомодификаторов трения (серпентинита), дисульфида вольфрама, наночастиц углерода (фуллереновых структур, углеродных нанотрубок и т.д.). Эти микро-/наночастицы не обладают химической активностью, но обеспечивают антифрикционное и противоизносное действие. Одним из препятствий к широкому распространению масел с микро-/нанодобавками, на основе приведённых выше микро-/наночастиц, является отсутствие комплексной методики подбора таких композиций и критерия, позволяющего оценить ресурс функционирования смазочных масел легированных микро-/нанодобавками, так что создание смазочных композиций на основе масел с микро-/нанодобавками до настоящего времени проводилось чисто эмпирически. С учетом вышеуказанного, на сегодня актуальной задачей является разработка комплексной методики подбора оптимальных составов масел с микро-/нанодобавками, включающая разработку методики: расчета толщины смазочного слоя, момента трения, температуры смазочного слоя; градиента температуры; вязкости; а также проведения экспериментальных исследований влияния микро-/нанодобавок на повышение ресурса смазочного слоя.

Поскольку по объёму производства и ассортименту самая большая группа смазочных масел (порядка 45,5% общего выпуска) является моторное масло, данное исследование проведено применительно к моторному маслу. В качестве основы исследуемых смазочных композиций использовали известное полусинтетическое моторное масло Mobil Ultra SAE 10W–40.

Степень разработанности темы. Повышению трибологических характеристик масел путём введения в них добавок в виде мелкодисперсных частиц графита, дисульфида молибдена, ультрадисперсного углерода, фуллеренов, углеродных нанотрубок и различных геомодификаторов (серпентинитов), а также наночастиц некоторых металлов, их оксидов и сульфидов и т.д. посвящены исследования Дж. Митчелла, И.А. Буяновского, Ю.Н. Дроздова, Д.С. Меликадзе, Д.С. Иосибидзе, С. Ли, А. Яна, Н.Я. Яхъяева, А.А. Гвоздева, А.Г. Ткачёва, Е.В. Березина, А.И. Смирнова, Н.В. Усольцева, Т.Л. Маринич, Д.Л. Телуха, Л.И. Погодаева, А.В. Дунаева, К.Н. Долгополова, Дж. Ванга, К.С. Ахвердиева, Е.Г. Задощенко, В.Е. Бурлаковой, С.

Бхаумика, Вани Халид Шафи, В. Ксиа, Л.Г. Борда и др. В исследованиях перечисленных авторов экспериментально установлено, что добавки микро-/наночастиц ряда материалов на различных лабораторных установках и стендах обеспечивают повышение антифрикционных и противоизносных характеристик смазочных масел. Однако почти никто из этих исследователей не рассматривал возможность использовать эти результаты для управления трибологическими характеристиками смазочных материалов путём построения специальной комплексной методики, включающей разработку метода расчёта температуры и градиента температуры смазочного слоя.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка комплексной методики исследования трибологических (антифрикционных, противоизносных), температурных и вязкостных характеристик жидких смазочных материалов, включающие твёрдые микро-/нанодобавки, для увеличения ресурса функционирования смазочного материала, повышение его трибологических свойств и верификация с экспериментальными данными.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих основных задач:

1. Провести анализ состояния проблемы повышения трибологических свойств смазочных материалов с микро-/нанодобавками.
2. Разработать математическую модель расчета средней температуры слоя с микро-/нанодобавками с учетом энергетического баланса пары трения при переменной скорости сдвига.
3. Разработать математическую модель расчета градиента температуры слоя с микро-/нанодобавками с учетом переменной скорости по высоте смазочного слоя.
4. Разработать математическую модель расчета момента трения, переменной толщины и температуры смазочного слоя, отличающаяся возможностью легирования смазки.
5. Разработать критерий оценки ресурса смазочного материала.
6. Провести экспериментальные исследования влияния трибологических свойств моторного масла с микро-/нанодобавками на коэффициент трения и температуру смазочного материала.
7. Выявить влияние смазочного материала с углеродными нанодобавками на степень осадки заготовки при обработке давлением.
8. Оценить антифрикционное действие нанодобавок к полноформульному моторному маслу в условиях граничной смазки.
9. На основе проведенных трибологических экспериментов осуществить проверку верификации предложенных моделей.

Объект и предмет исследования. Объект исследования - смазочные материалы с микро-/нанодобавками при трении скольжения.

Предметом являются исследования влияния концентрации микро-/нанодобавок на моторное масло, среднюю температуру, градиент температуры, толщину смазочного слоя, момент трения, коэффициент трения, износ и осадку заготовки.

Теоретико-методологическая основа исследования включает применение преобразования Лапласа и метода прогонки для решения дифференциального

уравнения теплопроводности в частных производных. При разработке математических моделей были использованы языки программирования Delphi и Python.

Экспериментальные исследования трибологических характеристик смазочных материалов выполнялись на универсальной машине трения УМТ–1 и маслоиспытательной машине КТ–2, а также на автоматизированном комплексе «Компьютеризированный пресс с ЧПУ». Полученные данные обработали с использованием теории обработки результатов экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. В разработанной, на основе энергетического баланса трения, модели и результатов расчета средней температуры смазочного слоя с учетом переменной скорости сдвига, подтвержденных экспериментальными данными (п. 9 – «Теплофизика и тепловая динамика трения и изнашивания.»).
2. В разработанной, на основе решения уравнения теплопроводности Фурье, математической модели и результатов расчета динамического градиента температуры по высоте легированного смазочного слоя с учетом переменной скорости сдвига, подтвержденных экспериментальными данными (п. 9 – «Теплофизика и тепловая динамика трения и изнашивания.»).
3. В полученных данных по оптимизации концентрации добавок в легированных смазках с использованием программного комплекса №2022662966, разработанного на основе решения модифицированного дифференциального уравнения Рейнольдса с переменной вязкостью, подтвержденных экспериментальными данными (п. 12 – «Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем.»).
4. В повышении антифрикционных свойств смазочного масла в режиме гидродинамической и смешанной смазки путём применения смазочной композиции, включающей добавки фуллерена C_{60} с концентрацией 0,1 % и 2 %, построенной с помощью экспериментальных данных диаграммы Герси – Штрибека (п. 8 – «Триботехнические свойства смазочных материалов.»).

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Комплексная методика, включающая модели: расчета средней температуры, разработанной на основе энергетического баланса пары трения при переменной скорости сдвига; расчета градиента температуры смазочного слоя; расчета толщины смазочного слоя, момента трения и температуры слоя на основе уравнения Рейнольдса с переменной вязкостью.
2. Критерий оценки ресурса смазочного материала.
3. Результаты проведенных трибологических испытаний исследуемого масла Mobil Ultra SAE 10W – 40 с серпентинитом и шунгитом для трёх характерных пар трения.
4. Результаты исследования влияния фуллерена C_{60} на коэффициент трения в режиме гидродинамической смазки.
5. Результаты применения фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок в качестве антифрикционных добавок к смазочному маслу при осадке заготовки.

Теоретическая значимость заключается в разработанной комплексной методике, исследования смазочной способности масел с твёрдыми микро-

/нанодобавками, включающая разработанные математические модели, позволяющие оценить температуру при сдвиге и переменной скорости в слое, рассчитать динамический (временной) градиент температуры по толщине, переменную толщину, момент трения, температуру и критерий оценки ресурса смазочного материала, исходя из результатов лабораторных экспериментов.

Практическая значимость. Разработанные модели и программный комплекс позволяют создавать смазочные масла, обладающие оптимальными антифрикционными и противоизносными свойствами за счёт введения в них микро-/нанодобавок: геомодификаторов трения или наноуглерода.

Достоверность результатов и выводов подтверждается их сопоставимостью с экспериментальными данными, использованием апробированных методик при проведении исследований, сходимостью теоретических выводов с результатами экспериментальных испытаний.

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

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с пунктами 8, 9 и 12 паспорта специальностей научных работников по специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах.

Апробация результатов диссертации. Положения и результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях: VII международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (г. Москва, 2021 г.), международная научная конференция «Scientific research of the sco countries: synergy and integration» (June 28, 2022), XIV Международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению 2022» (г. Москва, 2022 г), VI международная научно-техническая конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение Живком – 2022» (г. Москва, 2022 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, 5 из них в журналах из Перечня ВАК Минобрнауки России, 3 – в журналах, из Перечня ВАК Минобрнауки России и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 3 в сборниках международных конференций и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка цитируемой литературы (121 наименований), содержит 113 страниц машинописного текста.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, поставлены цель и задачи исследований. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость научных результатов.

В первой главе приводится анализ публикаций по современным смазочным

материалам и их составам, включая добавки трибологического назначения. Особое внимание было уделено относительно немногочисленным трибологическим исследованиям масел с добавками ресурсовосстанавливающих геомодификаторов трения (в основном – серпентинитов) и углеродных нанодобавок (фуллерена C₆₀ и нанотрубок). Именно эти добавки представляют значительный интерес в качестве альтернативы маслорастворимым трибологически активным присадкам, применяемым в настоящее время в отечественной и мировой практике. В то же время трибологические свойства в режимах жидкостной и смешанной смазки для масел с указанными добавками в настоящее время мало изучены, поскольку для корректного исследования этого процесса необходимо развитие теории гидродинамической смазки применительно к маслам с твёрдыми микро-/нанодобавками. Естественно, это потребует усовершенствования расчётов температуры смазочного слоя, градиента температуры, вязкости масла с твёрдыми добавками и т.д. Именно эти расчёты составили теоретическую часть разработанной комплексной методики исследования смазочных масел с твёрдыми добавками.

В первом разделе второй главы разработана математическая модель для расчета средней температуры на основе энергетического баланса пары трения при переменной скорости сдвига в смазочном слое.

Нагрев смазочного материала в узлах трения сильно влияет на срабатывание активных компонентов смазочных материалов. Поэтому при эксплуатации оборудования необходимо контролировать температуру в зоне трибоконтakta.

Математическая модель для расчета средней температуры θ в смазочном слое имеет вид

$$\theta = \frac{\tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \sqrt{t}}{1,73(\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2})}, \quad (1)$$

где τ – напряжения сдвига, v_0 – скорость сдвига, z – координата, H – высота смазочного слоя, t – время, $\lambda_{1,2}$ – теплопроводность поверхностей, $\rho_{1,2}$ – плотность поверхностей, $c_{1,2}$ – теплоемкость поверхностей.

Во втором разделе анализируется теплопередача через смазочный слой (рис. 1).

Рассмотрена задача на основе уравнения теплопроводности Фурье в частных производных с начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (a = \text{const} > 0),$$

$$\theta(z, 0) = 0, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = \alpha \tau_1 v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right),$$

$$\theta(\infty, t) = 20.$$

где a – температуропроводность, α – коэффициент распределения теплоты между смазкой и вращающейся металлической поверхностью, τ_1 – напряжения сдвига, λ – теплопроводность смазочного материала.

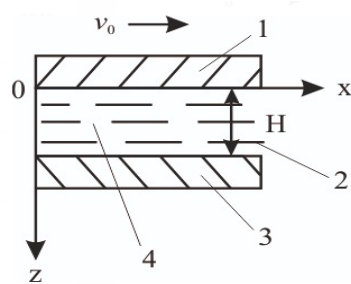


Рисунок 1 – Модель задачи: 1 – подвижная поверхность, 2 – зазор, 3 – неподвижная поверхность, 4 – смазочный материал

Решение температурной задачи (2) выполняли методом интегрального преобразования Лапласа:

$$\theta(z, t) = \frac{\alpha \tau v_0 \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \left\{ \frac{2e^{-\frac{z^2}{4at}} \sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - \frac{z}{\sqrt{a}} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)\right) \right\}. \quad (3)$$

Результаты численного решения этой задачи получено методом конечных разностей с аппроксимацией второго порядка, приведены на рис. 2. Количество разбиений по пространственной координате равно 100.

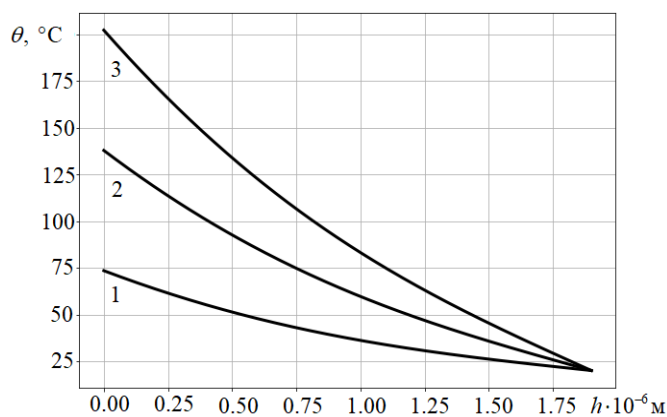


Рисунок 2 – Распределение температуры смазочного слоя при напряжениях сдвига:
 1 – $\tau = 51,72 \cdot 10^4 \text{ Па}$; 2 – $\tau = 103,44 \cdot 10^4 \text{ Па}$; 3 – $\tau = 155,17 \cdot 10^4 \text{ Па}$

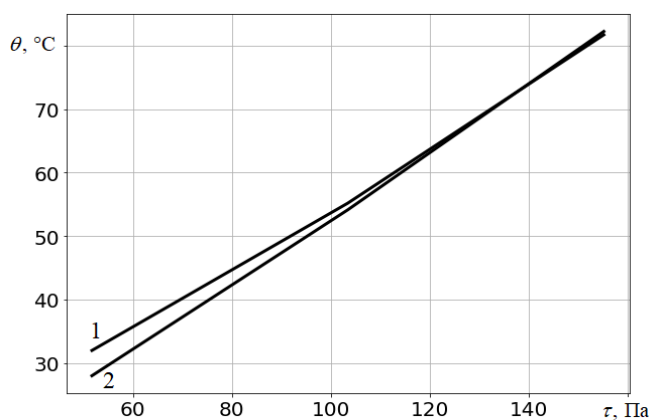


Рисунок 3 – Сравнение решений температурной задачи:
 1 – численное решение, 2 – аналитическое решение

Разница между аналитическим и численным решением составляет 4% (рис. 3). Совпадение результатов расчета двух решений позволяет говорить о достоверности получаемых данных численным и аналитическим методами.

В третьем разделе приведена разработанная аналитико-численным методом модель пары трения скольжения с легированным смазочным материалом в гидродинамическом режиме, а также проведенные по созданной программе на языке Delphi результаты расчета момента трения, толщины и температуры смазочного слоя.

Разработанный метод расчета пары трения скольжения основан на применении модифицированного уравнения Рейнольдса, полученного из уравнения Навье – Стокса для тонкого смазочного слоя, которое в полярной системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rp \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial(ph)}{\partial t}, \quad (4)$$

где t – время, p – давление, μ – вязкость смазочного материала, h – высота смазочного слоя.

Отметим, что давление, развиваемое в смазочном слое, уравновешивает приложенную к поверхности нагрузку, т.е.

$$2\pi \int_r^R xp(x, t)dx = Q, \quad (5)$$

где Q – нагрузка на единицу длины; r, R – граница поверхности.

Граничные условия для давления и начальное условие для толщины смазочного слоя приведены в (6):

$$p(x, t)|_{x=r} = p(x, t)|_{x=R} = 0, h(0) = H. \quad (6)$$

Зависимость вязкости от давления и температуры выражается известной экспоненциальной формулой:

$$\mu = \mu_{с.м.} \exp(\alpha p) \exp(-h(\theta - \theta_0)), \quad (7)$$

где p — давление, α — пьезокоэффициент вязкости, $\mu_{с.м.}$ — динамический коэффициент вязкости.

Динамический коэффициент вязкости по Бэтчелору, описывающий гидродинамическое взаимодействие между фуллереном C_{60} в смазочной композиции с учётом броуновского движения фуллерена, выражается:

$$\mu_{с.м.} = \mu_0 (1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2), \quad (8)$$

где μ_0 – динамическая вязкость моторного масла, φ – концентрация фуллерена C_{60} .

Линейная зависимость динамической вязкости смазочного материала от концентрации фуллерена C_{60} представлена на рис. 4.

Момент трения M находится по формуле:

$$M = \frac{\pi\omega\mu_0(R^4 - r^4)}{2h}, \quad (9)$$

где ω – угловая скорость.

Уравнение энергии для тонкого слоя смазки запишем как

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right). \quad (10)$$

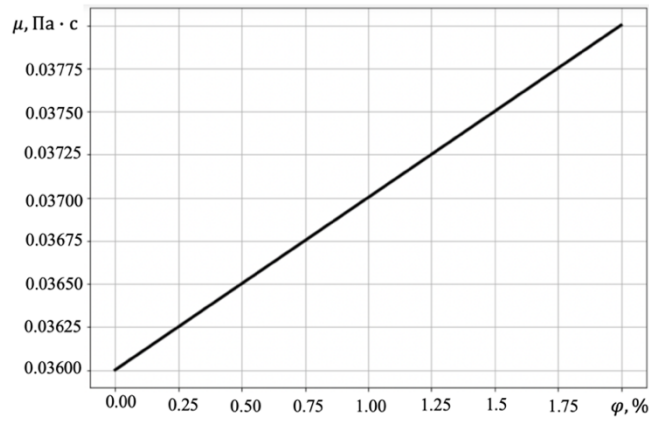


Рисунок 4 – Зависимость динамической вязкости смазочной композиции от концентрации фуллерена C₆₀

Начальное и граничные условия для уравнения энергии при тонком слое смазки имеет вид:

$$\theta(0, t) = \theta_z, \quad \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} = -\alpha \tau_1 v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right), \quad \theta(t, H) = 0. \quad (11)$$

После перехода к безразмерным переменным уравнения (4 – 11) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right) = \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{t}}, \quad (12)$$

$$\int_1^{\bar{R}} \bar{x} \bar{p}(\bar{x}) d\bar{x} = 1, \quad (13)$$

$$\bar{p}(1, \bar{t}) = \bar{p}(\bar{R}, \bar{t}) = 0, \quad \bar{h}(1) = 1, \quad (14)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \exp(G\bar{p}) \exp(-\Omega\bar{\theta} + \delta), \quad (15)$$

$$\bar{M} = \frac{\pi \bar{\mu}_0 \bar{\omega} (R^4 - r^4)}{2\bar{h}}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} = \left(\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{t}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{z}^2} \right), \quad (17)$$

$$\bar{\theta}(0, \bar{t}) = 0, \quad \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{t}} = 1 - \bar{z}, \quad \bar{\theta}(\bar{t}, 1) = 0. \quad (18)$$

Численное решение системы интегродифференциальных уравнений (12 – 18) получили методом прогонки. Был разработан программный комплекс на языке программирования Delphi, который зарегистрирован федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) № 2022662966 от 08.07.2022.

На рис. 5 представлены результаты расчета толщины смазочного слоя в зависимости от времени.

В качестве смазочного материала использовано полусинтетическое моторное масло SAE 10W – 40 с различными концентрациями фуллерена C₆₀, дисперсность которых составляла 1 нм. Установлено, что при изменении концентрации фуллерена в смазочном материале толщина слоя практически не менялась. В табл. 1 – 2 представлены момент трения и температура смазочного слоя при 0,2 – 2 % фуллерена C₆₀ в моторном масле SAE 10W – 40.

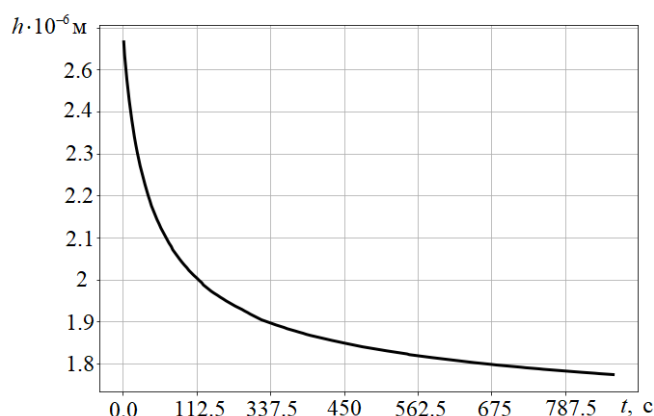


Рисунок 5 – Зависимость толщины смазочного слоя от времени испытаний

Таблица 1 – Расчетный момент трения смазочных слоев масла SAE 10W–40 при различной концентрации фуллерена C₆₀ и нагрузки

Концентрация фуллерена, %	$M, Н \cdot м (N = 80 Н)$	$M, Н \cdot м (N = 200 Н)$
0	0,28	0,090
0,2	0,19	0,070
0,8	0,18	0,060
1	0,17	0,050
1,5	0,15	0,047
2	0,13	0,040

Таблица 2 – Расчетная температура смазочных слоев масла SAE 10W–40 при различной концентрации фуллерена C₆₀ и нагрузки

Концентрация фуллерена, %	$\theta, ^\circ C (N = 80 Н)$	$\theta, ^\circ C (N = 200 Н)$
0	82,6	73,0
0,2	66,7	68,0
0,8	63,8	64,0
1	58,0	55,8
1,5	53,0	51,0
2	50,0	50,0

В четвертом разделе второй главы с помощью анализа размерностей выведен критерий оценки ресурса t_d смазочного материала с нанодобавкой в зависимости от температуры, физико – механических свойств и вязкости. На основании анализа теоретических и экспериментальных работ, были выявлены параметры, влияющие на

ресурс смазочного материала, и составлено параметрическое уравнение для оценки ресурса смазочного материала t_d

$$t_d = f(\theta, \mu, \rho, c), \quad (19)$$

где θ – температура смазочной среды, °С, ρ – плотность смазочной среды, кг/м³, c – теплоемкость смазочной среды, Дж/(кг·м³), μ – вязкость смазочной среды, Па·с.

Задача состоит в получении показателей в формуле

$$t_d = \theta^\alpha, \mu^\beta, \rho^\gamma, c^\varepsilon. \quad (20)$$

В результате преобразований получаем

$$\alpha = -1, \beta = 1, \gamma = -1, \varepsilon = -1.$$

Подставим найденные значения показателей в (20) и получим:

$$t_d = \frac{\mu}{\theta \rho c}. \quad (21)$$

Исходя из (21), безразмерный критерий оценки ресурса смазочного материала имеет следующий вид:

$$\frac{t_{d1}}{t_{d0}} = \frac{\frac{\mu_1}{\theta_1 \rho_1 c_1}}{\frac{\mu_0}{\theta_0 \rho_0 c_0}} = \frac{C_\mu}{C_\theta C_\rho C_c}, \quad (22)$$

где $C_\mu = \frac{\mu_1}{\mu_0}$, $C_\theta = \frac{\theta_1}{\theta_0}$, $C_\rho = \frac{\rho_1}{\rho_0}$, $C_c = \frac{c_1}{c_0}$, t_{d0} , t_{d1} – ресурс моторного масла и того же масла с добавками фуллерена C_{60} , μ_0, μ_1 – вязкость моторного масла и того же масла с добавками фуллерена C_{60} , θ_0, θ_1 – температура моторного масла и того же масла с добавками фуллерена C_{60} , ρ_0, ρ_1 – плотность моторного масла и того же масла с добавками фуллерена C_{60} , c_0, c_1 – теплоемкость моторного масла и того же масла с добавками фуллерена C_{60} .

Из проведенных расчетов (табл. 3) следует, что введение наночастицы C_{60} приводит к росту критерия оценки ресурса смазочного материала.

Таблица 3 – Критерий оценки ресурса смазочного материала при различных смазочных композициях

Исследуемые смазочные материалы	Критерий оценки ресурса $\frac{t_d}{t_{d0}}$
Масло	1,0000
Масло + 0,2% C_{60}	1,2469
Масло + 1 % C_{60}	1,4571
Масло + 2 % C_{60}	1,7355

В третьей главе приводятся методики получения композиционных смазочных материалов, лабораторное оборудование и приборы, использованные в данной работе.

Смазочная материал включает полусинтетическое моторное масло Mobil Ultra SAE 10W–40 и микро-/нанодобавки. Испытывались следующие добавки: серпентинит, шунгит, фуллерен (C₆₀) и углеродные нанотрубки (УНТ).

Смазочные композиции получали путем перемешивания моторного масла с микро-/нанодобавками на ультразвуковом диспергаторе (рис. 6).

Трибологические характеристики композиционных смазочных материалов в работе определяли на универсальной машине трения УМТ – 1 и маслоиспытательной машине КТ – 2 по методикам ИМАШ РАН, а также на лабораторном комплексе ОМД – 1 ЧПУ РТУ/МИРЭА.

Моделирование пары трения скольжения со смазкой осуществлялось по испытательной схеме «кольцо-кольцо» (рис. 7) на универсальной машине трения УМТ–1. Смазка в зону трения вводилась капельным способом. Испытываемые образцы были изготовлены из стали 30ХГСА, бронзы БрАЖМц10–3–1,5 и чугуна СЧ 15–32.

Кроме того, проводили сравнительные испытания масла и масла с углеродными нанодобавками при осадке (рис. 8) на лабораторном комплексе ОМД–1 ЧПУ. При испытании автоматически получали диаграмму осадки – график зависимости между усилием и перемещением образца. Измерение усилия проводилось по отсчетным устройствам прессы с погрешностью измерения $\pm 2\%$. Смазка между торцевыми поверхностями образца и опорными плитами осуществлялась капельным способом.

Для исследования температурной стойкости моторного масла с введением углеродных нанодобавок проведены испытания на четырехшариковой машине КТ – 2 (рис. 9) температурным методом по ГОСТу 23.221-84 в интервале температур 30 – 200 °С. Образцами служили шарики диаметром 7,94 мм по ГОСТу 3722-81 из стали 100Cr6. Осевая нагрузка составляла 107,8 Н, контактная нагрузка на один шар равна 44,2 Н. Скорость скольжения составляла 0,24 мм/с, частота вращения верхнего шара 1 мин⁻¹. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью 10 °С/мин. Момент трения оценивали в течении 60 с через каждые 10 °С. Коэффициент трения находился из момента трения.

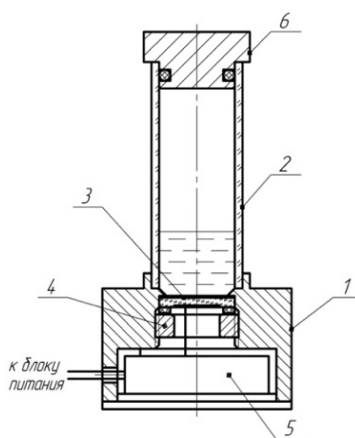


Рисунок 6 – Ультразвуковой диспергатор:

1 – основание, 2 – стеклянный цилиндр, 3 – пьезоэлемент, 4 – прижимная гайка, 5 – плата генератора, 6 – заглушка

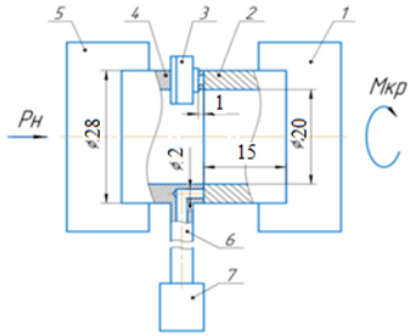


Рисунок 7 – Схема расположения образцов и датчиков: 1 – вращающийся патрон УМТ; 2 – вращающийся образец; 3 – инфракрасный датчик температуры MLX90614; 4 – неподвижный образец; 5 – неподвижный патрон УМТ; 6 – трубка для измерения давления смазки; 7 – датчик давления смазки.

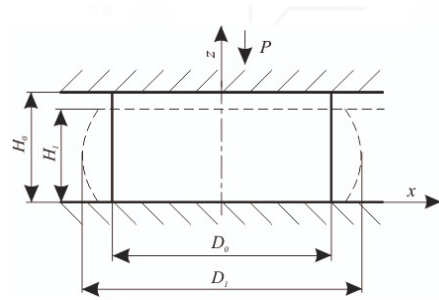


Рисунок 8 – Схема осадки

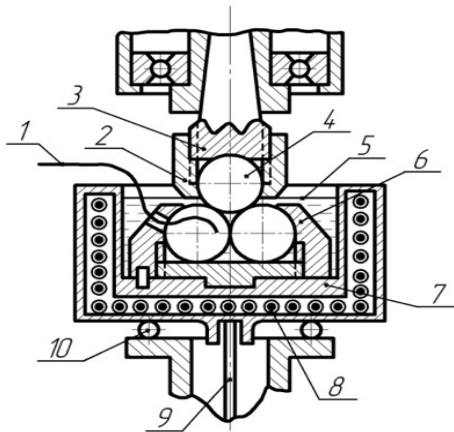


Рисунок 9 – Узел трения маслоиспытательной машины: 1 – термopа; 2 – накидная гайка; 3 – конус шпинделя; 4 – шарик; 5 – верхний уровень масла; 6 – оправка; 7 – корпус нагревателя; 8 – спираль нагревателя; 9 – торсион; 10 – опорный подшипник.

В четвертой главе представлены результаты оценки влияния серпентинита и шунгита на трибологические свойства масла для пар трения сталь – бронза, сталь – чугун, чугун – бронза на машине трения УМТ-1.

На первом этапе проводились испытания с частотой вращения 50, 100, 300 об/мин при постоянных нагрузках $N = 150, 300, 450$ Н со смазочными композициями: масло, масло + 0,05 % серпентинита, масло + 0,1 % серпентинита.

Результаты испытаний пар трения сталь – бронза, сталь – чугун, чугун – бронза (табл. 4) при нормальной нагрузке 150 Н показали, что при введении серпентинита (0,05 %) в масло для всех сочетаний пар трения коэффициент трения снижается в 1,36 раза, а увеличение концентрации серпентинита до 0,1 % снижает его в 1,46 раз.

Для пар трения при нормальной нагрузке 300 Н и 450 Н (табл. 4) введение добавок практически не влияет на коэффициент трения, а в некоторых случаях даже увеличивает его значение.

Введение добавки серпентинита в масло снижает износ всех фрикционных пар трения и температуру смазочного слоя (табл. 4).

Таблица 4 – Средние значения коэффициента трения f_{cp} , интенсивности изнашивания I_{cp} и температуры смазочного слоя θ_{cp} для пар трения сталь – бронза, сталь – чугун, чугун – бронза

Масло с добавками	–	+ 0,05 % серпентинита	+ 0,1 % серпентинита
$N, Н$	150Н/300Н/450Н		
f_{cp}	0,19/0,08/0,06	0,14/0,08/0,08	0,13/0,09/0,07
$I_{cp}, мкм/км$	0,014/0,027/0,017	0,025/0,012/0,015	0,005/0,009/0,004
$\theta_{cp}, ^\circ C$	27/39,4/42,1	28,3/37,3/38,5	24,5/38,1/32,1

Из полученных результатов видно, что повышение содержания серпентинита с 0,05% до 0,1% более заметно улучшает антифрикционные и противоизносные свойства смазочного материала.

На втором этапе проводились сравнительные испытания масла и масла с шунгитом (0,05 %) при частоте вращения 50, 100, 300 об/мин при постоянной нагрузке 150 и 450 Н.

При нагрузке 150 Н для всех сочетаний пар трения введение шунгита снижает коэффициент трения и температуры смазочного слоя, в отличие от нагрузки 450 Н (табл. 5).

Таблица 5 – Средние значения коэффициента трения f_{cp} и температуры смазочного слоя θ_{cp} для пар трения сталь – бронза, сталь – чугун, чугун – бронза

Масло с добавками	-	+ 0,05 % шунгита
$N, Н$	150Н/450Н	
f_{cp}	0,065/0,055	0,061/0,058
$\theta_{cp}, ^\circ C$	23,2/24,9	22,8/25,2

Исходя из этого можно сделать вывод, что смазочные материалы с испытанными микродобавками целесообразно использовать при малых контактных нагрузках.

Третий этап посвящен исследованию влияния фуллерена C_{60} на трибологические свойства масла на машине трения УМТ–1 с образцами выполненными из стали 30ХГСА при скорости 1,5 м/с и нагрузках 80 и 200 Н. Испытания проводили со следующими смазочными композициями: масло, масло + 0,2 % C_{60} , масло + 0,8 % C_{60} , масло + 1 % C_{60} , масло + 1,5 % C_{60} , масло + 2 % C_{60} . Продолжительность испытаний каждой пары трения составляла 15 мин.

Из результатов опытных данных (рис. 10 и 11) видно, что коэффициент трения и температура смазочного слоя снижается с ростом концентрации C_{60} .

Отмечена тенденция снижения коэффициента трения с ростом нагрузки. Для смазочных материалов с C_{60} наблюдается снижение температуры в зоне контакта в среднем на 18 °С по сравнению с моторным маслом.

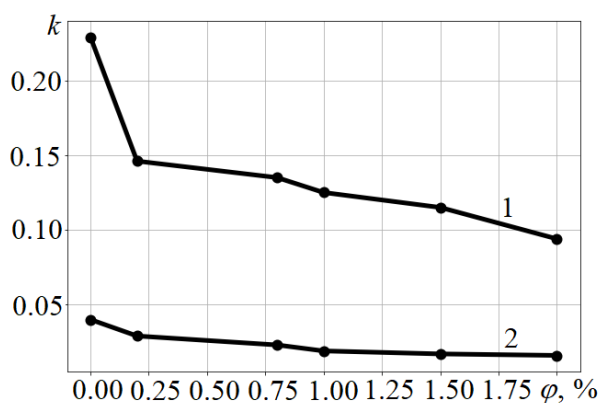


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента трения от концентрации фуллерена C_{60} :
1 – $N = 80 \text{ Н}$, 2 – $N = 200\text{Н}$

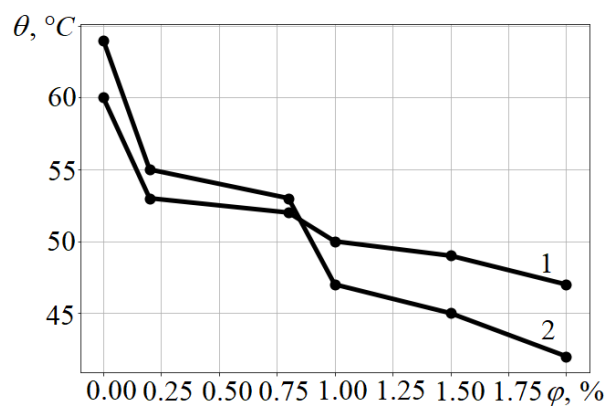


Рисунок 11 – Зависимость температуры смазочного слоя от концентрации фуллерена C_{60} :
1 – $N = 80 \text{ Н}$, 2 – $N = 200\text{Н}$

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде диаграммы Герси – Штрибека на рис. 12. видно, что при смазке маслом коэффициент трения снижается в среднем в 1,9 раза при введении в это масло добавки C_{60} .

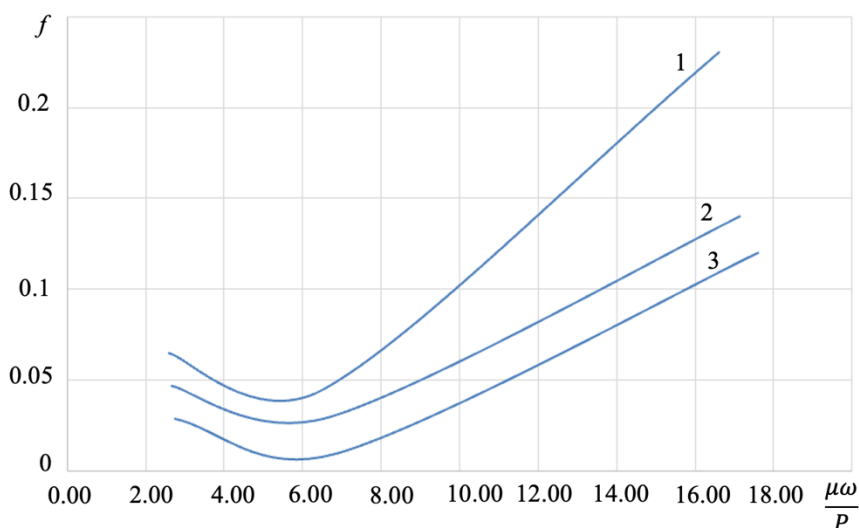


Рисунок 12 – Диаграмма Герси – Штрибека при смазке контактирующих тел исследуемым маслом с добавлением C_{60} : 1 –масло, 2 – масло + 0,1 % C_{60} , 3 – масло + 2 % C_{60} .

Таким образом, результаты экспериментов смазочных композиций, состоящих из моторного масла и фуллерена C_{60} , подтверждает их совместное действие.

Первый раздел пятой главы посвящен экспериментальным испытаниям осадки заготовки со смазочными материалами, содержащие фуллерен C_{60} и углеродные нанотрубки (УНТ). Осадка была реализована на автоматизированном лабораторном комплексе «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД–1 ЧПУ РТУ/МИРЭА. Опорные плиты которых выполнены из стали 20 с использованием цилиндрических образцов диаметром и высотой 20 мм, которые были распечатаны на 3D – принтере.

Смазку между торцевыми поверхностями образца и опорными плитами вводили капельным способом.

Испытания показали, что усилие осадки снижается в результате влияния смазки с фуллереном C_{60} и нанотрубками на тангенциальное трение между заготовкой и инструментом. Установлено, что в одинаковых условиях осадки, добавка C_{60} и

углеродных нанотрубок снижает коэффициент трения, что отражено на представленной диаграмме (рис. 13). Наибольшее влияние на коэффициент трения при осадке, снизив его на 18 %, показали масло с 1 % – ым содержанием углеродных нанотрубок (УНТ) и масло с 2 % – ом содержанием C_{60} .



Рисунок 13 – Среднее значение коэффициента трения при исследуемом масле с добавками: А – без смазочного материала, В – масло, С – масло + 0,1 % C_{60} , D – масло + 0,2 % C_{60} , E – масло + 1 % C_{60} , F – масло + 2% C_{60} , G – масло + 0,1 % УНТ, H – масло + 0,2 % УНТ, I – масло + 1 % УНТ

Второй раздел посвящен исследованию влияния высоких температур на антифрикционные свойства масла с добавлением C_{60} и УНТ. На маслоиспытательной машине КТ–2 испытали три смазочных материала: масло, масло + 2 % C_{60} , масло + 1 % УНТ.

Согласно ГОСТу 23.221-84, на графике (рис. 14) приведены средние значения коэффициента трения f по трем испытаниям для каждого сравниваемого состава.

В результате проведенных экспериментальных исследований (рис. 14) при ступенчатом повышении температуры исследуемых смазочных материалов, от внешнего источника тепла, коэффициент трения резко возрастает при 180 °С для масла, при 190 °С для масла с фуллереном C_{60} , при 200 °С для масла с углеродными нанотрубками.

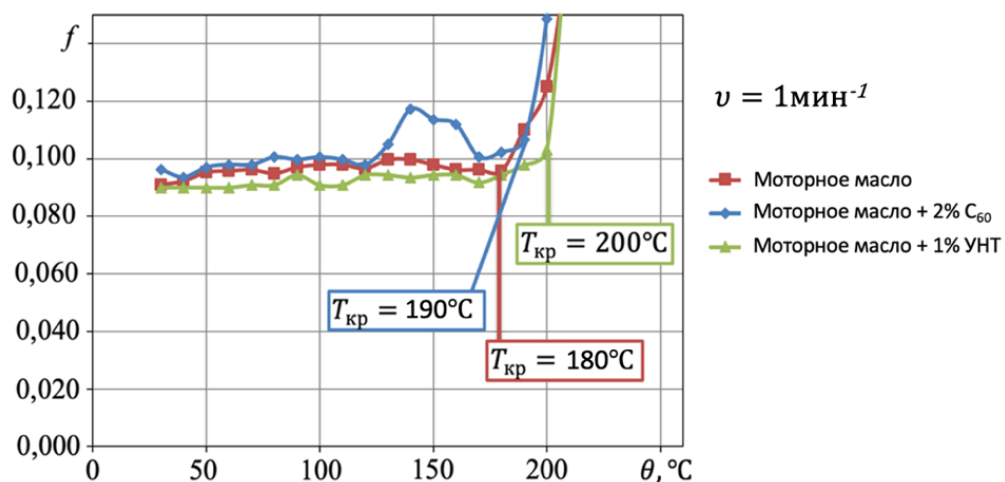


Рисунок 14 – Зависимость среднего значения коэффициента трения от температуры

Исходя из анализа данных (рис. 14), при введении C_{60} и УНТ в масло наблюдался рост критической температуры смазочного слоя на 10 и 20 °С соответственно.

Шестая глава посвящена сравнительной оценке экспериментальных исследований и теоретических расчетов.

Основные выводы по диссертационной работе:

1. Анализ состояния проблемы показал, что ресурс работы смазываемых узлов трения современных машин может быть повышен путём введения в смазочные масла (в том числе полноформульные) микро- и нанодобавок: геомодификаторов трения и ряда модификаций углерода (фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок).
2. Разработана комплексная методика повышения трибологических свойств моторного масла с твёрдыми добавками, состоящая из моделей:
 - расчета температуры смазочного слоя при переменной скорости сдвига;
 - расчета градиента температуры смазочного слоя с микро-/нанодобавками при переменной скорости сдвига смазочных слоев;
 - программного комплекса для расчета момента трения, толщины и температуры легированного смазочного слоя полученного на основе решения модифицированного дифференциального уравнения Рейнольдса с переменной вязкостью, который зарегистрирован федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) № 2022662966 от 08.07.2022.
3. На основе анализа размерностей с учетом влияния температуры, физико – механических свойств и вязкости предложен критерий оценки ресурса смазочного материала.
4. Экспериментально установлено, что введение в смазочную композицию (0,1 %) серпентинита снижает коэффициент трения на ~ 26%, интенсивность изнашивания на ~ 60% и температуру смазочной среды на ~ 9% для различных пар трения при малых контактных нагрузках, что позволяет обеспечить достижение повышенных трибологических свойств смазочного масла.
5. Показана возможность повышения антифрикционных свойств масел в режиме гидродинамической и смешанной смазки, при построении по экспериментальным данным диаграммы Герси – Штрибека, путём применения смазочной композиции, включающей добавки фуллерена C_{60} с концентрацией 0,2 % и 2 %.
6. Установлено, что при осадке заготовки повышаются антифрикционные свойства легированного масла на ~ 18%. Влияние углеродных нанодобавок (фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок) приводит к снижению тангенциального трения между заготовкой и инструментом, и усилие осадки уменьшается.
7. Экспериментально установлено, что введение углеродных нанодобавок в полусинтетическое моторное масло, позволяет повысить критическую температуру деструкции масла при трении на 10 – 20 °С до резкого возрастания коэффициента трения.

8. Верификация разработанных моделей подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Основные публикации по теме диссертационной работы

Публикации в изданиях по перечню ВАК:

1. Албагачиев А.Ю. Трибологические характеристики наномодификатора 1/ А.Ю. Албагачиев, Н.Н. Новикова, А.Б. Тохметова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – Москва, 2020. – №5. – С. 108–112. *
2. Albagachiev A.Yu. Tribotechnical characteristics of nanomodifier 1/ A.Yu. Albagachiev, N.N. Novikova, A.B. Tokhmetova // Journal of machinery manufacture and reliability. – Moscow, 2020. – №5. – P. 457 – 461. *
3. Албагачиев А.Ю. Трибологические свойства наномодификатора 2/ А.Ю. Албагачиев, А.Б. Тохметова // Проблемы машиностроения и автоматизации. – Москва, 2020. – №3. – С. 50–53.
4. Albagachiev A.Yu. Tribotechnical properties of nanomodifier 2/ A.Yu. Albagachiev, A.B. Tokhmetova // Journal of machinery manufacture and reliability. – Moscow, 2020. – №10. – P. 870–873. *
5. Тохметова А.Б. Исследования трибологических свойств моторного масла с содержанием фуллеренов / А.Б. Тохметова, А.В. Михеев, М.А. Тананов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 4. – С. 108–112.
6. Албагачиев А.Ю. Определение температуры нагрева смазочного слоя при трении / А.Ю. Албагачиев, А.В. Михеев, М.А. Тананов, А.Б. Тохметова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – № 5. – С. 93–98.
7. Тохметова А.Б. Исследования влияния смазочных композиций на основе серпентинита на интенсивность изнашивания и температуру смазочного слоя // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 2. – С. 66–71.
8. Влияние смазочных композиций с содержанием фуллеренов на процесс осадки заготовки / А. Ю. Албагачиев, А. Б. Тохметова, С. В. Скрипник [и др.] // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 10(10). – С. 28–35.

Звездочкой отмечены публикации, входящие помимо перечня ВАК в базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus.

Публикации в сборниках материалов конференций:

1. Михеев А.В. Моделирование температуры при смешанной смазке / А.В. Михеев, А.Б. Тохметова, М.А. Тананов // Научные труды VII международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении – 2021» (FRITME – 2021)/ – Москва, 2021. – С. 171–174.
2. Albagachiev A.Yu. Influence of Nano-additives on the tribological characteristics of lubricants / A.Yu. Albagachiev, A.B. Tokhmetova // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration : Proceedings of the International Conference, Beijing, 28 июня 2022 года. – Beijing: Инфинити, 2022. – P. 169–174.

3. Тохметова А.Б. Влияние смазочных композиций с содержанием углеродных наноматериалов на процесс осадки цилиндрической заготовки/ А.Ю. Албагачиев, А.Б. Тохметова, С.В. Скрипник // XIV Международная научная конференция «Трибология - машиностроению» / – Москва, 2022. – С. 271–274.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022662966. Программный комплекс для расчета нестационарной задачи двух сближающихся поверхностей / А.Ю. Албагачиев, А.Б. Тохметова, П.П. Усов – Заявка № 2022662429. Дата поступления 01 июля 2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08 июля 2022 г.