

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

На правах рукописи

Тохметова Айгерим Бауыржановна

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

Специальность: 2.5.3 – Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Албагачиев Али Юсупович

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ МИКРО-/НАНОДОБАВКАМИ	11
1.1. Основные типы моторных масел	11
1.2. Типы добавок к смазочным материалам	12
1.3 Анализ работы пар трения скольжения с использованием смазочных материалов.....	26
1.4 Развитие тепловой задачи трения	29
1.5 Цель и задачи диссертационной работы	31
Выводы по главе 1:	33
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ, ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ И МОМЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ И СМЕШАННОМ ТРЕНИИ.....	34
2.1. Математическая модель для расчета средней температуры на основе энергетического баланса трения при переменной скорости сдвига в смазочном слое.....	34
2.2. Решение температурной задачи при переменной скорости сдвига в смазочном слое.....	35
2.3. Моделирование толщины смазочного слоя, момента трения и температуры смазочного слоя при переменной вязкости смазочного материала.....	41
2.4. Критерий оценки ресурса смазочного материала.....	47
Выводы по главе 2:	50
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	52
3.1. Методика перемешивания смазочной композиции.....	55
3.4. Экспериментальные установки	58
3.4.1. Экспериментальная установка УМТ – 1.....	58
3.4.2. Автоматизированный комплекс «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ	62
3.4.3. Экспериментальная установка КТ – 2	64
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАСЛА С МИКРО-/НАНОДОБАВКАМИ	66
4.1 Определение влияния серпентинита на коэффициент трения, интенсивность изнашивания материалов и температуру смазочного слоя	66

4.2 Определение влияния шунгита на коэффициент трения и температуру смазочного слоя	74
4.3 Определение влияния фуллерена C ₆₀ на трибологические свойства моторного масла.....	76
Выводы по главе 4:	79
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОДОБАВКАМИ	81
5.1. Определение влияния фуллерена C ₆₀ и углеродных нанотрубок на трибологические свойства моторного масла при осадке.....	81
5.2. Определение влияния фуллеренов и углеродных нанотрубок на антифрикционные свойства моторного масла	85
Выводы по главе 5:	86
ГЛАВА 6. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ.....	87
Выводы по главе 6:	93
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ	94
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ:	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	111
ПРИЛОЖЕНИЕ В	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время одним из приоритетных направлений обеспечения энерго- и ресурсосбережения в машиностроении является обеспечение долговечности подвижных сопряжений машин и механизмов и минимизации энергетических потерь при их эксплуатации. Наиболее эффективным методом решения этой проблемы является использование в качестве компонентов этих сопряжений смазочных материалов. Как известно, к основным функциям смазочных материалов в парах трения скольжения относятся: снижение трения в трибосопряжении до необходимого уровня, предотвращение заедания пар трения скольжения и уменьшение интенсивности изнашивания трущихся тел и др. Подавляющее большинство современных пар трения скольжения смазывают жидкими смазочными материалами – маслами. Масла состоят из базовой жидкости (основы) и присадок, представляющих собой маслорастворимые химически активные продукты, содержащие серу, фосфор, хлор и некоторые другие элементы, которые обеспечивают жидкому смазочному материалу требуемые антифрикционные, противоизносные, а также другие служебные свойства. В настоящее время в моторных маслах содержится 5–7% присадок, только повышающих смазочную способность этих масел. Существующая тенденция к ужесточению режимов работы пар трения скольжения 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 было 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 заметное антифрикционное и противоизносное действие. Однако, в настоящее время имеется ряд причин, препятствующих широкому распространению масел с микро-/нанодобавками на основе приведённых выше микро-/наночастиц. Одним из этих препятствий является отсутствие методологии подбора таких композиций, так что создание смазочных композиций на основе масел с микро-/нанодобавками проводится чисто эмпирически. С учетом вышеуказанного, на сегодня актуальной задачей является разработка элементов методологии подбора оптимальных составов масел с микро-/нанодобавками, включая 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 заметное 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.

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 преобразование 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 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 диссертационной работы 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 алгоритмов и программ, 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 диссертационной работы. Положения и результаты исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях:

- «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (г. Москва, 2021 г.);
- International Conference «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.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка цитируемой литературы (121 наименование), содержит 113 страниц машинописного текста.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ МИКРО- /НАНОДОБАВКАМИ

В главе рассматриваются основные виды моторных масел и добавок к смазочным маслам, анализ работы пар трения скольжения с использованием смазочных материалов и развитие тепловой задачи трения.

1.1. Основные типы моторных масел

В настоящее время одним из ключевых направлений обеспечения ресурсосбережения в машиностроении является обеспечение долговечности подвижных сопряжений машин и механизмов и минимизации энергетических потерь при их эксплуатации. Одним из решений этой проблемы является использование в качестве компонентов этих сопряжений смазочных материалов [1, 2].

Способность смазочного материала связано с:

- характеристиками пар трения;
- температурой, постоянной нагрузкой, скоростью и т.д.;
- режимом работы.

Большинство современных пар трения скольжения смазывают жидкими смазочными материалами – маслами. Смазочные масла по происхождению делятся на:

1) Минеральные. Это продукт переработки сырой нефти с минимальным количеством добавок и низкой стоимостью. Недостатком минерального масла является то, что он плохо переносит высокие нагрузки, поэтому его нужно менять каждые 5000 километров пробега.

2) Синтетические. Они состоят из химически синтезированного материала и обладает наибольшей текучестью, обеспечивает надежную защиту двигателя от износа, помогает экономить топливо и снижает уровень воздействия выхлопных газов на окружающую среду.

3) Полусинтетические. Это смесь минерального и синтетического масла и добавок. Масло является более чувствительным к температурному режиму в

сравнении, например, с синтетическими маслами, поэтому «полусинтетика» густеет при температуре ниже -10°C и разрушается и окисляется под воздействием высоких температур.

1.2. Типы добавок к смазочным материалам

Смазочные масла состоят из масла и присадок, которые представляют собой химически активные продукты, содержащие серу, фосфор, хлор и некоторые другие элементы, которые обеспечивают жидкому смазочному материалу требуемые антифрикционные, противоизносные, а также другие служебные свойства.

В маслах содержится 5–7% присадок, только повышающих смазочную способность этих масел[3–8].

Свойство добавок:

- устойчивость характеристик масел;
- снижение износа в узлах трения;
- уменьшение шума работы механизма;
- снижение расхода топлива;
- отсутствие испарения при хранении;
- отсутствие оседания на поверхности;
- рост ресурса смазочного материала;
- образование защитных пленок на трущихся металлических поверхностях различных по химическому составу.

Основные типы добавок:

- детергенты;
- дисперсанты;
- ингибиторы окисления;
- ингибиторы коррозии;
- вязкостно - загущающие;
- депрессорные;
- ингибиторы пенообразования;
- противоизносные;

– антифрикционные.

Детергенты – это соединения, содержащие соли металлов. К ним относятся: сульфонаты, салицилаты и фенаты.

Структура соединений: ионы металлов в структуре этих соединений обычно представлены кальцием, натрием или магнием (например, сульфонат кальция), но не исключена возможность использования солей других металлов. Однако, предпочитают кальций, т.к. является самым дешевым. Именно соотношение цена — эксплуатационный уровень обуславливает разнообразие доступных продуктов и определяет окончательный выбор для конкретной области применения.

Свойства детергентов:

– химически соединяются с твердыми продуктами сгорания, предотвращая их скопление на частях двигателя в виде отложений;

– детергенты нейтрализуют сильные кислоты, образующиеся при сгорании и окислении, переводя их в пассивные нейтральные соли. Мера способности детергента нейтрализовывать кислоту — это его щелочное число. Чем выше щелочное число, тем больше кислоты он может нейтрализовать. Детергенты, доступные на рынке, имеют диапазон щелочных чисел от 0 до 500.

Дисперсанты – это беззольные соединения, не содержащие металлы.

Структура соединений: и-замещенные алкенилсукцинимиды с длинной цепью; высокомолекулярные эфиры янтарной кислоты; основания Манниха на основе высокомолекулярных алкилфенолов.

Свойства дисперсантов:

– химически соединяются с твердыми продуктами сгорания, предотвращая их скопление на частях двигателя в виде отложений при низких температурах;

– предотвращают образование шлама.

Ингибиторы окисления. К ним относятся: дитиофосфаты цинка, сульфиды фенатов, ароматические амины, сульфированные эфиры и замещенные (пространственно-затрудненные) алкилфенолы.

Свойства ингибиторов окисления:

- предотвращают химическую реакцию масла с кислородом воздуха в условиях высоких температур и перемешивания;
- связывают свободные радикалы, либо взаимодействуют с пероксидами, замедляя процесс роста вязкости масла вследствие его окисления;
- защищают металлические поверхности от кислотной коррозии, образуя защитную пленку на поверхности смазываемых частей;
- при окислении масла и недостаточно эффективном ингибировании могут образовываться кислоты, приводящие к сильной коррозии узлов трения.

Разрушение металлических поверхностей происходит вследствие взаимодействия металла с атмосферным кислородом и кислотными продуктами. Присутствие воды и полярных примесей значительно увеличивает скорость протекания этих разрушительных процессов. Внутренняя коррозия может привести к заеданию гидравлических толкателей и клапанов, регулирующих давление масла, а также к другим неисправностям, которые могут привести к поломке двигателя, трансмиссии и даже приводных шестерен, и подшипников.

Ингибиторы коррозии. К ним относятся: щелочные детергенты, алкенилэтантарные кислоты и алкилированные фенокси-алкиленоксиды.

Свойства ингибиторов коррозии:

- ставят барьер между металлической поверхностью и активными химическими веществами, либо нейтрализуя кислоты, либо образуя защитную пленку. При химической реакции частицы защитной пленки прилипают к металлической поверхности.

Вязкостно – загущающие добавки. Концентрация добавок 1 – 20 %. К ним относятся: полимеры различной массы и строения.

Свойства вязкостно – загущающих добавок:

- повышают индекс вязкости смазочной композиции;
- расширяют температурный диапазон эксплуатации смазки.

Депрессорные добавки. К ним относятся: полиметакрилаты, сложные полиэфиры на основе стирола, алкилфенолы с поперечными связями и алкилированные нафталины.

Свойства депрессорных добавок:

- препятствуют образованию крупных кристаллов парафина в маслах при низкой температуре;
- адсорбируются на поверхности его кристаллов, уменьшая количество связанного с ними масла;
- обеспечивая текучесть масла.

При эксплуатации смазочные масла интенсивно перемешиваются и в них попадает воздух и образуется пена. Избыточное пенообразование снижает эффективность смазки из-за разрушения гидродинамической пленки между трущимися частями и вызывает окисление масла.

Ингибиторы пенообразования. К ним относятся: силиконы и полиакрилаты.

Свойства ингибиторов пенообразования:

- препятствуют пенообразованию путем уменьшения поверхностного натяжения смазки, т.е. стремления соседних молекул на поверхности присоединиться друг к другу и образовать пленку.

Противоизносные добавки. К ним относятся: амиды, животные и растительные жиры, жирные кислоты и др. Концентрация добавок варьируется от 0,1 до 3%.

Свойства противоизносных добавок:

- снижают износ трущихся поверхностей трения при относительно умеренных нагрузках и температурах;
- формирует на поверхностях деталей тонкую пленку.

Противозадирные добавки. К ним относятся: серосодержащие, фосфорсодержащие и хлорсодержащие соединения. Содержание добавки составляет 3 – 5 %.

Свойства противозадирных добавок:

- при повышенных температурах и нагрузках эти соединения образуют пленку сульфида железа на поверхностях трения;
- препятствуют износу и задиру.

Антифрикционные добавки – молибденит, фторопласт, графит, парафин, силикон и т.д. Содержание добавок находится в диапазоне от 0,1 до 0,5 %.

Свойства антифрикционных добавок:

- уменьшают коэффициент трения в нагруженных узлах;
- снижают износ поверхности.

С учетом структуры и свойств, оказывающие влияние на двигатель, различают следующие добавки:

- реметаллизант;
- полимеросодержащие антифрикционные препараты;
- геомодификаторы;
- кондиционеры металлов;
- слоистые добавки;
- нанодобавки.

Реметаллизанты – это препараты, реализующие эффект избирательного переноса при трении (открывшие российские ученые Д.Н. Гаркунов и И.В. Крагельский). При их применении образуются тончайшие металлические слои, которые частично восстанавливают микродефекты, снижают коэффициент трения и повышают износостойкость поверхностей. Недостатком реметаллизантов является возможность потери подвижности поршневых колец и увеличение окислительных свойств масла.

Полимеросодержащие антифрикционные препараты обладают высокой пластичностью, химической и термической стойкостью, высокими антифрикционными свойствами, т.к. в их составе содержится политетрафторэтилен или тефлон, эпилам, поверхностно – активный фторопласт – 4, силикон, перфторполиэфир карбоновой кислоты и некоторые другие полимерные вещества. Преимущества данных препаратов: снижают износ, вибрацию и расход масла. Недостатком применения тефлоновых препаратов является закоксование поршневых колец и, как следствие, перегрев поршней и выход силового агрегата из строя.

Геомодификаторы, ремонтно – восстановительных составов – это добавки на основе минералов естественного и искусственного происхождения, такие как серпентинит и шунгит. Шунгит упрочняет металлическую поверхность. Размер геомодификаторов составляет 1 – 10 мкм. Серпентинит открыт в СССР при бурении

сверхглубоких скважин на Кольском полуострове. При применении геомодификатора происходит микрошлифовка поверхностей цилиндров, растет компрессия и падает скорость износа.

Кондиционеры металлов (хлоросодержащие вещества) уменьшают силу трения, при высоких температурах и скоростях снижают износ деталей, увеличивают ресурс механизма в 3 – 4 раза. Из этого следует, что кондиционеры улучшают свойства сопряжённых поверхностей.

Слоистые добавки – это препараты с низким усилием сдвига между слоями, к ним относятся дисульфид молибдена, вольфрама, тантала, ниобия, диселиниты молибдена, титана и другие. При работе слоистые добавки заполняют микронеровности и снижая износ поверхностей трения.

К **нанодобавкам** относятся ферромагнитные наночастицы, наноалмазы, фуллерены и углеродные нанотрубки. В работе [9] установили, что введение ферромагнитных добавок в пластическую смазку приводит к росту противозадирных и противоизносных свойств смазочной композиции. Рост концентрации ферромагнитных добавок снизил износ на 4 %.

Нанодобавки с улучшенными эксплуатационными свойствами, высокопрочные и при этом легкие, устойчивы к износу и давлению. В паре трения наноразмерные частицы заполняют микронеровности металлической поверхности, вследствие чего снижается шероховатость поверхности и коэффициент трения, увеличивается ресурс работы механизма.

Неисследованными опасностями нанодобавок является то, что они могут проникать через кожу человека и накапливаться во внутренних органах.

Влияние нанодобавок на изношенные поверхности в настоящее время выяснено недостаточно. Дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования наноразмерных частиц приведет к применению различных видов смазочных композиций.

1.2.1 Микро-/нанодобавки

Улучшение свойств смазочного материала необходимо для применения современных машин и механизмов. Использование микро-/нанодобавок, в которых в качестве твёрдой фазы использовали микро-/наночастицы графита, дисульфида молибдена, серпентинита, шунгита, дисульфида вольфрама, фуллереновых структур, углеродных нанотрубок и т.д., позволило значительно увеличить антифрикционное и противоизносное действие смазочного материала.

В части повышения трибологических свойств масел путём введения в них добавок в виде мелкодисперсных частиц графита, дисульфида молибдена, диселидина вольфрама, 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. Яхьяева, 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.

Геомодификаторы обеспечивают ремонтно – восстановительный эффект и повышение противоизносных и антифрикционных свойств смазочных материалов. В работе Дж. Митчелла показано, что введение 0,4 масс. % дисульфида молибдена в смазочный материал снижает износ и коэффициент трения примерно в 2,5 раза.

В работе [10] установлено, что смазочные композиции с серпентинитом повышают ресурс подшипниковых колесных пар и редукторов трамвайных тележек в 2 раза. В дальнейших исследованиях предприняты много попыток применения серпентинита для обработки разных машин и механизмов [11].

ООО НПФ «Проблемы трения и износа», ЗАО «Технопарк» и НИИ РТК НПЦ «Трибо» рекламируют смазочный материал на основе серпентинита, который формирует защитные металлокерамические пленки на поверхностях трения.

В работе [12] установлено, что в начале испытаний модификатор трения увеличивает коэффициент трения и температуру, затем повышает антифрикционные и температурные свойства смазочного материала в 2 раза.

В работах [13 – 16] при введении геомодификатора трения в смазочный материал шероховатость снижается от 6% до 50%.

В ряде работ [17 – 19] смазочная композиция с присадкой «Форсан» показала положительные результаты на машинах трения: коэффициент трения, износ и температура в зоне трения снизились на 10%. Авторы работ [20–22] получили толщину металлокерамических пленок в диапазоне от 0,3 до 5 мкм.

При введении серпентин содержащей добавки «Форсан» коэффициент трения снижается в 2,5 раза. Антифрикционные свойства смазки «Политерм» повышаются при введении композиции АРВК на основе серпентинита.

В некоторых работах [23, 24] при введении геомодификатора трения защитная керамическая пленка не обнаружена на поверхности деталей. При стендовых испытаниях [25] введение геомодификатора трения в смазочный материал снижает расхода топлива на 2 – 9 %.

В работе [26] существенно улучшились параметры работы двигателя—увеличились номинальная мощность на 5%, максимальный крутящий момент на 12%, снизился расход топлива в пределах от 2 до 10%.

В работе [27] введение смеси мелкодисперсного слоистого силиката магния с присадкой ЭФ-357 в пластичные смазки повысили антифрикционные и противоизносные свойства примерно на 8%.

Основным свойством геомодификатора является постепенное наращивание на поверхности трения противоизносное ремонтно – восстановительное покрытие, продлевающее ресурс работы узлов трения в 3 раза [5, 10 – 13].

В работе [25] показано, что геомодификатор увеличивает пробег отечественных легковых автомобилей до капитального ремонта двигателя внутреннего сгорания до 550–870 тыс. км.

Отметим, что в работе [28] установлено, что применение 0,01 масс % наночастиц улучшает антифрикционные и противоизносные свойства смазочного материала на 12%.

Открытие наночастиц, таких как фуллеренов и углеродных нанотрубок, позволили найти свое применение в качестве добавок к смазочным материалам, однако их применение ограничивается высокой стоимостью.

В работах [29 – 30] было показано, что введение высокодисперсного аморфного углерода в трансмиссионное масло снижает коэффициент трения на 6%.

Фуллерен (C_n) – это четвертая аллотропная форма углерода с числом атомов от 32 (рис. 1.1). К основным свойствам фуллеренов относят их стабильность, нерастворимость в воде, полупроводниковые свойства, фотопроводимость. Фуллерен назван в честь Ричарда Бакминстера Фуллера, создавшего купол, состоявший из пентагонов и гексагонов.

Дэвид Джонс образовал искривленную поверхность пятиугольника, внедряя объекты в гексагональную решетку графита. В начале 70 – х годов японский физик Э. Осава исследовал возможность существования молекулы, но результаты были опубликованы только в японском журнале Kagaku. Впервые фуллерен наблюдали В. Кречмер и Д. Хафман в институте ядерной физики Общества им. Макса Планка [31]. Д.А. Бочвар и Е.Г. Гальперин доказали устойчивость фуллерена. Нобелевскую премию за открытие фуллеренов получили Г. Крото, Р. Смолли и Р. Кёрл.

Хотя фуллерены имеют короткую историю, это направление науки быстро развивается, привлекая к себе все новых исследователей. Необходимость анализа возможностей применения фуллеренов была ясна уже давно, однако, только в настоящее время результаты интенсивных исследований физико–химических свойств этих удивительных кластеров позволяют говорить о возможности перехода от гипотез к научно — обоснованным поискам промышленного применения.

Фуллерены имеют большую область применения, в том числе и для решения триботехнических задач [32].

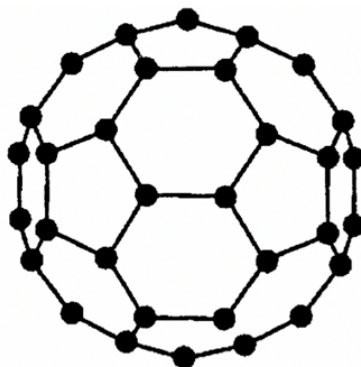


Рисунок – 1.1. Фуллерен C_{60}

Применение фуллеренов сдерживается их высокой стоимостью (от 12000 до 20000 р. за 250 гр.), которая складывается из трудоемкости получения фуллереновой смазочной композиции. В ряде работ [33 – 36] показано, что введение фуллеренов к минеральному маслу снижает коэффициент трения и температуры в среднем на 10%.

В работах [32 – 34] было показано, что наличие небольших концентраций фуллерена C_{60} (до 5%) в смазочном масле приводит к существенному улучшению различных трибологических свойств, в частности противоизносных свойств (в 2 раза) стали и меди в парах трения скольжения сталь–сталь и сталь–медь. Дисперсность фуллеренов C_{60} составляла 1 нм.

Температурой испарителя контролируют скорость атомов и молекул, которая находит концентрацию фуллеренов в смазочном слое. Данная температура находится по графикам скорости испарения от температуры.

Введение фуллеренов и графитовой сажи приводит к образованию защитных пленок на поверхности и росту антифрикционных свойств масла [36].

Метод электрохимического осаждения применяется для получения толстых металлических пленок с менее 1 масс. % фуллеренов. Для равномерного перемешивания использовался ультразвуковой вибратор. Анализ работ, посвящённых применению фуллеренов, как добавок к смазочным материалам, позволил сделать вывод, что фуллерены хорошо растворяются в моторных маслах [37, 38].

В работах [39, 40] получали полимер – фуллереновые материалы путем охлаждения, распыления и сушки смеси фуллерита и полимера.

В работе [41] установлено, образцы C_{60} в атмосфере N_2 в диапазоне температур 240...470 К показали аномальную зависимость микротвердости от температуры (рис. 1.2).

На рис. 1.2 наблюдался резкий рост микротвердости при температуре 260 К и аномальное снижение при температуре 370 К. Аномальное поведение температурной зависимости микротвердости характерно для температур от 300К.

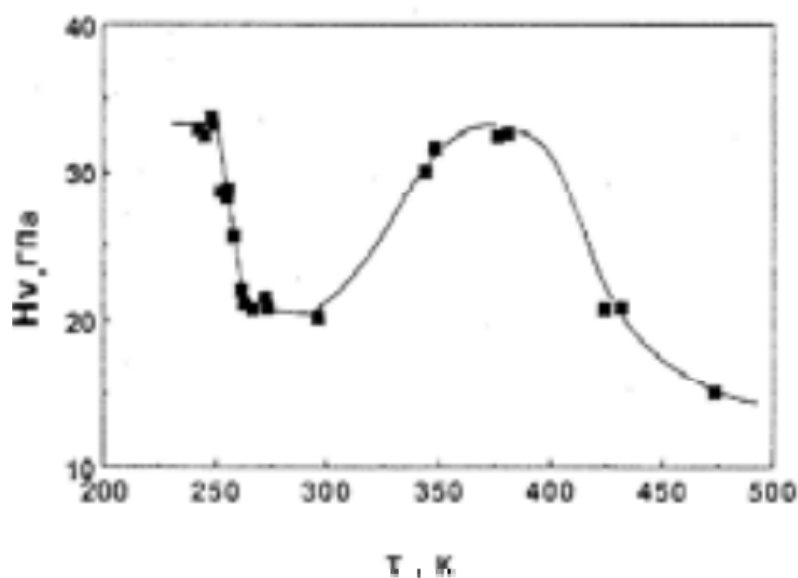


Рисунок – 1.2. Температурная зависимость микротвердости по Викерсу грани {111} C_{60} [41]

Механизм действия фуллеренов при трении до конца не изучен, но известно, что фуллерен имеет высокую симметрию и стабильность. Существует предположение, что положительное влияние фуллеренов в качестве добавок к смазочным маслам связано с шарообразной формой его молекул, способствующей реализации поворотной модификации в трибоконтакте, а также с его высокой активностью, что облегчает как создание защитного антифрикционного слоя на поверхности трения, так и проникновение молекул фуллерена в поверхностные слои трущихся материалов, что облегчает процессы структурной самоорганизации при трении [42].

В работе [43] исследовали влияние фуллерена и графитового порошка в паре трения титановая игла — поверхность стекла на антифрикционные свойства толуола. Отметим, что фуллерены снизили коэффициент трения в 2 раза, в отличие от графитового порошка (рис. 1.3). Авторы объясняют это тем, что фуллерены имеют высокую упругость и прочность, низкую поверхностную энергию, слабые межмолекулярные взаимодействия и квазисферическую форму.

Авторы [44 – 52] исследовали фуллерен C_{60} в качестве твердосмазочного покрытия, а также в виде присадок к промышленным маслам, и наблюдали рост антифрикционных свойств на 5%. При введении фуллеренсодержащей сажи в промышленное масло коэффициент трения снизился до 0,02 [53].

Результаты исследований показали перспективность применения фуллерена C_{60} и политетрафторэтилена для решения различных трибологических задач, за счет того, что политетрафторэтилен обладает низким коэффициентом трения (0,1...0,2).

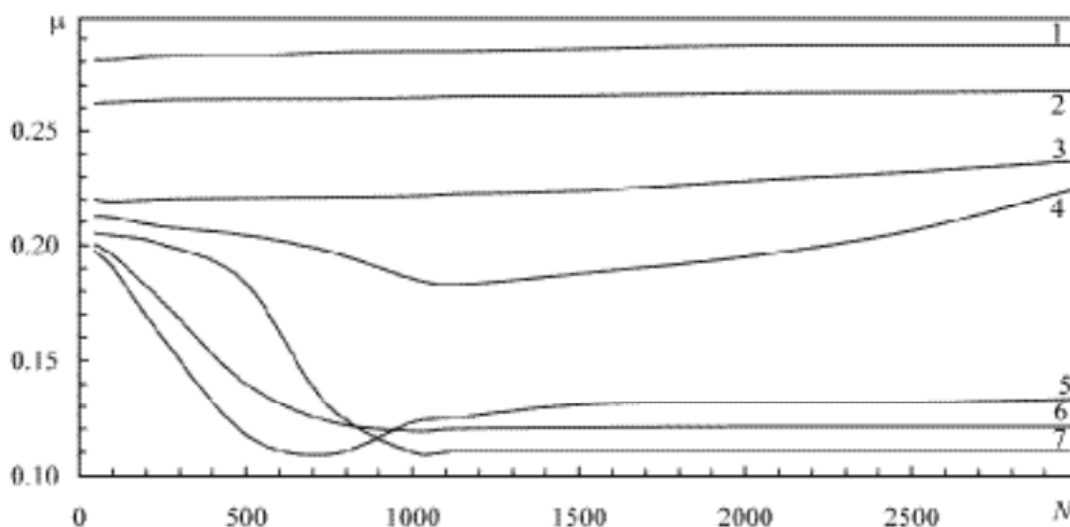


Рисунок – 1.3. Зависимость коэффициента трения пары «титан—стекло» с различными граничными смазками от количества циклов трения: 1 — графитовый порошок в толуоле; 2 — графитовый порошок; 3 — без смазки; 4 — толуол; 5 — 0,72 мг/мл фуллеренов в толуоле; 6 — 1,08 мг/мл фуллеренов в толуоле; 7 — 2,15 мг/мл фуллеренов в толуоле.

В патентах Японии N 05 - 117174 МКИ С 07 С 13/62 и N 05 - 179269, МКИ С Ю М 109/02 предложили смазочную композицию, состоящую из минерального масла и фторированного фуллерена), которая повысила антифрикционные и противоизносные свойства в 1,7 раз.

В патенте США N 529244, МКИ С 10 М 133/00 путем введения смеси фуллерена с аминоксодержащим полимером в смазочное масло снизили коэффициент трения на 4%.

В патенте 2146277 установлено, что смазочная композиция, состоящая из минерального масла и фуллереновой сажи снижает коэффициент трения в среднем на 3% и объемный износ в среднем на 30 %. Концентрация фуллереновой сажи в масле изменялась в пределах от 1 до 5 масс. %.

Для реализации всех перечисленных вариантов требуется проводить экстрагирование фуллерена из сажи, химическую обработку для получения различных соединений и вводить их в смазочное масло через промежуточные растворы. Это приводит к достаточно высокой стоимости полученных материалов и существенно затрудняет использование их в смазочном веществе.

В работе [54] приведены результаты испытаний роликов из капролонов с добавками фуллеренов, в качестве контртела использовали ролик из стали 40Х. Испытания проводились при трении без смазки и при смазывании водой. В результате испытаний было выявлено, что добавка фуллеренов в капролон не оказывает существенного влияния на коэффициент трения и износостойкость модифицированных капролонов при трении без смазки, при смазывании водой добавки фуллеренов в капролоны оказывают слабое влияние на коэффициенты трения износостойкость и несущую способность.

Применение фуллереновой сажи вместо фуллеренов исключает технологические процессы экстракции и химической модификации и существенно снижает стоимость присадки, так как стоимость фуллереновой сажи составляет примерно 100 руб. за 1 гр. Упрощается также технология введения её в смазочное масло.

Авторы научного исследования [55] показали, что введение фуллероидных наномодификаторов в индустриальное масло И – 20 снижает коэффициент трения на 10% и повышает износостойкость на 17%.

В Японии [56] было выполнено исследование влияния фуллеренов на трибологические свойства смазочного материала. Авторы исследования, предложили фуллерены в основе разработки «суперсмазки», обеспечивающий коэффициент трения рабочих поверхностей ниже 0,001.

Фуллерены растворяются в жидкостях, для которых отношение удельной энтальпии испарения к удельному объему молекулы растворителя равен $100 \text{ кал} \cdot \text{см}^3$ [57].

В последние годы множество экспериментальных работ подтвердили рост смазочных характеристик масел в результате добавления в него небольшой концентрации фуллеренов.

В работе [58] установили, что введение фуллеренов в смазочное масло снижает коэффициент трения и износ металлов в условиях граничной смазки в среднем на 10 %.

Из работы [59] следует, что фуллерены и фуллереновая сажа являются антифрикционными, противоизносными и антизадирными добавками.

Результаты работ [60 – 61] показали, что смазочная композиция на основе моторного масла улучшила трибологические характеристики узлов трения ЦПГ и кривошипно-шатунного механизма СМД в 2 раза.

Установлено, что фуллереновая присадка повышает антифрикционные свойства смазочного масла на 12% [58].

Исследование трибологических свойств композиционного наноуглеродного материала [62] показало, что его применение в качестве присадок к маслам для узлов качения и скольжения приводит к уменьшению коэффициента трения в 2 раза, износа в 2,5 раза и шероховатости в 1,7 раз.

Углеродные нанотрубки представляют собой протяженные цилиндрические полые структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров, длиной десятки микрон, а в некоторых случаях до сантиметра, которые образованы одним или несколькими свернутыми в бесшовную трубку графеновыми листами. Нанотрубки характеризуются большой удельной поверхностью, стабильностью, прочностью, теплопроводностью, электронными и эмиссионными свойствами.

Углеродные нанотрубки имеет уникальные физикохимические свойства, по сравнению с графитом и фуллеренами [2827].

Известно [63], что введение углеродных нанотрубок и холестерических жидких кристаллов повысили антифрикционные свойства индустриального масла в 2,7 раз. В работе [64] сделан вывод, что нанотрубки улучшили кальциевые и литиевые смазочные материалы в 2 раза.

Малые концентрации углеродных нанотрубок в Солидол–С и Литол–24 увеличили трибологические свойства и ресурс элементов трибосопряжений [65].

В патенте RU 2378326 С1 предлагают ввести в смазочный материал углеродную добавку в количестве 1 – 2,5 %. Углеродная добавка включает в себя фуллерены,

углеродные нанотрубки, нанососуды, нанодисперсный углерод. Полученные экспериментальные данные показали, что введение данной добавки снизило коэффициент трения на 14 % по сравнению с базовым маслом.

В работе [66] представлены результаты влияния углеродных нанотрубок на триботехнические свойства смазочного материала растительного происхождения и сделан вывод о улучшенных этих свойствах за счет роста теплопроводности смазочного материала.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы. Добавки группы геомодификаторов в настоящее время широко распространены на современном товарном рынке из-за своей доступности, снижают коэффициент трения в обычных условиях до 0,03 – 0,04. Влияние геомодификаторов на смазочное масло полностью не исследовано [26].

Установлено положительное влияние добавки фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок на противоизносные и антифрикционные свойства узлов трения.

Однако, геомодификаторы, фуллерены C_{60} и углеродные нанотрубки не получили широкого распространения из – за отсутствия методологии подбора таких композиций.

1.3 Анализ работы пар трения скольжения с использованием смазочных материалов

Пара трения скольжения состоит из твердых деталей и жидкости, разделяющей зону контакта [67—70]. В зоне контакта пар трения скольжения различают сухое, граничное, полужидкостное и гидродинамическое (жидкостное) трение.

В режиме гидродинамического трения поверхности не соприкасаются, при граничном трении работа осуществляется на тонкой пленке масла.

На рис. 1.4 изображена кривая Герси–Штрибека выражающая зависимость коэффициента трения от характеристики режима смазочного материала (вязкости, скорости и нагрузки).

К парам трения скольжения относятся направляющие станков, подшипники скольжения, система зеркало цилиндра-поршневые кольца и т. д. Для реализации

гидродинамического трения, зону трения пары трения скольжения смазывают маслами.

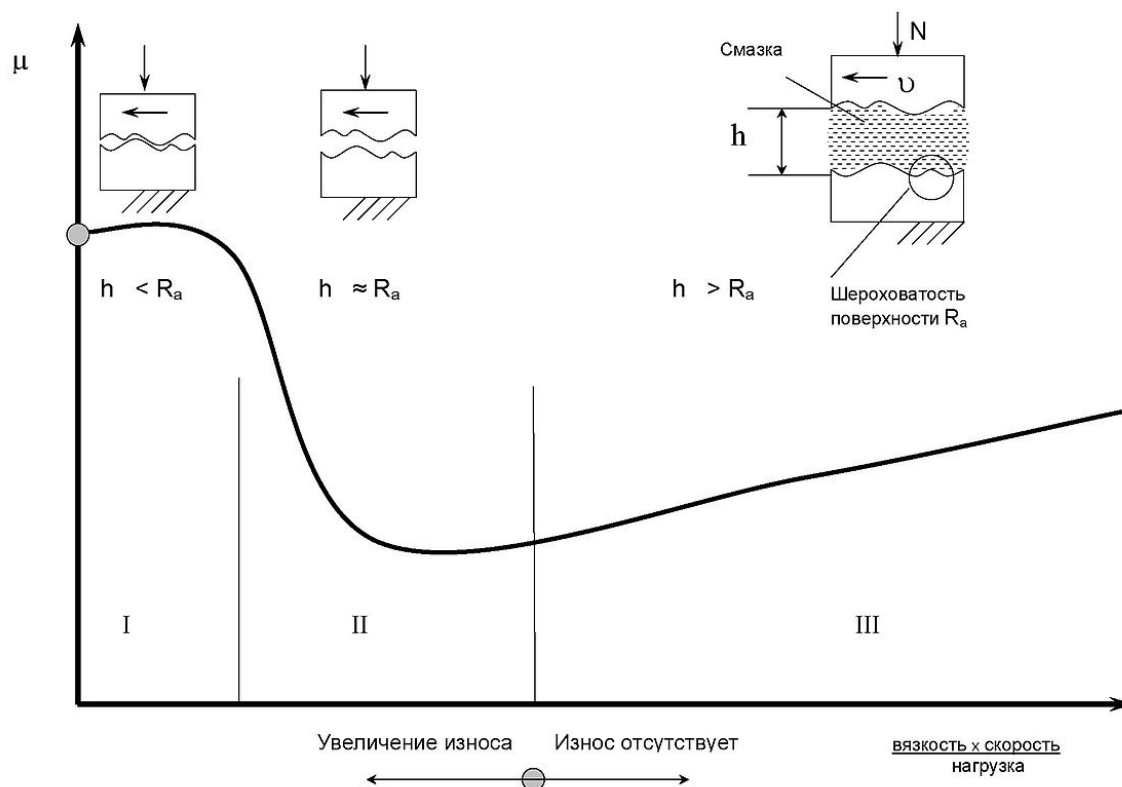


Рисунок – 1.4. Зависимость Герси - Штрибека: I — граничное трение; II — полужидкостное трение; III — гидродинамическое трение.

Важным условием успешной работы пар трения скольжения является обеспечение режима гидродинамической смазки, теоретическое обоснование и объяснение которой продолжается до настоящего времени.

Современные пары трения скольжения часто работают в условиях, когда толщина слоя смазки, разделяющей трущиеся поверхности, соизмерима с высотой микронеровностей на этих поверхностях.

Анализ литературы показал, что моделирование чаще всего применяется для изучения процессов в самих парах трения. При этом применяются различные методы: подобия, численные методы и имитационное моделирование.

Пары трения скольжения обычно являются составной частью машин и в значительной мере определяют их долговечность. Правильная оценка условий работы этих пар и других частей машины невозможна без учета их взаимного влияния

[71]. Моделирование таких объектов на ЭВМ – важное направление в машиностроении. Одной из актуальных проблем машиностроения является прогнозирование поведения узлов трения [72].

Основы гидродинамической теории смазки были заложены трудами Н.П. Петрова, в которых он впервые [73] доказал возможность применения уравнения Навье-Стокса к задаче о движении смазочного материала в подшипнике и дал ее решение для соосных шипа и подшипника бесконечной длины. Допуская возможность скольжения вязкой жидкости по твердым стенкам, Н.П. Петров [73, 74] наряду с внутренним трением рассматривал и внешнее трение жидкости о стенки, получив зависимости для сил трения на поверхности шипа и момента сил трения относительно оси шипа.

Большой вклад в развитие гидродинамической теории смазки внесли И. В. Крагельский, А. Зоммерфельд, О. Рейнольдс, Н.Е. Жуковский и т.д. [75–79].

Дальнейшее развитие гидродинамической теории смазки связано с именами М.В. Коровчинского, К.С. Ахвердиева, А.Г. Бургвица, М.А. Галахова, Д.С. Коднира, И.В. Сайчука, И.Я. Токаря, П.П. Усова, С.А. Чернавского, Д.Н. Гаркунова, Н.А. Нагайцевой, О.И. Рабецкой и др.

При оценке работоспособности пар трения скольжения в процессе проектирования все более широкое распространение получают способы расчета на ЭВМ, основанные на использовании гидродинамической теории смазки [80–91]. Одним из допущений, принятых в данных методах, является постоянство температуры и степени смазки в зазоре при движении поверхностей.

Расчет пар трения должен привести к определению величины смазочного слоя, разделяющего две рабочие поверхности в тяжелых условиях эксплуатации. Минимальная толщина несущего слоя смазки должна быть достаточной, чтобы обеспечить отсутствие контакта рабочих поверхностей при перегрузках, а также, чтобы исключить возможность застревания в зазоре между рабочими поверхностями загрязнений смазки, имеющих размеры, максимально допустимые для рассчитываемой машины. Как видим, в последние годы появилось достаточно много

статей по проблемам, касающимся причин, выводящих узлы трения из строя. Существует много идей, которые требуют более детального рассмотрения и анализа.

При расчетах пар трения скольжения, работающих в условиях гидродинамической смазки, используются безразмерные характеристики смазочного слоя, полученные из решения уравнений течения смазки — уравнения Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu(u_1 + u_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12\mu v_2 \quad (1.1)$$

где x, z — координаты; h — толщина смазочного слоя; p — давление; μ — коэффициент вязкости смазочной жидкости; u_1 — скорость точек контура первой поверхности, направленной по касательной; u_2 и v_2 — скорости точек второй поверхности, направленных соответственно по касательной и нормали.

В работах [92, 93] показано, что исследование режима трения с эффектом граничного скольжения является важной частью при расчете пар трения.

Из анализа вышеизложенных работ сделан вывод, что отсутствует возможность использования расчетов пар трения для управления трибологическими характеристиками смазочных материалов.

1.4 Развитие тепловой задачи трения

Важным параметром, оказывающее влияние на характеристики подвижных трибосопряжений, является температура смазочного слоя. Принято считать, что прочность деталей в подвижных поверхностях связана с повышением температуры в контакте при трении [94 – 96].

Х. Блоком предложены аналитические выражения для определения мгновенных температур, ответственных за начальный момент заедания [97].

Образуемое в контакте тепло трения, поглощаемое контактирующими телами, определяется геометрокинематическими параметрами, характеризующие продолжительность контактирования.

Х. Блок и Дж. Егер получили коэффициент распределения тепловых потоков α , достигаемый на контакте при действии неподвижного кругового и неподвижного квадратного источников, который находится по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (1.2)$$

а при действии подвижного кругового и подвижного квадратного источников, находим по следующим формулам:

$$\alpha = \frac{A(\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{(\pi/2)Pe_2}}{A\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)\sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)Pe_2+1}}, \quad (1.3)$$

$$\alpha = \frac{1.78(\lambda_2/\lambda_1)\sqrt{(\pi/2)Pe_2}}{1.78\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)\sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)Pe_2+1}}, \quad (1.4)$$

соответственно, где $\lambda_{1,2}$ – теплопроводность материалов сопряженных тел 1 и 2 соответственно, A – коэффициент.

Согласно А.В. Чичинадзе, α при действии подвижного, квадратного источника находится по формуле:

$$\alpha = \frac{\sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}}{\sqrt{L_r \lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}}, \quad (1.5)$$

где $\rho_{1,2}, c_{1,2}$ – плотность и теплоемкость материалов сопряженных тел 1 и 2 соответственно, d_r – средний диаметр пятна, L_r – путь трения.

Ф. Шаррон предложил выражения для определения коэффициента разделения тепловых потоков в контакте двух тел:

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1}}{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2}}, \quad (1.6)$$

$$\alpha_2 = \frac{\sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2}}{\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2}}. \quad (1.7)$$

Х. Блок ввел в эти формулы скорости перемещения контактных точек $v_{1,2}$ по каждому из двух сопряженных эвольвентных профилей 1 и 2 [98,99]:

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{v_1 \lambda_1 \rho_1 c_1}}{\sqrt{v_1 \lambda_1 \rho_1 c_1} + \sqrt{v_2 \lambda_2 \rho_2 c_2}}, \quad (1.8)$$

$$\alpha_2 = \frac{\sqrt{v_2 \lambda_2 \rho_2 c_2}}{\sqrt{v_1 \lambda_1 \rho_1 c_1} + \sqrt{v_2 \lambda_2 \rho_2 c_2}}. \quad (1.9)$$

Эффективная глубина передачи теплоты $h_{эф}$ за время трения t_T , предложенная А.В. Чичинадзе [100] определяется как:

$$h_{эф} = 1,73\sqrt{at_T}, \quad (1.10)$$

где a – температуропроводность тела.

Максимальная температура θ_{max} в трибологическом контакте согласно А.В. Чичинадзе [101 – 103] равна:

$$\theta_{max} = \theta_0 + \theta_v + \theta^* + \theta_{всп}, \quad (1.11)$$

где θ_0 – исходная температура элемента пары трения, θ_v – объемная температура элемента, θ^* – средняя температура номинальной поверхности трения, $\theta_{всп}$ – температура вспышки.

Основной задачей теории теплопроводности является определение температурного поля ($\text{grad } \theta$):

$$\text{grad } \theta = \frac{nd\theta}{dn}, \quad (1.12)$$

где θ – температурная функция, n – нормаль.

Температурное поле в теле находится путем решения уравнения теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (1.13)$$

где a – температуропроводность; x, y, z – координаты.

Температурное поле в полупространстве при действии непрерывно действующего источника выглядит следующим образом:

$$\theta = \frac{q}{2\pi\lambda R} \text{erfc} \left(\frac{R}{\sqrt{4at}} \right), \quad (1.14)$$

где $\text{erfc} \left(\frac{R}{\sqrt{4at}} \right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{R}{\sqrt{4at}}} e^{-\zeta^2} d\zeta$ – дополнительная функция ошибок, x, y, z – координаты, R – расстояние от точки полупространства до начала координат, q – скорость распространения теплоты, t – время.

Средняя температура поверхности при распределенном тепловом источнике находится следующим образом:

$$\widetilde{\theta}_{\text{ср}} = \frac{1}{4\bar{b}} \int_{-\bar{b}}^{\bar{b}} \int_{-1}^1 \tilde{\theta}(z=0) dy dx. \quad (1.15)$$

Однако, из анализа вышеизложенных работ сделан вывод, что температура смазочного слоя не оценивается при переменной скорости сдвига.

1.5 Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной 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.

Выводы по главе 1:

1. Анализ состояния проблемы показал, что ресурс работы смазываемых узлов трения современных машин может быть повышен путём введения в смазочные масла микро-/нанодобавки: геомодификаторов трения и ряда модификаций углерода (фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок).
2. Отсутствуют методологии подбора смазочных композиций на основе масел с микро-/нанодобавками, а именно расчет толщины смазочного слоя, момента трения, температуры смазочного слоя, градиента температуры.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ, ТОЛЩИНЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ И МОМЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ И СМЕШАННОМ ТРЕНИИ

Теоретической основой расчета пар трения скольжения является гидродинамическая теория смазки, согласно которой изучается гидродинамика масляных пленок.

На качество смазочного материала при трении в первую очередь оказывает влияние градиента температуры в слое смазки. С температурой связана скорость трения и при достаточно высоких скоростях скольжения снижается ресурс работы смазочного слоя. Экспериментальное измерение температуры и градиента температуры в смазочном слое сложная и почти невыполнимая задача. Поэтому для определения средней температуры и градиента температуры по толщине смазочного слоя в данной работе разработаны математические модели.

2.1. Математическая модель для расчета средней температуры на основе энергетического баланса трения при переменной скорости сдвига в смазочном слое

Нагрев смазочного материала в парах трения скольжения сильно влияет на качество смазочного материала. Поэтому при эксплуатации оборудования необходимо контролировать температуру в зоне трибоконтакта.

Тепловой поток, генерируемый в смазочном слое Q находится по формуле:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (2.1)$$

где $Q_{1,2}$ – тепловой поток, генерируемый в подвижной и неподвижной поверхности соответственно.

С использованием закона сохранения энергии мощность трения со смазкой приравняем к удельной теплоте, генерируемой в смазочном слое за один оборот t :

$$\tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) t = \frac{Q}{A}, \quad (2.2)$$

$$\tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right) t = \frac{Q_1 + Q_2}{A}, \quad (2.3)$$

где τ – напряжения сдвига, v_0 – скорость сдвига, z – координата, H – высота смазочного слоя, A – площадь контакта.

Тепловой поток, генерируемый в подвижной и неподвижной поверхности, определяется по следующим формулам:

$$Q_1 = h_1 A \rho_1 c_1 \theta, \quad (2.4)$$

$$Q_2 = h_2 A \rho_2 c_2 \theta, \quad (2.5)$$

где θ – средняя температура смазочного слоя, $h_{1,2}$ – глубина распространения теплового импульса по поверхностям, $\rho_{1,2}$ – плотность поверхностей, $c_{1,2}$ – теплоемкость поверхностей.

Глубина распространения теплового импульса $h_{1,2}$ находится по формуле:

$$h_1 = 1,73 \sqrt{a_1 t}, \quad (2.6)$$

$$h_2 = 1,73 \sqrt{a_2 t}, \quad (2.7)$$

где $a_{1,2}$ – температуропроводность поверхностей.

Подставляя зависимости (2.4) – (2.7) в (2.3), получим математическую модель для расчета средней температуры на основе энергетического баланса пары трения при переменной скорости сдвига в смазочном слое [104]

$$\theta = \frac{\tau v_0 (1 - \frac{z}{H}) \sqrt{t}}{1,73 (\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2})} \quad (2.8)$$

2.2. Решение температурной задачи при переменной скорости сдвига в смазочном слое

Рассмотрим краевую задачу на основе одномерного уравнения теплопроводности с применением аналитического и численного методов решений.

Пусть температура в направлении Ox считается постоянной, при допущении, что теплофизические характеристики не зависят от температуры.

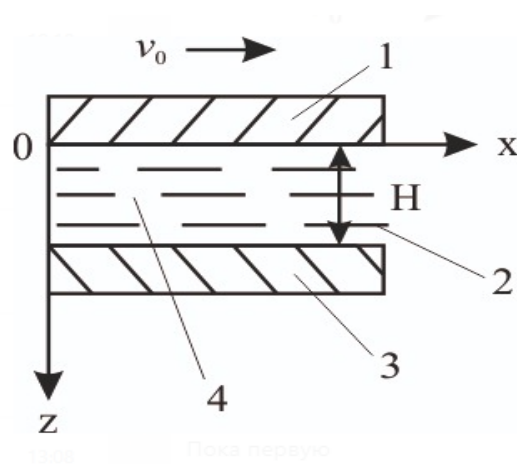


Рисунок – 2.1. Модель задачи: 1 – подвижная поверхность, 2 – зазор, 3 – неподвижная поверхность, 4 – смазочный материал

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье примет следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} (a = \text{const} > 0). \quad (2.9)$$

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} t = 0: \theta(z, 0) &= 0, 0 > z > H; \\ z = 0: -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \alpha \tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right), t > 0; \\ z = H: \theta(\infty, t) &= 20, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где α – коэффициент распределения теплоты между смазкой и вращающейся со скоростью v_0 поверхности.

Для того чтобы дать полное математическое описание рассматриваемой задачи, необходимо еще задать физические условия однозначности. Теплофизические свойства смазочного материала: $\lambda = 0,134 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}, \rho = 892 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c = 2000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$.

Аналитическое решение температурной задачи:

Аналитическое решение краевой задачи (2.9, 2.10) получено методом интегральных преобразований – преобразованием Лапласа.

Переходя к изображению, уравнение (2.9) и граничные условия (2.10) запишутся в виде:

$$\frac{d^2 \Theta}{dz^2} - \frac{p}{a} \Theta(z, p) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{d\Theta(0,p)}{dz} + \frac{\alpha\tau v_0}{\lambda p} \left(1 - \frac{z}{H}\right) = 0 \quad (2.12)$$

$$\Theta(\infty, p) = 20.$$

Общее решение уравнения (2.9) будет иметь следующий вид:

$$\Theta(z, p) = A e^{-\sqrt{\frac{p}{a}}z} + B e^{\sqrt{\frac{p}{a}}z}. \quad (2.13)$$

Из первого граничного условия получим:

$$A e^{-\sqrt{\frac{p}{a}}\infty} + B e^{\sqrt{\frac{p}{a}}\infty} = 0, \quad (2.14)$$

$$B = 0$$

Из второго граничного условия получим:

$$-A \sqrt{\frac{p}{a}} e^{-\sqrt{\frac{p}{a}} \cdot 0} = -\frac{\alpha\tau v_0}{\lambda p} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad (2.15)$$

$$A = \frac{\alpha\tau v_0 \sqrt{a}}{\lambda p \sqrt{p}} \left(1 - \frac{z}{H}\right)$$

После подстановки коэффициентов A и B в (2.13), решение краевой задачи получаем в виде:

$$\Theta(z, p) = \frac{\alpha\tau v_0 \sqrt{a}}{\lambda p \sqrt{p}} \left(1 - \frac{z}{H}\right) e^{-\sqrt{\frac{p}{a}}z}. \quad (2.16)$$

С помощью таблиц интегральных преобразований произведем обратный переход к оригиналу и получим решение краевой задачи:

$$\theta(z, t) = \frac{\alpha\tau v_0 \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{z}{H}\right) \left\{ \frac{2e^{-\frac{z^2}{4at}}}{\sqrt{\pi}} - \frac{z}{\sqrt{a}} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)\right) \right\}. \quad (2.17)$$

Краевая задача (2.9, 2.10) решена аналитически, а также, в качестве достоверности, получено решение численным методом.

Численное решение температурной задачи:

Для численного решения задачи разобьем смазку по толщине на $N - 1$ равных промежутков, т.е. построим конечно-разностную сетку (рис. 2.2):

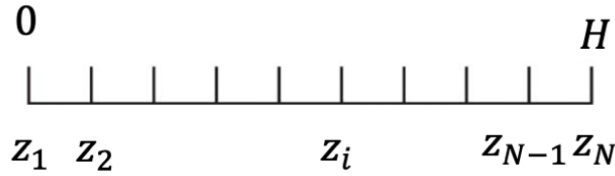


Рисунок – 2.2. Конечно–разностная сетка:

$z_2, z_3, \dots, z_{N-1}$ – координаты внутренних узлов; z_1, z_N – координаты граничных узлов

Определим значение температуры в i – ом узле в момент времени $t = t_n = n \cdot k$ как $\theta(z_i, t_n) = \theta_i^n$. Здесь k – шаг интегрирования по временной координате, n – номер шага по времени.

Далее заменим дифференциальные операторы в (2.9) на их конечно – разностные аналоги. Будем пользоваться неявной схемой:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{k},$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}.$$

В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\rho c \frac{\theta_i^{n+1} - \theta_i^n}{k} = \lambda \left(\frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2} \right), i = 2, \dots, N - 1, n \geq 0, \quad (2.18)$$

Полученную систему можно свести к наиболее общему виду:

$$A_i \theta_{i+1}^{n+1} - B_i \theta_i^{n+1} + C_i \theta_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (2.19)$$

где $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}$, $B_i = \frac{2\lambda}{h^2} + \frac{\rho c}{k}$, $F_i = -\frac{\rho c}{k} \theta_i^n$.

Уравнения (2.19) называются трехточными разностными уравнениями второго порядка. Система (2.19) имеет трехдиагональную структуру, поэтому рассматриваем нестационарную задачу. Такую систему необходимо решать на каждом шаге по времени.

Предположим, что существуют такие наборы чисел α_i и $\beta_i (i = \overline{1, N-1})$, при которых

$$\theta_i^{n+1} = \alpha_i \theta_i^{n+1} + \beta_i, \quad (2.20)$$

т.е. система уравнений (2.19) преобразуется в двухточечное уравнение первого порядка (2.20). Выражение (2.20) подставив в уравнение (2.19) получаем:

$$\theta_i^{n+1} = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}} \theta_i^{n+1} + \frac{C_i \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}. \quad (2.21)$$

Последнее равенство имеет вид (2.20), если при $i = 2, 3, \dots, N - 1$ всех выполняются соотношения

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{C_i \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}. \quad (2.22)$$

Для определения α_i и β_i по (2.22) необходимо знать α_1 и β_1 , которые находятся из левого граничного условия.

Разложим функцию $\theta(z)$ в ряд Тейлора в окрестности точки $z = 0$ до членов второго порядка относительно h : $\theta_2^{n+1} = \theta_1^{n+1} + h \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0}^{n+1} + h^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \Big|_{z=0}^{n+1}$.

Используя соотношение (2.9) получим:

$$\theta_2^{n+1} = \theta_1^{n+1} + h \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0}^{n+1} + \frac{h^2}{2a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_{z=0}^{n+1};$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0}^{n+1} = \frac{1}{h} \theta_2^{n+1} - \frac{1}{h} \theta_1^{n+1} - \frac{h}{2a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_{z=0}^{n+1} = -\frac{\alpha \tau v_0}{\lambda} \left(1 - \frac{z}{H}\right).$$

$$\text{Тогда } \theta_1^{n+1} = \frac{2ak}{2ak+h^2} \theta_2^{n+1} + \frac{h^2}{2ak+h^2} \theta_1^n + \frac{2ah\tau\alpha k v_0}{\lambda(2ak+h^2)} \left(1 - \frac{z}{H}\right).$$

Таким образом,

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{2a\tau}{2a\tau+h^2}, \\ \beta_1 = \frac{h^2}{2a\tau+h^2} \theta_1^n + \frac{2ah\tau_1\alpha\tau v_0}{\lambda(2a\tau+h^2)} \left(1 - \frac{z}{H}\right). \end{cases} \quad (2.23)$$

На правой границе температура $\theta|_{z=H} = 20$.

Численное решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье (2.9) с начальными и граничными условиями (2.10) получили методом прогонки. Была разработана программа на языке программирования Python, с использованием программных библиотек Pandas, Numpy и matplotlib (Приложение В).

На рис. 2.3 приведены результаты расчетов по данной задаче при $\alpha = 0,5$; $H = 2$ мкм через 15 минут процесса нагрева.

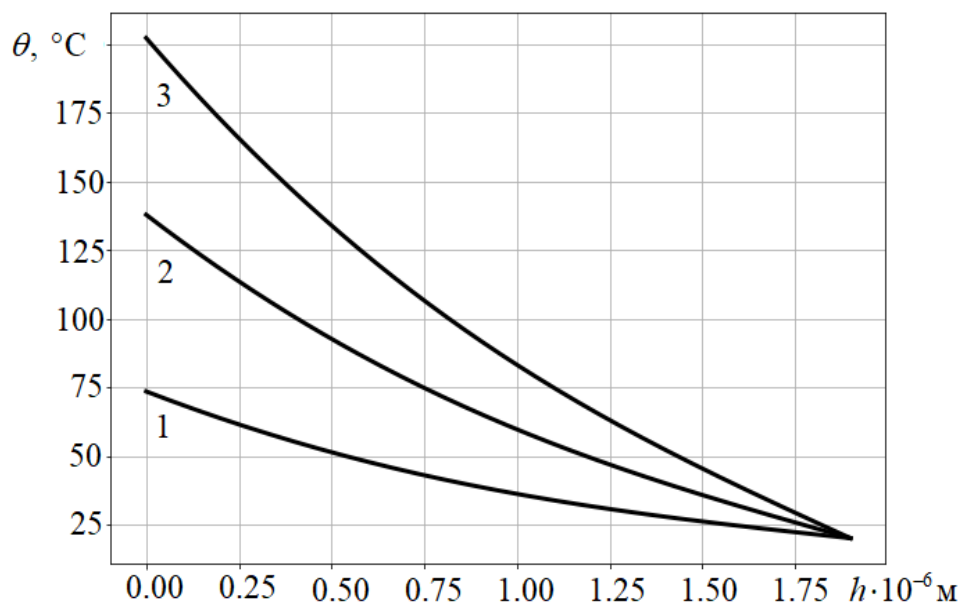


Рисунок – 2.3. Распределение температуры смазочного слоя при напряжениях сдвига с использованием неявной разностной схемы:

1 – $\tau = 51,72 \cdot 10^4 \text{ Па}$; 2 – $\tau = 103,44 \cdot 10^4 \text{ Па}$; 3 – $\tau = 155,17 \cdot 10^4 \text{ Па}$

Сравнение аналитического и численного методов решений температурной задачи:

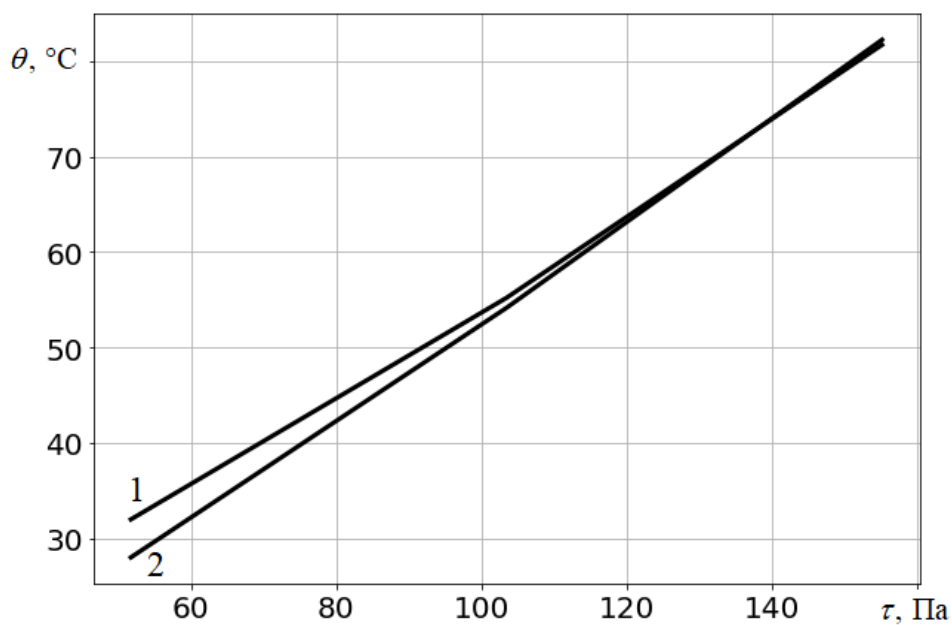


Рисунок – 2.4. Сравнение решений температурной задачи:

1 – численное решение, 2 – аналитическое решение

Разница между аналитическим и численным решениями составляет 4% (рис. 2.4). Совпадение этих двух решений позволяет говорить о достоверности результатов полученных численным и аналитическим методами.

2.3. Моделирование толщины смазочного слоя, момента трения и температуры смазочного слоя при переменной вязкости смазочного материала

Рассмотрим нестационарную задачу о скольжении поверхности по неподвижной поверхности, на которое нанесена вязкая жидкость. Подвижная поверхность вращается с угловой скоростью ω относительно своей оси. В гидродинамическом контакте Ox направлена противоположно скольжению поверхности, Oy – вдоль подвижной поверхности, Oz – перпендикулярно данному контакту.

Сопряженные поверхности разделяет смазочный слой $G = \{(x, z): 0 \leq z \leq h(x), r \leq x \leq R\}$, где $h(x)$ – высота смазочного слоя, граница контакта изменяется в диапазоне от r до R . Предположим, что смазочный слой – тонкий, т.е. характерное значение высоты смазочного слоя h_* много меньше характерного размера l_* области контакта ($h_* \ll l_*$), а сам этот размер много меньше радиуса цилиндра $l_* \ll R$.

Внутри смазочной пленки плотность ρ жидкости и составляющие скорости частицы жидкости u и ω удовлетворяют уравнению неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0. \quad (2.24)$$

Для вязких жидкостей широко применяется линейный реологический закон Ньютона (2.25), который для слоистых прямолинейных течений устанавливает пропорциональную зависимость между касательным вязким напряжением и нормальным градиентом скорости

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial n}, \quad (2.25)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; τ – касательное напряжение; v – скорость жидких слоев; n – нормаль.

Движение несжимаемой жидкости при ламинарном течении описывается системой из уравнения движения (Навье — Стокса) и уравнения неразрывности, которые в векторном виде можно записать как

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\bar{v}) = 0; \\ \rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\operatorname{grad}(p) + \operatorname{div}(2\mu D) + \rho \bar{f}, \end{cases} \quad (2.26)$$

где $\bar{v}$ – вектор скоростей; ρ – массовая плотность; p – статическое давление; $\bar{f}$ – вектор массовых сил; D – тензор скоростей деформации элементарного жидкого объема.

Рейнольдс вывел основное уравнение давления для смазочной пленки, основываясь на ряде допущений:

- жидкость несжимаема;
- вязкость жидкости постоянна на всем объеме;
- инерция жидкости не учитывается;
- эффекты турбулентности не учитываются.

В результате, уравнение Рейнольдса (уравнение давления для смазочной пленки), запишется в виде:

$$\operatorname{div} \left(\rho \frac{h^3}{12\mu} \nabla p \right) = \frac{\partial(\rho h)}{\partial t}. \quad (2.27)$$

Запишем нестационарное уравнение Рейнольдса в полярной системе координат:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{\partial(\rho h)}{\partial t}. \quad (2.28)$$

Давление, развиваемое в смазочном слое, уравнивает приложенную к поверхности нагрузку, т.е.

$$2\pi \int_r^R x p(x, t) dx = Q, \quad (2.29)$$

где Q – нагрузка на единицу длины.

Толщина смазочного слоя зависит только от времени t . В (2.26) указаны граничные условия для давления и начальное условие для толщины смазочного слоя:

$$p(x, t)|_{x=r} = p(x, t)|_{x=R} = 0, h = h(t), h(0) = H. \quad (2.30)$$

Вводя нормировочные коэффициенты, можно перейти к безразмерным переменным:

$$\bar{x} = \frac{x}{r}, \bar{h} = \frac{h}{h_0}, \bar{R} = \frac{R}{r}, \bar{p} = \frac{p}{p_0}, p_0 = \frac{Q}{2\pi r^2}, \bar{t} = \frac{Q h_0^2}{24\pi\mu_0 r^4} t,$$

где h_0 – толщина смазочного слоя в начальный момент времени.

В безразмерных переменных уравнения (2.28) и (2.29) принимают вид

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \bar{x}^2} = \frac{1}{\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{t}}, \quad (2.31)$$

$$\int_1^{\bar{R}} \bar{x} \cdot \bar{p}(\bar{x}) d\bar{x} = 1. \quad (2.32)$$

Функция $\bar{p}(\bar{x}, \bar{t})$ должна удовлетворять граничным условиям:

$$\bar{p}(1, \bar{t}) = \bar{p}(\bar{R}, \bar{t}) = 0. \quad (2.33)$$

Основными определяющими параметрами являются толщина смазочного слоя и давление, зависящие от времени.

Существуют различные эмпирические формулы, аппроксимирующие связь между коэффициентом вязкости и давления p . Рост динамической вязкости μ наблюдается с повышением давления p . Закон Баруса описывает экспоненциальную связь динамической вязкости, давления и температуры:

$$\mu = \mu_0 \exp(\alpha p) \exp(-\delta(T - T_0)), \quad (2.34)$$

где p — давление; α — пьезокоэффициент вязкости, μ_0 — базовый динамический коэффициент вязкости, δ — толщина смазочного слоя.

При переходе к безразмерным величинам получаем нормированный коэффициент:

$$\bar{\mu} = \mu_0 \exp(G\bar{p}) \exp(-\Omega\bar{T} + \delta). \quad (2.35)$$

Гидродинамическое взаимодействие между частицами в смазочной композиции с учётом броуновского движения частиц подробно рассмотрены Бэтчелором. Формула для коэффициента вязкости выглядит следующим образом:

$$\mu_0 = \mu_{\text{м.м}} (1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2), \quad (2.36)$$

где $\mu_{\text{м.м}}$ – динамическая вязкость моторного масла, φ – концентрация фуллеренов. Данное выражение справедливо для объемных концентраций до 10%. Зависимость динамической вязкости смазочного материала от концентрации фуллеренов представлена на рис. 2.5.

Применяя формулу (2.36), преобразуем формулу (2.35) к следующему виду:

$$\bar{\mu} = \mu_{\text{м.м}}(1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2)\exp(G\bar{p})\exp(-\Omega\bar{T} + \delta). \quad (2.37)$$

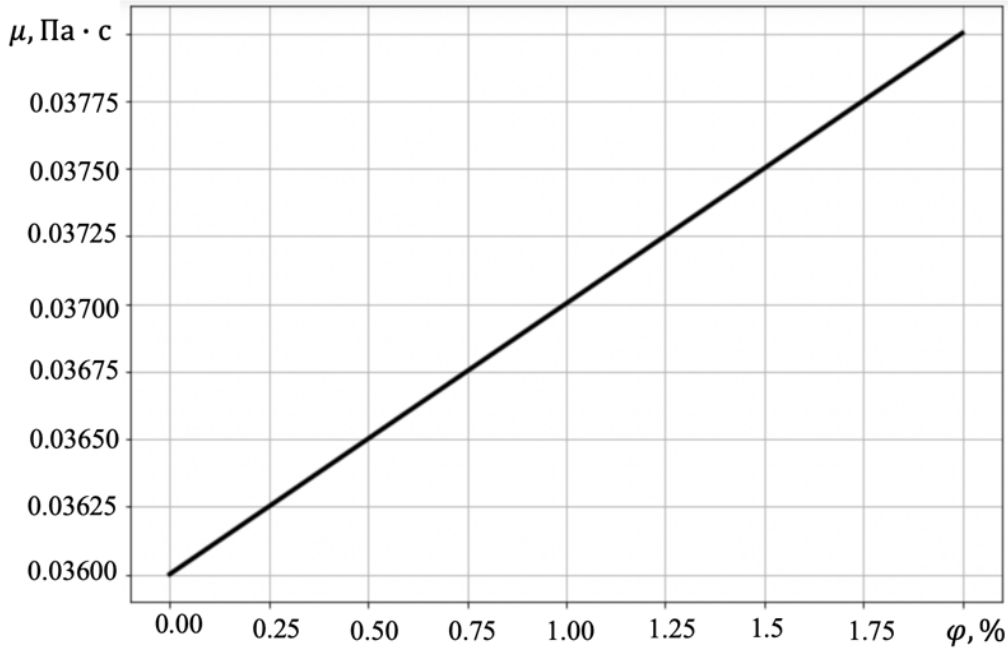


Рисунок – 2.5. Зависимость динамической вязкости смазочной композиции от концентрации фуллеренов

Температура и давление влияют на динамическую вязкость. Дифференциальное уравнение в частных производных, начальное и граничные условия (2.38) описывают процесс распространения теплоты в смазочном слое:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad (2.38)$$

$$\theta(0, t) = 0;$$

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

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

Применяя формулу (2.37), преобразуем уравнение Рейнольдса к следующему виду:

$$\frac{\partial^2}{\partial \bar{x}^2} e^{-G\bar{p} + \Omega\bar{T} - \delta} = -G \frac{1}{\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}}. \quad (2.39)$$

Интегрируя уравнение (2.39) в каждый момент времени относительно $\bar{p}$, получим:

$$e^{-G\bar{p} + \Omega\bar{T} - \delta} = -G \frac{1}{\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} \frac{\bar{x}^2}{2} + C_1 \bar{x} + C_2;$$

$$-G\bar{p} + \Omega\bar{T} - \delta = \ln \left(-G \frac{1}{\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} \frac{\bar{x}^2}{2} + C_1 \bar{x} + C_2 \right);$$

$$\bar{p} = -\frac{1}{G} \left(\ln \left(-G \frac{1}{\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} \frac{\bar{x}^2}{2} + C_1 \bar{x} + C_2 \right) + \Omega \bar{T} - \delta \right), \quad (2.40)$$

где $C_{1,2}$ — постоянные интегрирования.

Для нахождения постоянных интегрирования $C_{1,2}$ рассмотрим граничные условия:

$$\bar{p}(\bar{x}, \bar{t})|_{\bar{x}=1} = \bar{p}(\bar{x}, \bar{t})|_{\bar{x}=R} = 0. \quad (2.41)$$

Отсюда коэффициенты равны:

$$C_1 = G \frac{1}{2\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} (1 + R), \quad C_2 = e^{-\Omega \bar{T} + \delta} - G \frac{R}{2\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} \quad (2.42)$$

Далее, получим выражения для давления

$$\bar{p} = -\frac{1}{G} \left(\ln \left(e^{-\Omega \bar{T} + \delta} - G \frac{1}{2\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} (\bar{x}^2 - \bar{x}(1 + R) + R) \right) + \Omega \bar{T} - \delta \right). \quad (2.43)$$

При подстановке в уравнение (2.32), получим:

$$-\int_1^R \frac{\bar{x}}{G} \left(\ln \left(e^{-\Omega \bar{T} + \delta} - G \frac{1}{2\bar{h}^3} \frac{\partial \bar{h}(\bar{t})}{\partial \bar{t}} (\bar{x}^2 - \bar{x}(1 + R) + R) \right) + \Omega \bar{T} - \delta \right) d\bar{x} = 1. \quad (2.44)$$

Ниже представлены результаты расчетов параметров смазочного слоя при $R = 1,4$; $G = 0,00015$; $\delta = 1,8 \cdot 10^{-6}$; $\Omega = 0,9 \cdot 10^{-7}$.

Численное решение системы интегродифференциальных уравнений получили методом прогонки. Был разработан программный комплекс на языке программирования Delphi, который зарегистрирован федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) № 2022662966 от 08.07.2022 [105] (Приложение А).

На рис. 2.6 представлены результаты расчета толщины смазочного слоя от времени. В качестве смазочного материала использовано полусинтетическое моторное масло SAE 10W – 40 с различными концентрациями фуллерена C_{60} , дисперсность которых составляла 1 нм. Установлено, что при изменении концентрации фуллерена в смазочном материале толщина слоя практически не менялась.

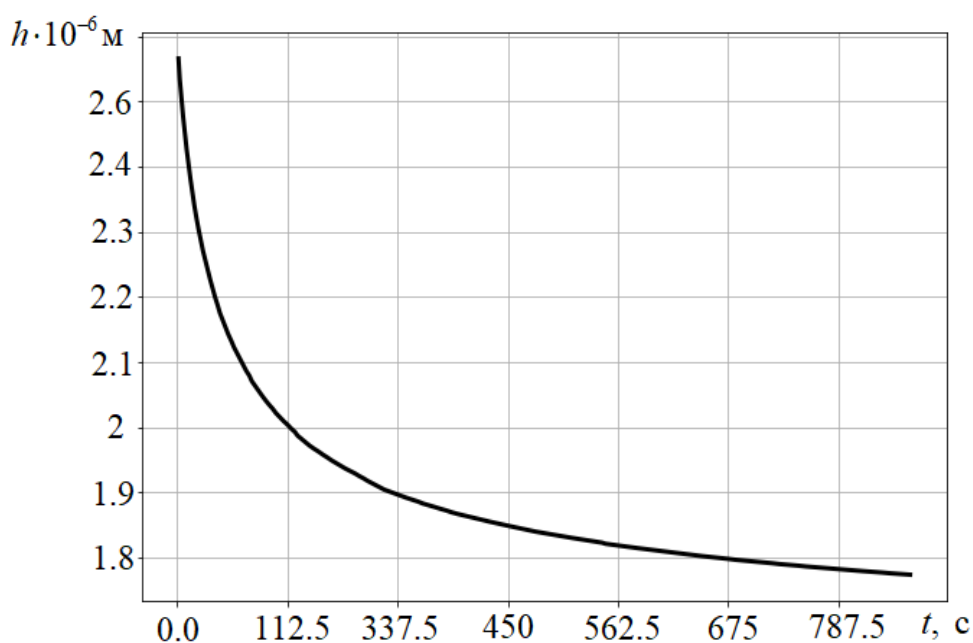


Рисунок – 2.6. Зависимость толщины смазочного слоя от времени

В табл. 2.1 – 2.2 представлены величины момента трения и температуры, полученные для смазочного материала, состоящего из масла SAE 10W – 40 и фуллерена C₆₀. Концентрация фуллерена в масле изменялась в пределах от 0,2 до 2 %.

Таблица 2.1 – Расчетный момент трения смазочных слоев масла SAE 10W–40 при различной концентрации фуллерена C₆₀ и нагрузки

Концентрация фуллерена, %	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$ ($N = 80 \text{ Н}$)	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$ ($N = 200 \text{ Н}$)
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

Проведенные расчеты показывают, что увеличение концентрации фуллерена в масле снижало момент трения в среднем в 2,2 раза при нагрузках 80 и 200 Н. При

этом значения момента сил с нагрузкой 200 Н в 3 раза ниже значений с нагрузкой 80 Н.

Таблица 2.2 – Расчетная температура смазочных слоев масла SAE 10W–40 при различной концентрации фуллерена C_{60} и нагрузки

Концентрация фуллерена, %	$\theta, ^\circ\text{C}$ ($N = 80 \text{ Н}$)	$\theta, ^\circ\text{C}$ ($N = 200 \text{ Н}$)
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

С ростом концентрации фуллерена в смазочном масле снижалась температура смазочного слоя в 1,5 раза при нагрузках 80 и 200 Н. Максимальное снижение момента трения и температуры смазочного слоя наблюдали при смазке с 2 % фуллерена C_{60} .

Следует отметить, что введение фуллерена C_{60} в масло оказывает существенное влияние на значения момента трения и температуры смазочного слоя.

2.4. Критерий оценки ресурса смазочного материала

В настоящее время, когда проблема импортзамещения стала особенно актуальной, созданию новых высокоэффективных смазочных материалов и обеспечению адекватности их соответствия условиям работы трибосопряжений придаётся особое значение. Смазочный материал теперь рассматривается как полноправный конструкционный элемент узла трения, и его выбору придаётся не меньшее значение, чем оптимальному выбору материалов трущихся деталей этого узла. Требуемый уровень функциональных свойств современным смазочным материалам, включая моторные масла, обеспечивают вводимые в их состав маслорастворимые присадки, представляющие собой соединения, содержащие такие

химически активные элементы, как сера, фосфор, хлор и т.д. Только трибологически активных присадок в современных моторных маслах содержится до 5-7%. Изготовление, применение, хранение и утилизация масел, содержащих такие присадки, отрицательно влияет на экологию, а также вызывает при высоких температурах коррозию цветных металлов [106]. Этому недостатка лишены масла, в которых вместо маслорастворимых химически активных присадок вводят твёрдые нерастворимые в масле микро- и нанодобавки и которые, в зависимости от их дисперсности, представляют собой широкую линейку дисперсных систем – от суспензий до дисперсно-коллоидных систем [36, 107 – 110]. Проведённые авторами [36, 107 – 110] исследования на лабораторных установках и стендах экспериментально установлено, что добавки микро-/наночастиц обеспечивают заметное повышение вязкостных, антифрикционных и противоизносных характеристик исследуемых масел. Особый интерес представляют результаты работ [36, 110], согласно которым значительное повышение трибологических характеристик исследуемых масел происходит при легировании их наночастицами углерода – фуллереном C_{60} , что, по-видимому, объясняется его способностью образовывать защитные плёнки на поверхностях трения, его высокой упругостью и прочностью, высокой химической стабильностью и слабыми межмолекулярными воздействиями, а также – его квазисферической формой [111]. Однако до сих пор не построен критерий, позволяющий оценить ресурс функционирования смазочных масел [112, 113], легированных фуллереном C_{60} , так что оценка рациональности легирования этим фуллереном моторного масла на стадии проектирования по табличным данным и данным простых лабораторных экспериментов невозможна.

Выведена формула для оценки ресурса t_d смазочного материала с нанодобавкой в зависимости от температуры, физико – механических свойств и вязкости с помощью анализа размерностей [114]. На основании анализа теоретических и экспериментальных работ, были выявлены параметры, влияющие на ресурс смазочного слоя, и составлено параметрическое уравнение для определения оценки ресурса смазочной среды t_d

$$t_d = f(\theta, \rho, c, \mu), \quad (2.45)$$

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

Задача состоит в получении показателей $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ в формуле

$$t_d = \theta^\alpha, \rho^\beta, c^\gamma, \mu^\varepsilon. \quad (2.46)$$

Выпишем размерность входящих в (2.45) физических величин:

$$[t_d] = T; [\theta] = \Theta; [\rho] = M \cdot L^{-3}; [c] = L^2 \cdot T^{-2} \cdot \Theta^{-1}; [\mu] = M \cdot L^{-1} T^{-1}. \quad (2.47)$$

Из (2.47) видно, что $N = 4, K = 3, N - K = 1$, т.е. комбинация вида (2.46) единственная, поскольку имеем четыре физические величины, выраженные через три основные единицы. Подставим теперь размерности θ, ρ, c и μ в искомую зависимость (2.46):

$$T^1 = \Theta^\alpha M^\beta T^{-\beta} L^{-\beta} M^\gamma L^{-3\gamma} T^{-2\varepsilon} L^{2\varepsilon} \Theta^{-\varepsilon} \quad (2.48)$$

Равенство (2.48) может выполняться, только если показатели степеней у T, M, L и Θ с обеих сторон равенства одинаковы, т.е. если выполняются условия:

$$\begin{cases} \alpha - \varepsilon = 0 \\ \beta + \gamma = 0 \\ -\beta - 2\varepsilon = 1 \\ -\beta - 3\gamma + 2\varepsilon = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = \varepsilon \\ \beta = -\gamma = -1 - 2\varepsilon \\ \gamma = 1 + 2\varepsilon \\ 1 + 2\varepsilon - 3 - 6\varepsilon + 2\varepsilon = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

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

Подставим найденные значения показателей в (2.46) и получим:

$$t_d = \frac{\mu}{\theta \rho c}. \quad (2.49)$$

Исходя из (2.46), критерий оценки ресурса смазочного материала имеет следующий вид:

$$\frac{t_{d1}}{t_{d0}} = \frac{\frac{\mu_1}{\theta_1 \rho_1 c_1}}{\frac{\mu_0}{\theta_0 \rho_0 c_0}} = \frac{C_\mu}{C_\theta C_\rho C_c}, \quad (2.50)$$

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} .

фуллерена C_{60} , c_0 , c_1 – теплоемкость моторного масла и того же масла с добавками фуллерена C_{60} .

Расчеты проводились при изменении концентрации фуллерена в масле в диапазоне от 0,2 до 2 % и вязкости смазочного материала.

Следует отметить, что рост концентрации фуллерена C_{60} в масле приводит к увеличению критерия ресурса смазочного материала в 1,7 раза.

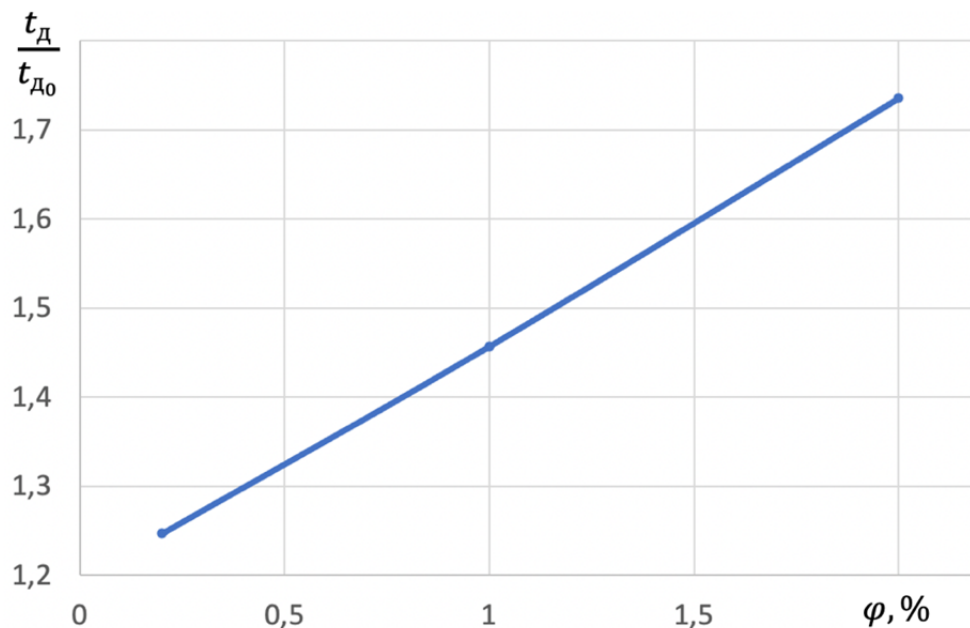


Рисунок – 2.7. Зависимость критерия оценки ресурса смазочного слоя от концентрации фуллеренов

Выводы по главе 2:

1. Основываясь на энергетическом балансе трения, была предложена расчетная модель средней температуры смазочного слоя с учетом переменной скорости сдвига.
2. В результате решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье была разработана модель расчета градиента температуры смазочного слоя с учетом переменной скорости сдвига.
3. На основе гидродинамической теории смазки предложена модель расчета момента трения, толщины и температуры смазочного слоя для управления трибологическими характеристиками легированных смазочных материалов. Разработанная математическая модель при исследовании

смазочной композиции с добавкой фуллеренов позволила установить, что рост концентраций фуллеренов практически не влияет на изменение толщины смазочного слоя. Выявлено, что при нагрузках 80 и 200 Н момент трения снижается в 2 раза, температура смазочного слоя в 1,5 раза за счет изменения концентрации фуллеренов в диапазоне от 0,2 до 2 %.

4. На основе метода анализа размерностей предложен критерий оценки ресурса смазочного материала с учетом температуры, физико – механических свойств и вязкости. Исследовано влияние концентраций фуллеренов в смазочном масле на критерий оценки ресурса смазки. Анализ результатов показал, что рост концентрации фуллеренов приводит к увеличению критерия в 1,7 раза.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одной из важнейших составляющих эксплуатационных характеристик пар трения скольжения являются условия смазывания и смазочный материал. Применение смазочных материалов обусловлено режимами эксплуатации машин и их конструктивными особенностями.

Основные функции смазочного материала заключаются в уменьшении сил трения, обеспечении более равномерного распределения давления и температуры, отвода теплоты из зоны контакта, уноса частиц износа, защиты рабочих поверхностей деталей от коррозии.

В качестве основы исследуемых смазочных композиций использовали полусинтетическое моторное масло Mobil Ultra SAE 10W–40.

Масло SAE 10W–40 (табл. 3.1) – высококачественное многоцелевое полусинтетическое моторное масло, сохраняет оптимальные показатели вязкости.

Mobil Ultra 10W–40 снижает износ двигателей и имеет надежные показатели при высоких и низких температурах.

Таблица 3.1 – Характеристика моторного масла SAE 10W–40

Вязкость кинематическая при 100°C, мм ² /с	13,2
Вязкость кинематическая при 50°C, мм ² /с	88,7
Индекс вязкости, не менее	150
Температура вспышки в открытом тигле, не ниже, °C	230
Температура застывания, не выше, °C	– 42
Плотность при 20°C, кг/м ³ , не более	870

В качестве микро-/нанодобавок в данной работе использовали геомодификаторы и углеродные нанодобавки: серпентинит, шунгит, фуллерен (C₆₀) и углеродные нанотрубки.

Серпентинит предназначен для восстановления изношенных трущихся деталей механизмов, восстановления геометрии деталей, снижения вибрации, шума, нагрева при работе оборудования и техники.

Серпентинит образует пленки в зонах трения деталей механических узлов. Это компенсирует износ деталей, снижает шероховатость и удерживает смазку на поверхности трения. Пленка устойчива и её положительное действие сохраняется при замене масла и со временем эффект только усиливается.

Шунгит циркулируют по системе смазки и осаживаются на металлических поверхностях трения. Под воздействием температуры и давления частицы заполняют пустоты и микроповреждения на металле и создают очень твёрдый поверхностный слой.

Это приводит к снижению коэффициента трения и некоторому увеличению мощности и долговечности механизмов.

Фуллерены (рис. 3.1) в качестве смазочных материалов применялись практически с момента их получения, поскольку графит широко применялся в качестве основы целого класса смазочных материалов.

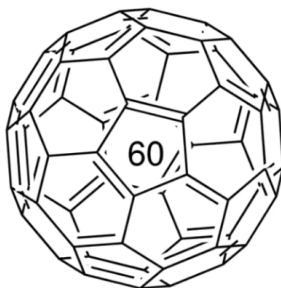


Рисунок – 3.1. Фуллерен C_{60}

В качестве еще одной предпосылки применения фуллеренов служила округлая форма молекул, что приводит к реализации поворотно-сдвигового механизма в узле трения (рис. 3.2).

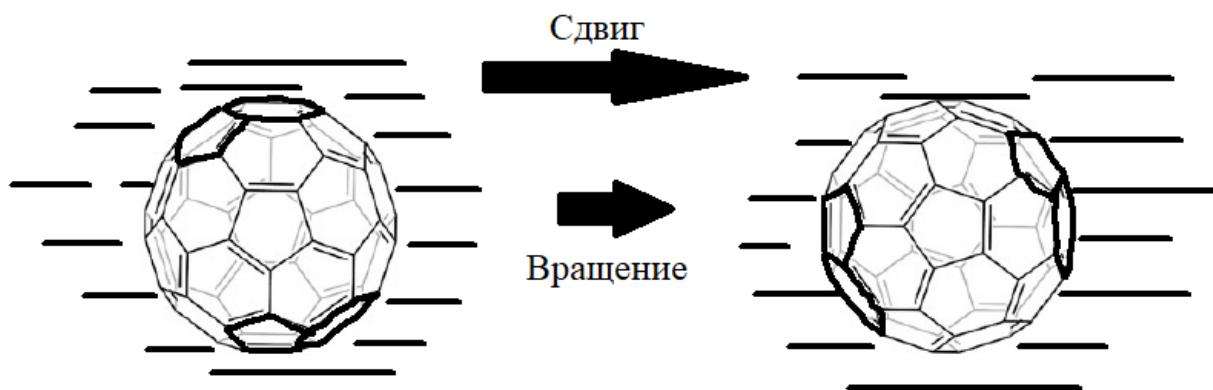


Рисунок – 3.2. Поворотно-сдвиговый механизм

Основные свойства фуллеренов C_{60} представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства фуллеренов C_{60}

Физическое состояние	Твердый
Средний диаметр, нм	1
Молекулярный вес, кг/моль	0,72064
Температура плавления, °C	>280
Температура вспышки, °C	>94
Плотность при 20 °C, кг/м ³	892
Теплоемкость, Дж/кг·°C	2000
Теплопроводность, Вт/м·°C	0,134

Для испытаний применялся фуллерен C_{60} (99,9% чистоты) производства Merck KGaA (г. Дармштадт, Германия). Концентрация фуллерена изменялась в диапазоне от 0,2 до 2 %.

Углеродные нанотрубки являются листом графена, толщиной в один атом, свернутый в трубу длиной более 5 мкм (рис. 3.3). Они обладают чрезвычайно прочностью и упругостью.

Для испытаний применялись углеродные нанотрубки производства Ocsial. Диаметр углеродной нанотрубки составляет $1,6 \pm 0,4$ нм. Концентрация нанотрубки изменялась в пределах от 0,1 до 1 %.

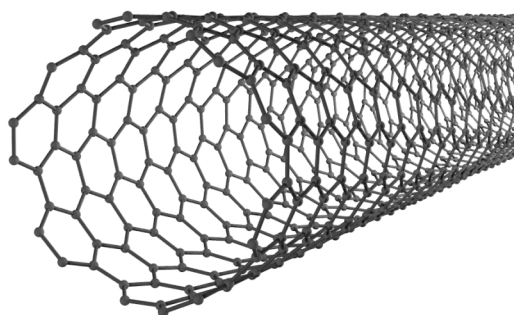


Рисунок – 3.3. Углеродная нанотрубка (УНТ)

В качестве смазочных композиций были испытаны: масло + 0,05 % серпентинита, масло + 0,1 % серпентинита, масло + 0,05 % шунгита, масло + 0,2 %

C₆₀, масло + 0,8 % C₆₀, масло + 1 % C₆₀, масло + 1,5 % C₆₀, масло + 2 % C₆₀, масло + 0,1 % УНТ, масло + 0,2 % УНТ, масло + 1 % УНТ.

3.1. Методика перемешивания смазочной композиции

В жидкой среде частицы обладают способностью образовывать агломераты. С уменьшением размера частиц этот эффект увеличивается. Чем более тонкодисперсным является порошок, тем сложнее диспергировать агломераты до отдельных частиц.

Среди множества способов перемешивания ультразвуковое диспергирование обеспечивает получение материалов сверхтонкой дисперсности.

Диспергирующее действие ультразвука связано с кавитацией – образованием и схлопыванием полостей в жидкости. Схлопывание полостей сопровождается появлением кавитационных ударных волн, которые разрушают агломераты и приводят к равномерному распределению частиц.

Смазочную композицию, представляющую собой масляную суспензию фуллерена получали путем многократной обработки масляно – фуллереновой системы на ультразвуковом диспергаторе (рис. 3.4). На рис. 3.5 представлена плата генератора.

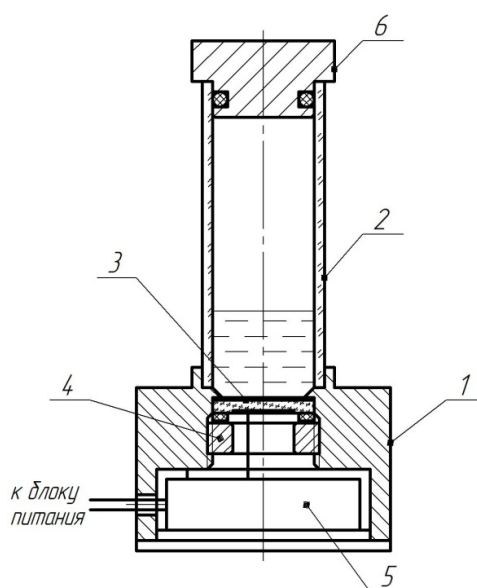


Рисунок – 3.4. Ультразвуковой диспергатор:

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

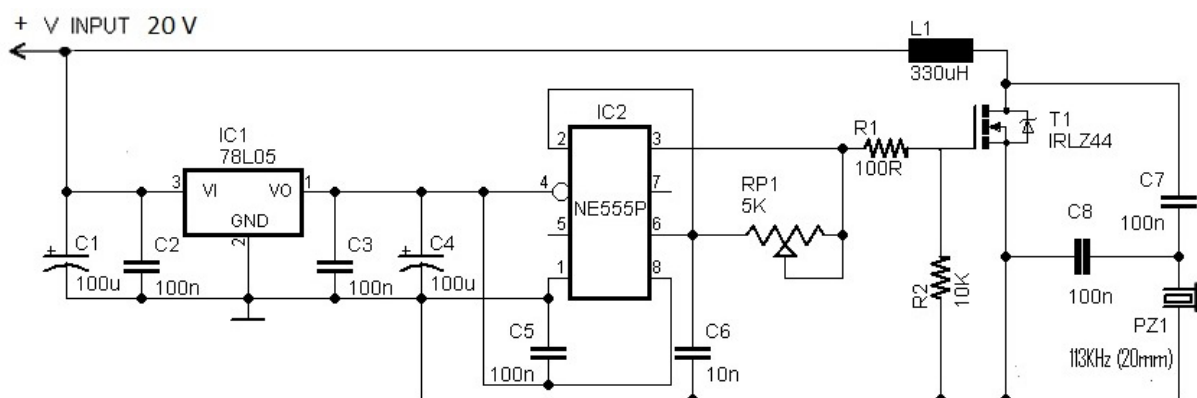


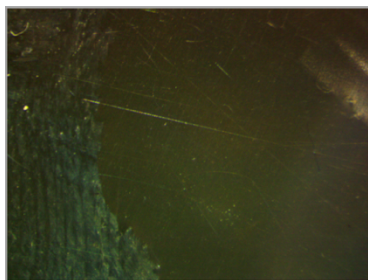
Рисунок – 3.5. Плата генератора

Контроль качества перемешивания производился при помощи микроскопа Levenhuk zoom 1B (рис. 3.6), с плавно изменяемым увеличением в диапазоне от 7 до 45 крат.

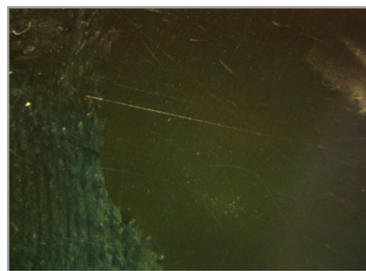
Ультразвуковой диспергатор обеспечивает равномерное перемешивание моторного масла SAE 10W – 40 с геомодификаторами и C_{60} (рис 3.7 (а – ж)). При перемешивании небольшого количества УНТ ($\leq 1\%$) с маслом SAE 10W – 40 оставался осадок с примесями (рис. 3.7 (з – к)). Это связано с тем, что большая часть примесей находится в закапсулированном состоянии между молекулами УНТ, а некоторая – внутри их. Продолжительность одной ультразвуковой обработки, сопровождавшейся нагревом раствора до 60 – 70°C составляла 10 мин.



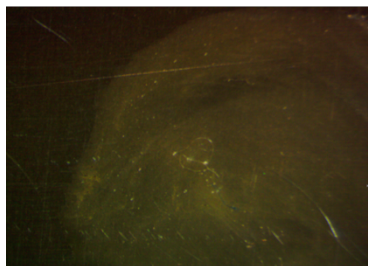
Рисунок – 3.6. Микроскоп Levenhuk zoom 1B



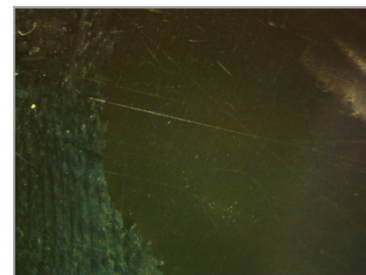
а)



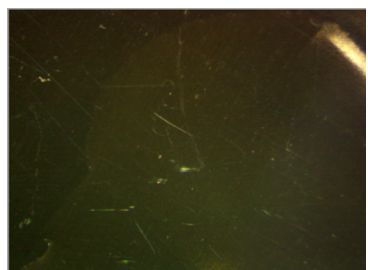
б)



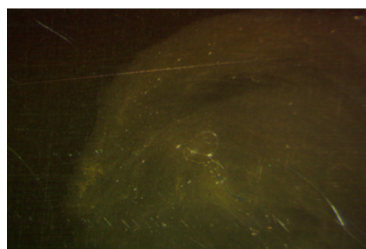
в)



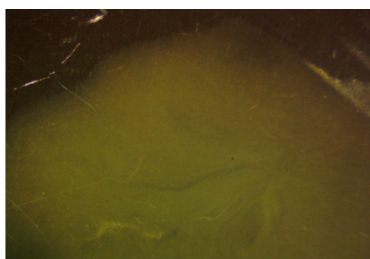
г)



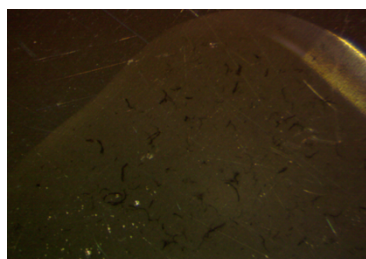
д)



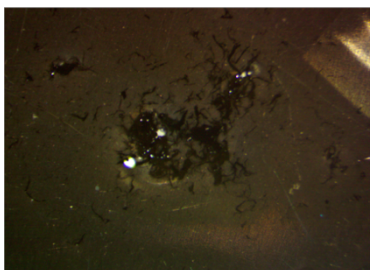
е)



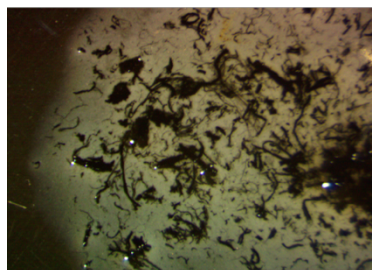
ж)



з)



и)



к)

Рисунок – 3.7. Снимки смазочных композиций: а – масло + 0,05 % серпентинита, б – масло + 0,1% серпентинита, в – масло + 0,05 % шунгита, г – масло + 0,1 % C_{60} , д – масло + 0,2 % C_{60} , е – масло + 1 % C_{60} , ж – масло + 2 % C_{60} , з – масло + 0,1 % углеродных нанотрубок, и – масло + 0,2 % углеродных нанотрубок, к – масло + 1 % углеродных нанотрубок

3.4. Экспериментальные установки

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.

3.4.1. Экспериментальная установка УМТ – 1

Трибологические испытания проводили на универсальной машине трения УМТ – 1 (рис. 3.8). На рис. 3.9 показана схема машины трения УМТ – 1, поясняющая конструкцию испытательной установки, узла нагружения и механизма привода.



Рисунок – 3.8. Универсальная машина трения УМТ-1

В состав машины трения входят: испытательная установка, привод движения испытываемых образцов, узел нагружения образцов, пульт измерения и управления. В табл. 3.3 указаны основные характеристики машины трения УМТ – 1.

Таблица 3.3 – Основные характеристики машины трения УМТ – 1:

Тип силоизмерителя	Пневматический
Предел измерения нагрузки, Н	5000
Тип измерения момента трения	Электромеханический

Пределы допускаемой погрешности измерений усилий, %	± 1
Потребляемая мощность	16кВт
Диапазон изменения частоты вращения	50 – 3000 об/мин

Моделирование пары трения скольжения со смазкой осуществлялось по испытательной схеме «кольцо-кольцо» (рис. 3.10). Чертежи образцов приведены на рис. 3.11, 3.12.

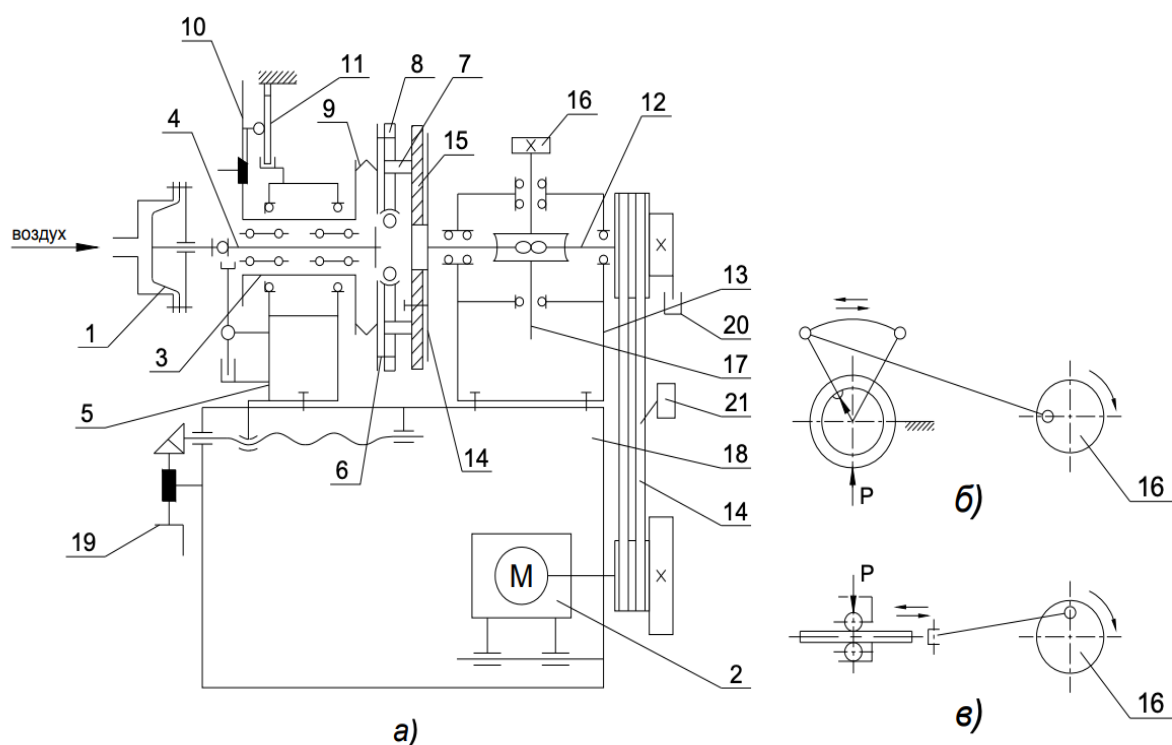


Рисунок – 3.9. Схема машины трения УМТ – 1:

а) общая схема; б) схема при качательном движении; в) схема при возвратно-поступательном движении; 1 – мембранный пневмопривод, 2 – электродвигатель, 3 – вал, 4 – шток, 5 – корпус, 6 – кольцо, 7 – пальчиковые образцы, 8 – диск, 9 – гибкая связь, 10 – рычаг, 11 – упругий элемент, 12 – вал, 13 – редуктор, 14 – держатель диска, 15 – диск, 16 – кривошип, 17 – вал, 18 – станина, 19 – рукоятка, 20 – датчик, 21 – датчик

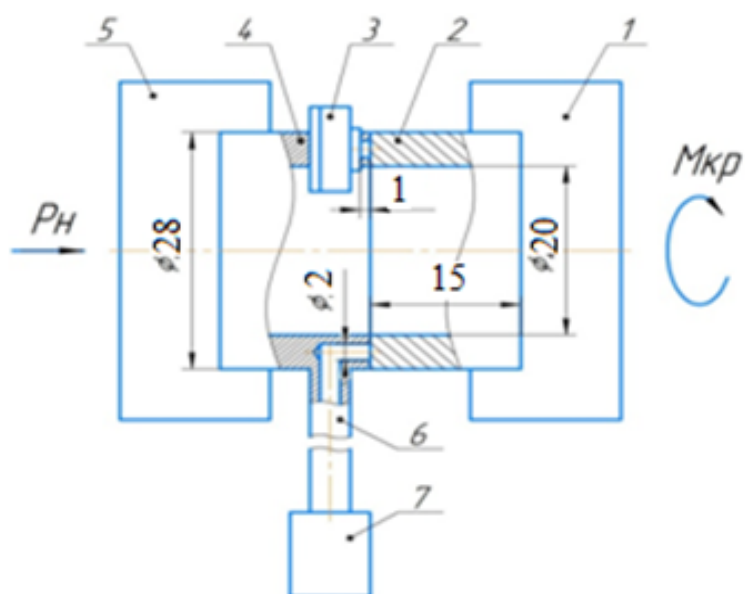


Рисунок – 3.10. Схема расположения образцов и датчиков: 1 – вращающийся патрон УМТ; 2 – вращающийся образец; 3 – инфракрасный датчик температуры MLX90614; 4 – неподвижный образец; 5 – неподвижный патрон УМТ; 6 – трубка для измерения давления смазки; 7 – датчик давления смазки.

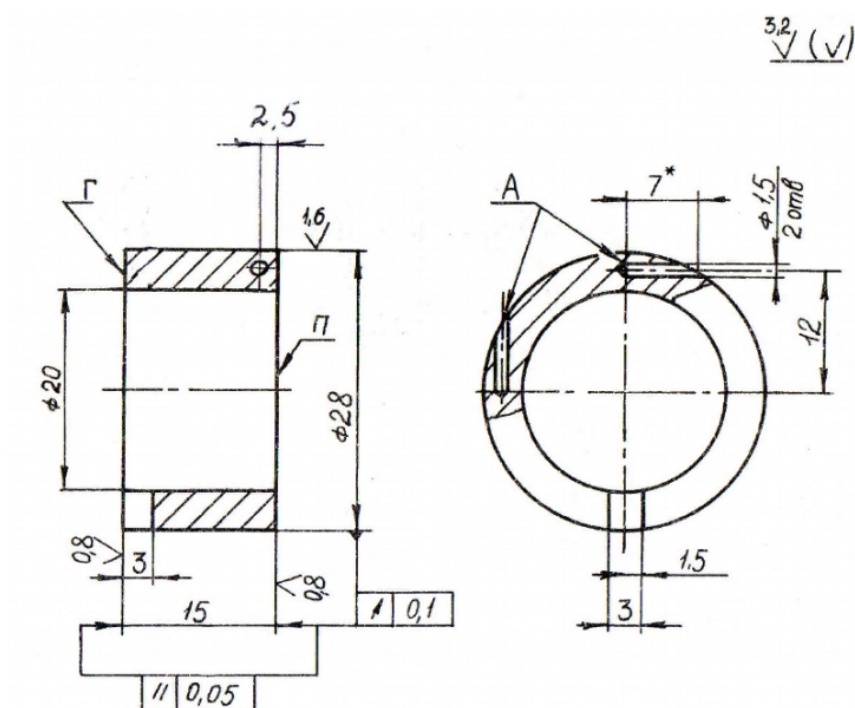


Рисунок – 3.11. Образец – кольцо (невращающийся): А – отверстия для установки термодпар, П, Г – поверхность трения и клеймения образцов соответственно

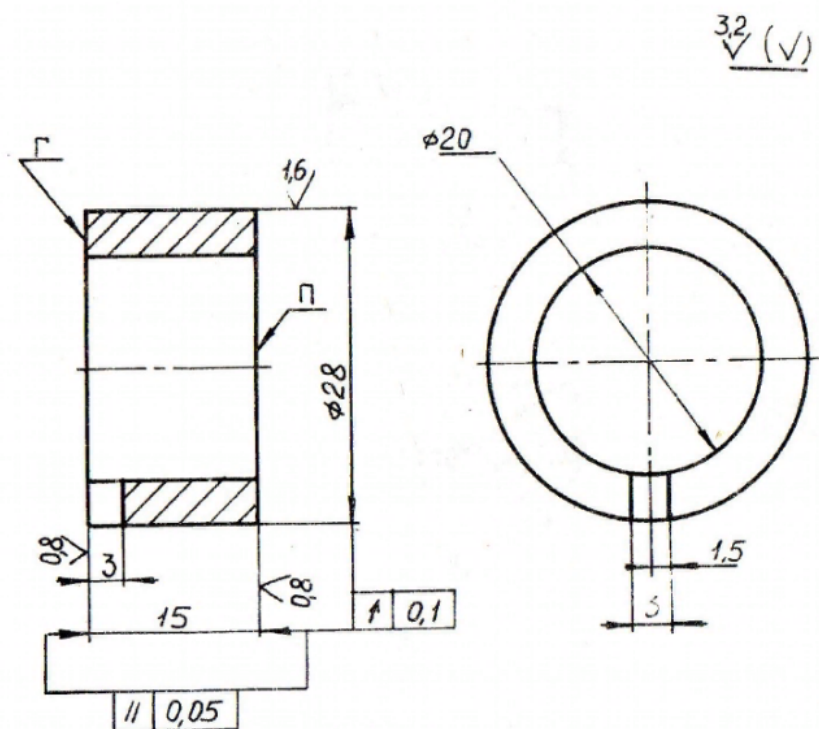


Рисунок – 3.12. Образец – кольцо (вращающийся): П – поверхность трения, Г – поверхность клеймения

Смазка в зону трения вводилась капельным способом. В качестве материалов пар трения при сравнительных испытаниях использовались сталь 30ХГСА, бронза БрАЖМц10–3–1,5 и чугун СЧ 15–32. С учетом номинальной площади контакта $A = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, давление достигало 0,05; 0,1 и 0,155 Мпа. Фиксируемыми параметрами являлись момент силы трения, температура, суммарный износ пары, усредненный по шести точкам измерения, и линейная интенсивность изнашивания измеряемая термопара [116]. Данные передавались через измерительную аппаратуру фирмы National Instruments в табличном виде с помощью программы Labview.

Момент трения M рассчитывали по тарировочной зависимости

$$M = 0,079U, \quad (3.1)$$

где U – выходное напряжение, записываемое в память ЭВМ.

Коэффициент трения f определяли по зависимости

$$f = \frac{M}{R_{cp}P}, \quad (3.2)$$

где – R_{cp} средний радиус дорожки трения, равный 12 мм.

Линейную интенсивность изнашивания I_h по формуле:

$$I_h = \frac{(\Delta h_1 + \Delta h_2)}{2\pi R_{cp} t n}, \quad (3.3)$$

где n – частота вращения образцов, $\Delta h_{1,2}$ – износ пары.

3.4.2. Автоматизированный комплекс «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ

Сравнительные испытания масла и масла с углеродными нанодобавками (фуллеренами и углеродными нанотрубками) при осадке (рис. 3.13) проводили на лабораторном комплексе ОМД – 1 ЧПУ (рис. 3.14).

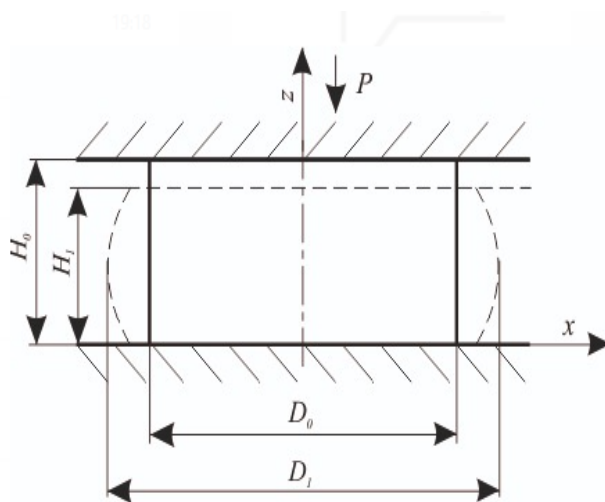
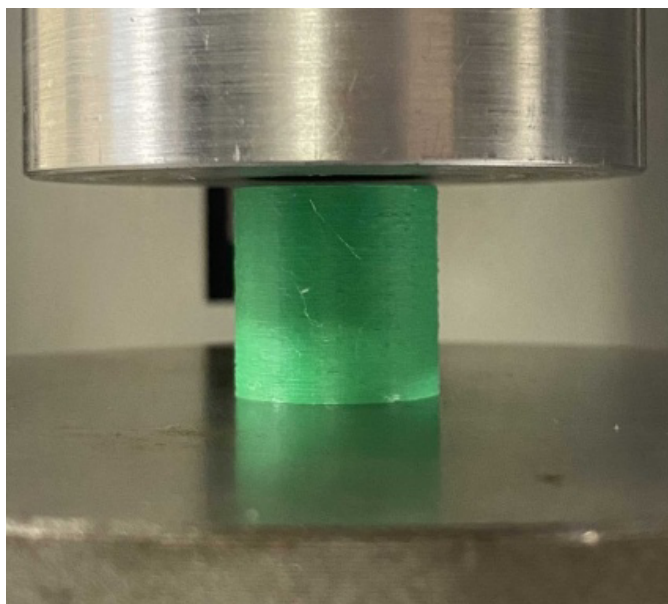


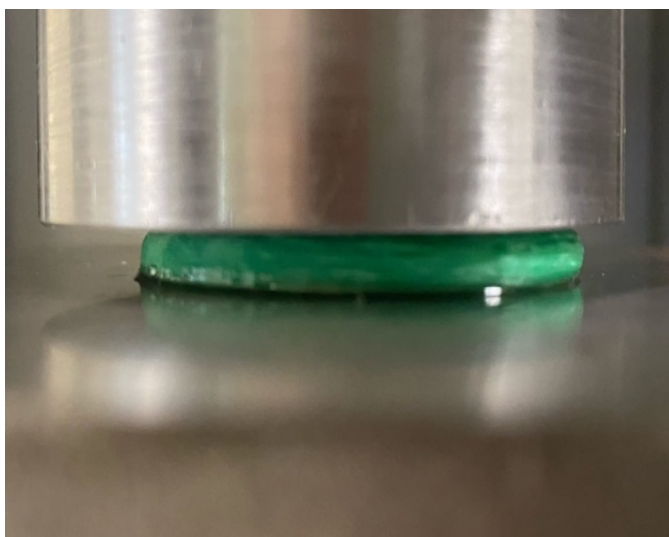
Рисунок – 3.13. Схема осадки: H_0, D_0 – начальные размеры заготовки, H_1, D_1 – размеры заготовки после осадки



Рисунок – 3.14. Автоматизированный лабораторный комплекс «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ



а



б

Рисунок – 3.15.: а – исходный образец, б – процесс осадки

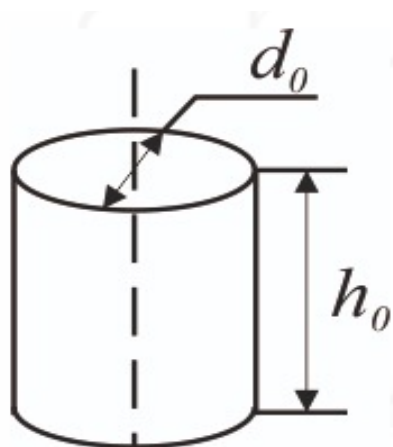


Рисунок – 3.16. Образец для испытаний

При испытании автоматически получали диаграмму осадки – график зависимости между усилием и перемещением образца. Измерение усилия проводилось по отсчетным устройствам пресса. Погрешность измерения усилия составило $\pm 2\%$. Смазка между торцевыми поверхностями образца и опорными плитами осуществлялась капельным способом.

Эксперимент по осадке (рис. 3.15) цилиндрической заготовки между опорными плитами проводился на цилиндрах (рис. 3.16), распечатанных на 3D – принтере с размерами: $h_0 = 20$ мм, $d_0 = 20$ мм.

3.4.3. Экспериментальная установка КТ – 2

Для оценки влияния фуллеренов и углеродных нанотрубок на антифрикционные свойства моторного масла были проведены испытания на четырехшариковой машине КТ – 2 (рис. 3.17) температурным методом по ГОСТу 23.221-84. Испытания проводили в интервале температур 30 – 200 °С. Образцами служили шарики из стали 100CR6, диаметром 7,94 мм. Осевая нагрузка составляла 107, 8 Н, контактная нагрузка на один шар равна 44,2 Н. Скорость скольжения составляла 0,24 мм/с.

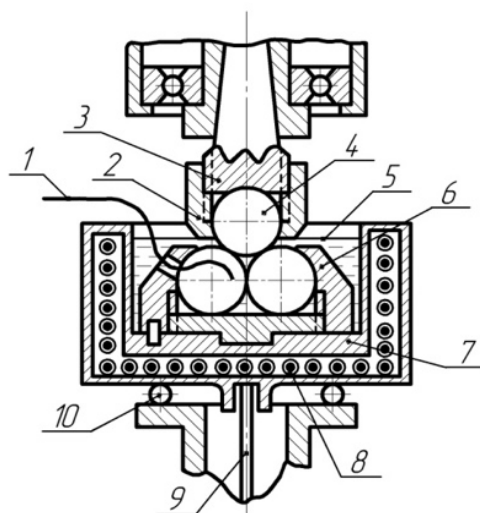


Рисунок – 3.17. Схема узла трения машины КТ-2: 1 – термопара; 2 – накидная гайка; 3 – конус шпинделя; 4 – шарик; 5 – верхний уровень масла; 6 – оправка; 7 – корпус нагревателя; 8 – спираль нагревателя; 9 – торсион, 10 – опорный подшипник.

От внешнего источника тепла температура увеличивалась со скоростью 5 °С/мин. Момент трения оценивался через каждые 10 — 20 °С. Продолжительность

опыта при каждой температуре составляла 60 с. Фиксировались следующие параметры: температура смазочного материала и момент трения. Коэффициент трения находился из момента трения.

Для каждого исследуемого материала испытания проводили три раза. Зависимость коэффициента трения от температуры смазочной композиции была построена по средним арифметическим значениям.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАСЛА С МИКРО-/НАНОДОБАВКАМИ

В данной главе приведены результаты исследования коэффициента трения, температуры смазочного слоя и интенсивности изнашивания в условиях смазки образцов из стали, бронзы и чугуна. Были проведены сравнительные экспериментальные исследования трибологических свойств моторного масла и с добавлением в него серпентинита, шунгита и фуллерена C_{60} на универсальной машине трения УМТ – 1 по разработанной методике в лаборатории трения в экстремальных условиях ИМАШ РАН.

4.1 Определение влияния серпентинита на коэффициент трения, интенсивность изнашивания материалов и температуру смазочного слоя

В процессе исследования определяли температуру смазочного слоя, коэффициент трения и интенсивность изнашивания для смазочных композиций на основе моторного масла, в качестве добавок к которым использовали серпентинит. Содержание серпентинита в масле составило 0,05 и 0,1 %. Испытания проводили на машине трения УМТ – 1, характеристики машины трения описаны в разделе 3.4.1, на парах трения «кольцо-кольцо» при нагрузках 150, 300, 450 Н. При испытаниях образец вращался с частотой вращения 50, 100 и 300 об/мин, что соответствовало скорости 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин. Результаты исследований представлены в табл. 4.1 – 4.9.

Анализируя представленную таблицу 4.1 необходимо отметить, что добавка серпентинита в моторное масло снижает коэффициент трения в диапазоне испытанных смазочных композиций.

Максимальное снижение коэффициента трения при нагрузке 150 Н наблюдается при введении 0,1 % серпентинита в масло у пар сталь – бронза при скорости 8,8 и 26,4 м/мин и сталь – чугун при скорости 26,4 м/мин. Однако, наблюдается рост

коэффициента трения пары сталь – бронза при введении 0,1 % серпентинита при скорости равной 4,4 м/мин.

Следует отметить, что введение 0,05 % серпентинита в масло снижает коэффициент трения всех сочетаний пар в 1,36 раза при нормальной нагрузке 150 Н, а рост концентрации серпентинита до 0,1 % снижает его в 1,46 раз.

Таблица 4.1 – Экспериментальные значения коэффициента трения при нагрузке 150 Н для каждой исследуемой композиции в диапазоне скорости от 4,4 до 26,4 м/мин

Пара трения	Скорость, м/мин	Коэффициент трения (моторное масло)	Коэффициент трения (моторное масло + 0,05% серпенти- нита)	Коэффициент трения (моторное масло + 0,1% серпентинита)
Сталь – бронза	4,4	0,11	0,1	0,27
	8,8	0,35	0,17	0,17
	26,4	0,26	0,17	0,13
Сталь – чугун	4,4	0,16	0,17	0,14
	8,8	0,2	0,17	0,13
	26,4	0,24	0,1	0,09
Чугун – бронза	4,4	0,15	0,13	0,11
	8,8	0,12	0,09	0,11
	26,4	0,13	0,17	0,12

Из представленной табл. 4.2 видно, что введение серпентинита до 0,1 % в масло практически не влияет на значения коэффициента трения, а в некоторых случаях даже увеличивает его значение. При этом наблюдается снижение коэффициента трения в 2 раза при введении серпентинита в масло у пар сталь – чугун и чугун – бронза при скоростях 4,4 и 8,8 м/мин соответственно.

Таблица 4.2 – Экспериментальные значения коэффициента трения при нагрузке 300 Н для каждой исследуемой композиции в диапазоне скорости от 4,4 до 26,4 м/мин

Пара трения	Скорость, м/мин	Коэффициент трения (моторное масло)	Коэффициент трения (моторное масло + 0,05% серпентинита)	Коэффициент трения (моторное масло + 0,1% серпентинита)
Сталь – бронза	4,4	0,07	0,05	0,12
	8,8	0,06	0,11	0,09
	26,4	0,1	0,09	0,03
Сталь – чугун	4,4	0,17	0,06	0,08
	8,8	0,05	0,11	0,07
	26,4	0,06	0,06	0,2
Чугун – бронза	4,4	0,06	0,13	0,06
	8,8	0,11	0,06	0,05
	26,4	0,05	0,14	0,11

Как показывают проведенные исследования (табл. 4.3), введение серпентинита в масло приводит к росту коэффициента трения. Максимальное снижение коэффициента трения наблюдается у пар чугун – бронза при введении 0,1 % серпентинита в моторное масло при скоростях 8,8 и 26,4 м/мин.

Из полученных результатов было отмечено, что моторное масло с 0,1 % серпентинита оказался более предпочтительней при малых контактных нагрузках, чем масло с 0,05 % серпентинита.

Как из видно из представленных результатов (табл. 4.4 – 4.6) введение серпентинита в моторное масло приводит к снижению интенсивности изнашивания.

Из представленной табл. 4.4 следует, что смазочный материал с 0,1 % серпентинита снижает интенсивность изнашивания пар трения сталь – бронза при нагрузках 150 – 450 Н.

Таблица 4.3 – Экспериментальные значения коэффициента трения при нагрузке 450 Н для каждой исследуемой композиции в диапазоне скорости от 4,4 до 26,4 м/мин

Пара трения	Скорость, м/мин	Коэффициент трения (моторное масло)	Коэффициент трения (моторное масло + 0,05% серпентинита)	Коэффициент трения (моторное масло + 0,1% серпентинита)
Сталь – бронза	4,4	0,08	0,08	0,1
	8,8	0,09	0,09	0,08
	26,4	0,04	0,09	0,03
Сталь – чугун	4,4	0,07	0,04	0,15
	8,8	0,03	0,03	0,04
	26,4	0,04	0,1	0,14
Чугун – бронза	4,4	0,05	0,09	0,1
	8,8	0,11	0,18	0,05
	26,4	0,06	0,04	0,04

Также наблюдается снижение интенсивности изнашивания пар трения сталь – чугун и чугун – бронза при введении 0,1 % серпентинита в масло в среднем в 2,5 раза.

Таблица 4.4 – Экспериментальные значения интенсивности изнашивания пары трения сталь – бронза при скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Скорость, м/мин	Интенсивность изнашивания, для масла, мкм/км	Интенсивность изнашивания, для масла с 0,05 % серпентинитом, мкм/км	Интенсивность изнашивания, для масла с 0,1 % серпентинитом, мкм/км
$N = 150 \text{ Н}$			

4,4	0,023	0,055	0
8,8	0,014	0,014	0,012
26,4	0,0063	0,0005	0,0005
<i>N</i> = 300 Н			
4,4	0,032	0	0,018
8,8	0,042	0,04	0,0023
26,4	0,0013	0,002	0,0013
<i>N</i> = 450 Н			
4,4	0,018	0,039	0
8,8	0,023	0,013	0,006
26,4	0,0058	0,015	0,0056

Таблица 4.5 – Экспериментальные значения интенсивности изнашивания пары трения сталь – чугун при скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Скорость, м/мин	Интенсивность изнашивания, для масла, мкм/км	Интенсивность изнашивания, для масла с 0,05 % серпентинитом, мкм/км	Интенсивность изнашивания, для масла с 0,1 % серпентинитом, мкм/км
<i>N</i> = 150 Н			
4,4	0,026	0,058	0,018
8,8	0,0015	0,011	0,006
26,4	0,0025	0,0043	0,0013
<i>N</i> = 300 Н			
4,4	0,0076	0	0
8,8	0,0038	0,0038	0
26,4	0,0005	0	0

$N = 450 \text{ Н}$			
4,4	0	0,0045	0
8,8	0	0,0038	0,0023
26,4	0,0033	0,0013	0,0023

Таблица 4.6 – Экспериментальные значения интенсивности изнашивания пары трения чугун – бронза при скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Скорость, м/мин	Интенсивность изнашивания, для масла, мкм/км	Интенсивность изнашивания, для масла с 0,05 % серпентинитом, мкм/км	Интенсивность изнашивания, для масла с 0,1 % серпентинитом, мкм/км
$N = 150 \text{ Н}$			
4,4	0,035	0,076	0,0076
8,8	0,012	0,005	0,0023
26,4	0,002	0,0025	0,0013
$N = 300 \text{ Н}$			
4,4	0,023	0,023	0,029
8,8	0,015	0,011	0,017
26,4	0,0056	0,012	0,0005
$N = 450 \text{ Н}$			
4,4	0,068	0,018	0,014
8,8	0,033	0,0099	0,003
26,4	0,0075	0,005	0,005

При этом видно, что смазочный материал с 0,05 % серпентинита практически не влияет на значения интенсивности изнашивания пар трения сталь – бронза, сталь – чугун и чугун – бронза, а в некоторых местах даже увеличивал его значение.

Таблица 4.7 – Экспериментальные значения температуры смазочного слоя при нагрузке 150 Н и скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Пара трения	Скорость, м/мин	Температура (моторное масло), °C	Температура (моторное масло + 0,05 % серпентинита), °C	Температура (моторное масло + 0,1 % серпентинита), °C
Сталь – бронза	4,4	24,3	24,5	23,4
	8,8	31	31,8	21,9
	26,4	32,7	41,0	29,8
Сталь – чугун	4,4	25	26,3	23
	8,8	30,9	25,3	23
	26,4	33,8	36,4	32,6
Чугун – бронза	4,4	26,7	23	23
	8,8	29,6	23	23
	26,4	25,2	37,5	29,9

Из результатов опытных данных (табл. 4.7 – 4.9) видно, что при введении серпентинита в моторное масло температура смазочного слоя имеет тенденцию к снижению при различных нагрузках и скоростях.

Смазочная композиция с 0,1 % серпентинита снижает температуру смазочного слоя примерно на 8 % при нагрузке 150 Н, в отличие от смазочной композиции с 0,05 % серпентинита (табл. 4.7).

Из представленной табл. 4.8 и 4.9 следует, что добавка серпентинита в масло снижает температуру смазочного слоя примерно на 9 % при нагрузке 300 Н. Однако

в паре трения чугун – бронза при скорости 26,4 м/мин температура смазочного слоя повышается (табл. 4.9).

Таблица 4.8 – Экспериментальные значения температуры смазочного слоя при нагрузке 300 Н и скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Пара трения	Скорость, м/мин	Температура (моторное масло), °C	Температура (моторное масло + 0,05 % серпентинита), °C	Температура (моторное масло + 0,1 % серпентинита), °C
Сталь – бронза	4,4	37,4	24,0	29,8
	8,8	41,3	25,6	24,1
	26,4	59,5	50,1	41,9
Сталь – чугун	4,4	34,3	32,7	23,9
	8,8	44	36,2	25,5
	26,4	63,4	58,8	78,0
Чугун – бронза	4,4	28,6	23,5	23,7
	8,8	35,5	24,6	24,2
	26,4	40,9	55,2	46,2

Таблица 4.9 – Экспериментальные значения температуры смазочного слоя при нагрузке 450 Н и скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Пара трения	Скорость, м/мин	Температура (моторное масло), °C	Температура (моторное масло + 0,05 % серпентинита), °C	Температура (моторное масло + 0,1 % серпентинита), °C

Сталь – бронза	4,4	37,2	26,9	25,7
	8,8	53,1	28,6	26,5
	26,4	66,9	72,3	65,8
Сталь – чугун	4,4	47,6	45,2	29,1
	8,8	63,9	48,2	29,2
	26,4	87,3	77,9	83,2
Чугун – бронза	4,4	50,9	23	27,4
	8,8	42,7	23,8	27,8
	26,4	48,1	73,2	62,7

Установлено, что введение в 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.

Учитывая все полученные данные испытаний, можно заключить, что трибологические свойства моторного масла с 0,1 % серпентинита значительно выше трибологических свойств моторного масла с 0,05 % серпентинитом [115 – 119].

4.2 Определение влияния шунгита на коэффициент трения и температуру смазочного слоя

Для определения температуры смазочного слоя и коэффициента трения были проведены испытания на машине трения УМТ – 1, результаты которых представлены в табл. 4.10 – 4.11. В качестве смазочных композиций применялось: моторное масло и моторное масло с 0,05 % шунгита.

Частота вращения образцов составляла 50, 100, 300 об/мин при продолжительности одного испытания равной $t = 15$ мин при нормальной нагрузке N соответствующей 150 и 450 Н.

Анализируя представленную табл. 4.10 необходимо отметить, что введение шунгита в моторное масло приводит к снижению коэффициента трения в среднем на 9 % и температуры смазочного слоя на 3 % при нагрузке 150 Н.

Из представленной табл. 4.11 видно, что введение шунгита в масло не влияет на коэффициент трения и температуру смазочного слоя, а в некоторых случаях даже увеличивает их значение.

Установлено, что введение шунгита в моторное масло снижает коэффициент трения и температуру смазочного слоя при малых контактных нагрузках.

Таблица 4.10 – Экспериментальные значения коэффициента трения и температуры смазочного слоя при нагрузке 150 Н и скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Пара трения	Скорость, м/мин	Коэффициент трения		Температура смазочного слоя, °С	
		Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % шунгита	Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % шунгита
Бронза – чугун	4,4	0,057	0,052	20,4	20
	8,8	0,048	0,046	21,4	20,8
	26,4	0,056	0,057	23,8	24,5
Сталь – чугун	4,4	0,06	0,055	22	21,8
	8,8	0,083	0,072	23,4	23
	26,4	0,09	0,089	25,6	24,6
Сталь – бронза	4,4	0,073	0,067	22,8	22
	8,8	0,053	0,049	23	22,8
	26,4	0,07	0,065	28,6	27

Таблица 4.11 – Экспериментальные значения коэффициента трения и температуры смазочного слоя при нагрузке 450 Н и скоростях 4,4; 8,8 и 26,4 м/мин для каждой исследуемой композиции

Пара трения	Скорость, м/мин	Коэффициент трения		Температура смазочного слоя, °С	
		Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % шунгита	Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % шунгита
Бронза – чугун	4,4	0,05	0,058	20,5	23,3
	8,8	0,046	0,06	23,8	26,3
	26,4	0,057	0,063	26,3	27,646
Сталь – чугун	4,4	0,056	0,059	22,3	21
	8,8	0,05	0,057	24,3	23,8
	26,4	0,057	0,059	26	27
Сталь – бронза	4,4	0,054	0,053	21,8	22,8
	8,8	0,051	0,057	24,8	25,5
	26,4	0,063	0,052	29	32,2

4.3 Определение влияния фуллерена C₆₀ на трибологические свойства моторного масла

В процессе исследований измеряли момент трения и температуру смазочного слоя для различных смазочных композиций. Смазочная композиция состояла из моторного масла с различными концентрациями фуллерена C₆₀. Концентрация фуллеренов в масле варьировалась в диапазоне от 0,2 до 2% по массе смазочного масла.

Исследования проводили на машине трения УМТ – 1 с образцами выполненных из стали 30ХГСА при скорости 1,5 м/с и нагрузках 80 и 200 Н. Продолжительность испытаний каждой пары трения составляла 15 мин.

С ростом концентрации фуллерена C_{60} и нагрузкой 80 Н момент трения снижается в 2,6 раз (рис. 4.1). При концентрации 0,2 % C_{60} момент трения достигает 0,14 Н·м; при 0,8 % момент трения достигает 0,128 Н·м; при 1 % момент трения достигает 0,12 Н·м; при 1,5 % момент трения достигает 0,112 Н·м; при 2 % момент трения достигает 0,092 Н·м.

Отметим, что при нагрузке 200 Н наблюдается снижение момента трения с увеличением концентрации фуллерена в моторном масле. При этом максимальное значение момента трения и его минимальное значение для нагрузки 200 Н отличаются в 4 раза.

Следует отметить, тенденцию снижения коэффициента трения с ростом нагрузки (рис. 4.2). При увеличении концентрации фуллерена в масле от 0,2 % до 2 % коэффициент трения варьируется от 0,225 до 0,09 при нагрузке 80 Н соответственно, от 0,04 до 0,02 при нагрузке 200 Н соответственно.

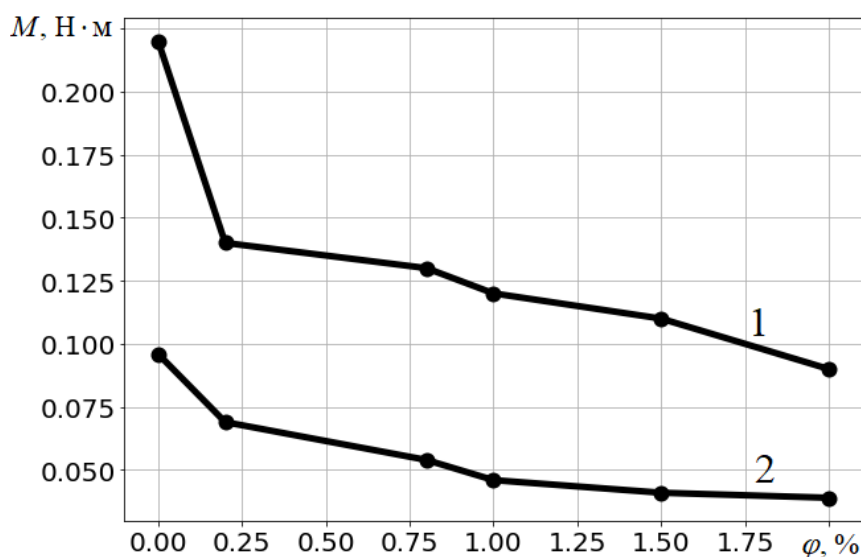


Рисунок – 4.1. Зависимость момента трения от концентрации фуллеренов:

1 – N = 80 Н, 2 – N = 200Н

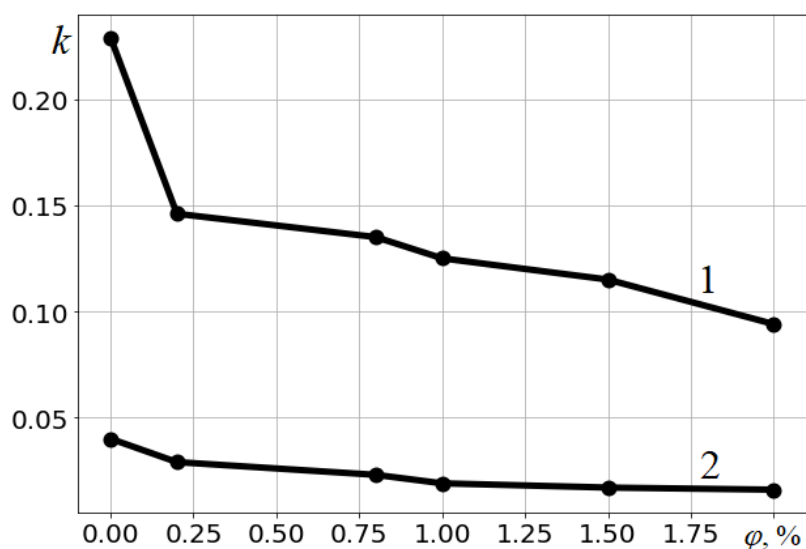


Рисунок – 4.2. Зависимость коэффициент трения от концентрации фуллеренов:

1 – N = 80 Н, 2 – N = 200Н

Зависимость температуры смазочного слоя от концентрации фуллерена в моторном масле показана на рис. 4.3.

Следует отметить, что при анализе представленной зависимости добавка фуллерена в моторное масло снизило температуру смазочного слоя в диапазоне исследованных концентраций.

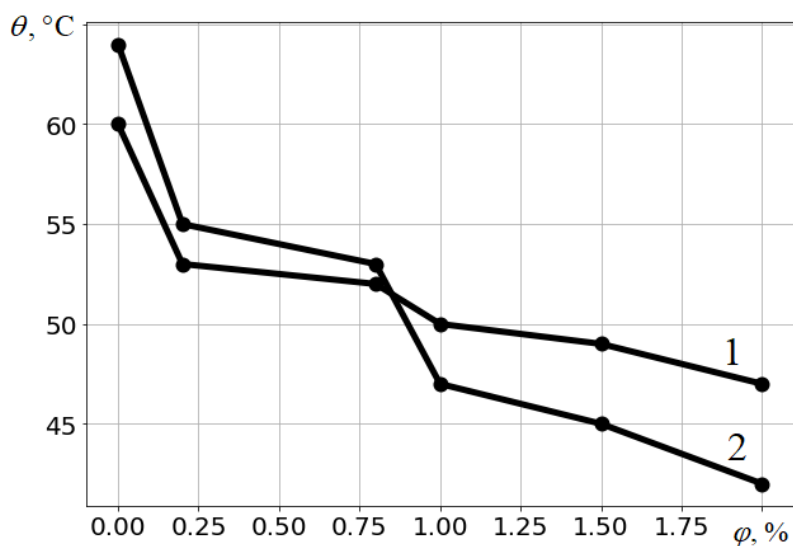


Рисунок – 4.3. Зависимость температуры смазочного слоя от концентрации фуллеренов:

1 – N = 80 Н, 2 – N = 200Н

Проведенные эксперименты показывают, что увеличение концентрации фуллерена приводит к снижению температуры смазочного слоя. При этом температура в зоне контакта снизилась в среднем на 18 °С по сравнению с моторным маслом [120,121].

Результаты экспериментов смазочных композиций, состоящих из моторного масла и фуллеренов, подтверждают определяющую роль смазочного материала и его индивидуальных противоизносных свойств.

На рис. 4.4 показаны результаты экспериментальных исследований в виде диаграммы Герси – Штрибека при различных смазочных композициях: масло, масло + 0,2 % C_{60} , масло + 2 % C_{60} . Рост концентрации фуллерена в моторном масле приводит к снижению коэффициента трения в среднем в 1,9 раз.

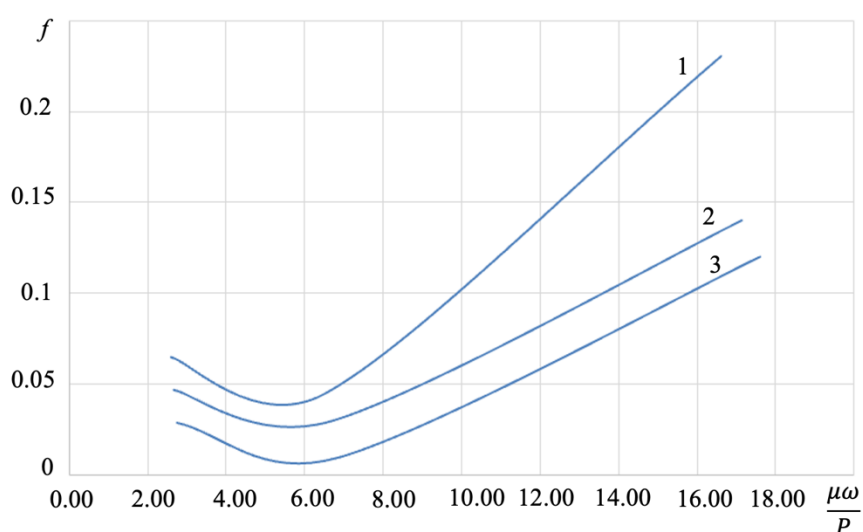


Рисунок – 4.4. Диаграмма Герси – Штрибека при смазке контактирующих тел исследуемым маслом с добавлением C_{60} : 1 –масло, 2 – масло + 0,2 % C_{60} , 3 – масло + 2 % C_{60} .

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

Выводы по главе 4:

1. Исследовано влияние серпентинита на триботехнические характеристики полусинтетического масла SAE 10W – 40. Получены результаты изменения коэффициента трения, интенсивности изнашивания и температуры смазочного слоя при изменении концентрации серпентинита в диапазоне скоростей от 4,4 до 26,4 м/мин и нагрузок от 150 до 450 Н. Анализ результатов показал, что введение 0,1 % серпентинита снижает коэффициент трения на 26%, интенсивность изнашивания на 60% и температуры смазочной среды на 9% при малых контактных нагрузках.
2. Установлено влияние шунгита в смазочном масле на коэффициент трения

и температуру смазочного слоя. Показано, что при малых контактных нагрузках происходит уменьшение температуры на 3 % и коэффициента трения на 9 %.

3. Показано влияние фуллеренов на антифрикционные и температурные свойства масла. Получены результаты изменения момента трения, коэффициента трения и температуры смазочного слоя при изменении концентрации фуллеренов (от 0,2 до 2 %) в диапазоне нагрузок от 80 до 200 Н. На основании результатов установлено, что рост концентрации фуллерена C_{60} снизил коэффициент трения в 3 раза и температуру в зоне контакта в 1,4 раза.
4. Анализ полученных результатов в виде диаграммы Герси – Штрибека показал возможность повышения антифрикционных свойств моторного масла при трении в режиме гидродинамической и смешанной смазки в 1,9 раз. Указанная картина справедлива если снижение коэффициента трения достигается за счет введения фуллерена C_{60} с концентрацией 0,2% и 2%.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОДОБАВКАМИ

В данной главе приведены результаты экспериментальных испытаний осадки заготовки со смазочными материалами, состоящие из моторного масла и углеродных нанодобавок. Осадка была реализована на автоматизированном лабораторном комплексе «Компьютеризированный пресс с ЧПУ» ОМД – 1 ЧПУ РТУ/МИРЭА. В качестве углеродных нанодобавок использовались фуллерен C_{60} и углеродные нанотрубки. Были проведены исследования влияния высоких температур на антифрикционные свойства масла с добавлением фуллерена и углеродных нанотрубок на маслоиспытательной машине КТ – 2.

5.1. Определение влияния фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок на трибологические свойства моторного масла при осадке

Экспериментальные испытания осадки заготовки со смазочными материалами, содержащие фуллерен C_{60} и углеродные нанотрубки были реализованы 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.

Цилиндрические заготовки при осадке расплющивались в тонкие диски (рис. 5.1 и 5.2).

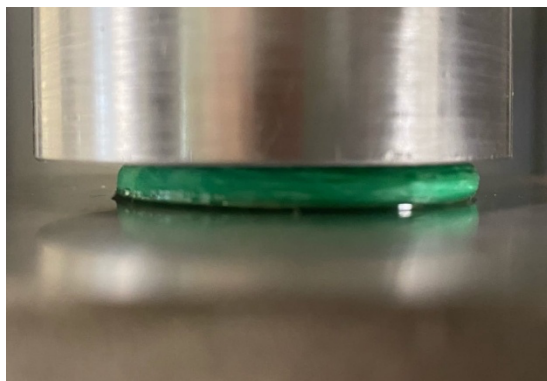


Рисунок – 5.1. Цилиндрическая заготовка после процесса осадки

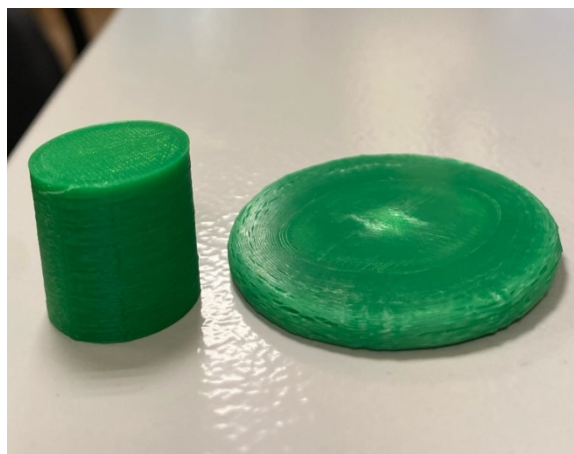


Рисунок – 5.2. Цилиндрические заготовки до и после процесса осадки

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

Диаграмма процесса осадки цилиндра без смазочного материала представлена на рис. 5.3.

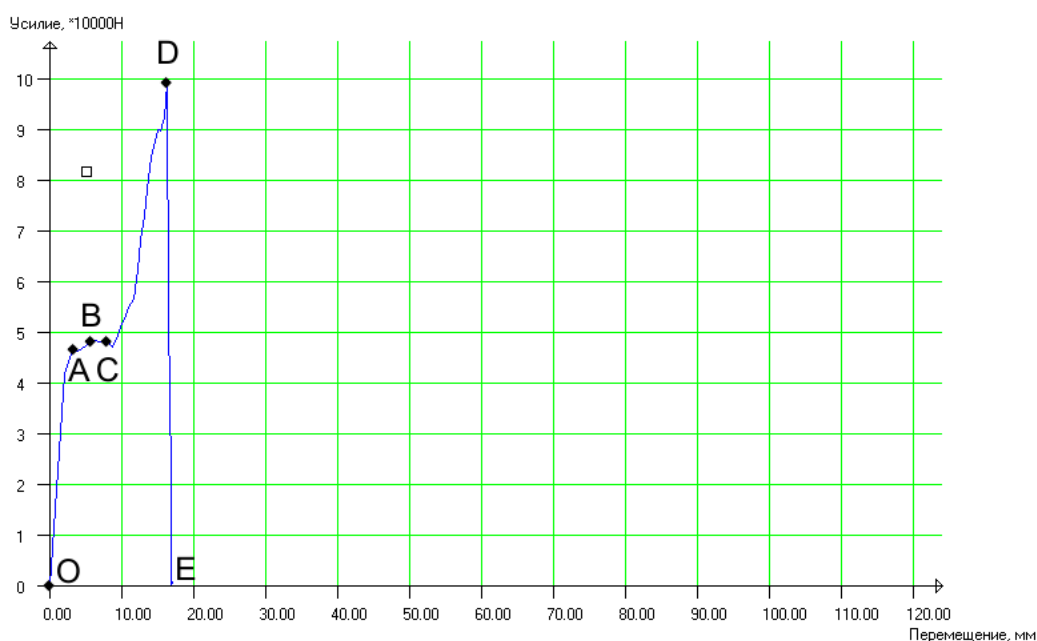


Рисунок – 5.3. Зависимость усилия от перемещения без смазочного материала

Из него следует, что на участке ОА выполняется закон Гука. На этом участке действуют упругие деформации, после снятия нагрузки деформация полностью исчезает. На участке АВ нарушается закон Гука, зависимость между силой и изменением высоты образца становится нелинейной. Заготовка теряет упругие свойства – способность вернуться к исходным размерам. Горизонтальный участок ВС называется площадкой текучести, образец сильно деформируется при постоянной

нагрузке. СД – участок упрочнения. Диаметр образца значительно увеличивается, а высота уменьшается. Участок ДЕ соответствует прекращению испытания, т.к. напряженно – деформированное состояние в образце неоднородное и неодноосное.

Вид диаграммы различен для смазочных материалов с различной концентрацией фуллеренов и углеродных нанотрубок. Сопротивление заготовки снижается в результате влияния смазки с фуллеренами и углеродными нанотрубками на тангенциальное трение между заготовкой и инструментом (рис. 5.4 – 5.5).

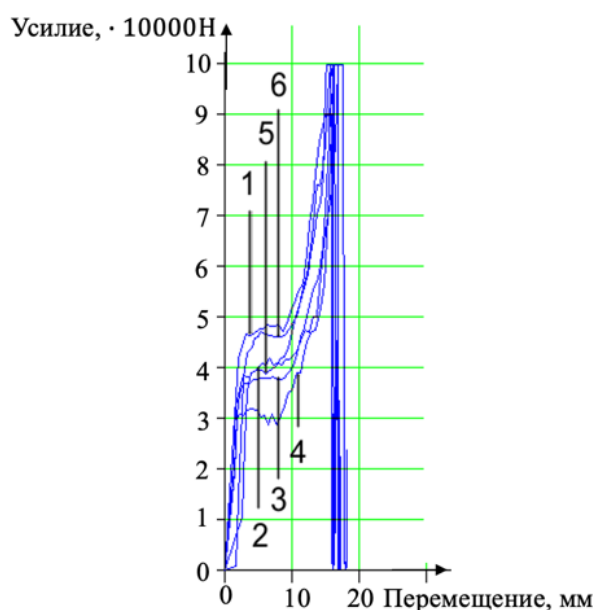


Рисунок – 5.4. Зависимость усилия от перемещения в присутствии различных смазочных материалов: 1 – без смазочного материала, 2 – моторное масло, 3 – моторное масло + 0,1 % C₆₀, 4 – моторное масло + 0,2 % C₆₀, 5 – моторное масло + 1 % C₆₀, 6 – моторное масло + 2% C₆₀

В результате действия сил трения цилиндрическая заготовка при процессе осадки приобретает бочкообразную форму. Показатель бочкообразности δ оценивался по формуле:

$$\delta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max}},$$

где $D_{\max}$ - максимальный диаметр образца, $D_{\min}$ - минимальный диаметр образца.

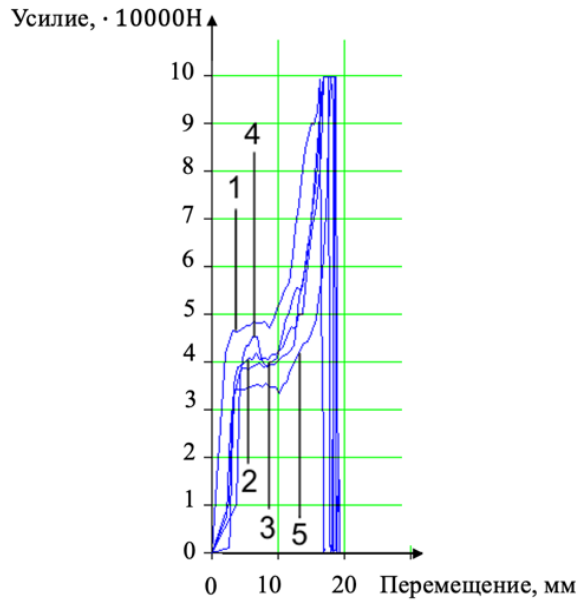


Рисунок – 5.5. Зависимость усилия от перемещения для испытанных смазочных материалов: 1 – без смазочного материала, 2 – моторное масло, 3 – моторное масло + 0,1 % углеродные нанотрубки, 4 – моторное масло + 0,2 % углеродные нанотрубки, 5 – моторное масло + 1 % углеродные нанотрубки

Коэффициент трения f определялся по формуле:

$$f = 6,25 \left(\frac{1 - \delta}{1 + \varepsilon} \right) \left(\frac{d_0}{h_0} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где ε - степень деформации.



Рисунок – 5.6. Среднее значение расчетного коэффициента трения: А – без смазочного материала, В – моторное масло, С – моторное масло + 0,1 % C_{60} , D – моторное масло + 0,2 % C_{60} , E – моторное масло + 1 % C_{60} , F – моторное масло + 2% C_{60} , G – моторное масло + 0,1 % УНТ, H – моторное масло + 0,2 % УНТ, I – моторное масло + 1 % УНТ

Таким образом, в результате проведённых испытаний было выявлено, что в процессе осадки введение углеродных нанодобавок снижает коэффициент трения, что отражено на представленной диаграмме (рис. 5.6).

Установлено, что углеродные нанодобавки повышают антифрикционные свойства моторного масла.

Наибольшее влияние на коэффициент трения при осадке, снизив его на 18 %, показали масло с 1 % – ым содержанием УНТ и масло с 2 % – ым содержанием C_{60} .

5.2. Определение влияния фуллеренов и углеродных нанотрубок на антифрикционные свойства моторного масла

Данный раздел посвящен исследованию влияния фуллеренов и углеродных нанотрубок на антифрикционные свойства моторного масла. На маслоиспытательной машине КТ – 2 температурным методом испытали три смазочных материала: масло, масло + 2 % фуллерена C_{60} , масло + 1 % углеродных нанотрубок.

Согласно ГОСТу 23.221 – 84, на графике приведены средние значения коэффициента трения f по трем испытаниям для каждого сравниваемого состава.

Отметим, что исследуемые смазочные материалы имеют схожую динамику изменения коэффициента трения и температуры.

В результате проведенных экспериментальных исследований (рис. 5.7) 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.

Исходя из анализа данных (рис. 5.7), при введении C_{60} и углеродных нанотрубок в масло наблюдался рост критической температуры смазочного слоя на 10 и 20 °С соответственно.

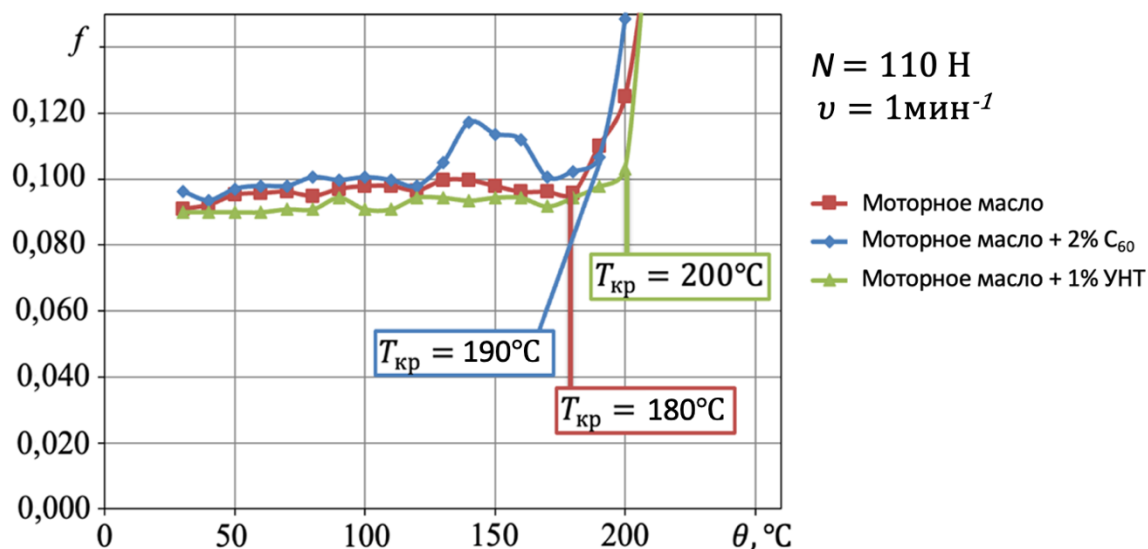


Рисунок – 5.7. Зависимость среднего значения коэффициента трения от температуры

Выводы по главе 5:

1. Установлено, что при осадке заготовки повышаются антифрикционные свойства легированного масла на $\sim 18\%$. Влияние фуллерена C_{60} и углеродных нанотрубок проявляются в снижении тангенциального трения между заготовкой и инструментом и как следствие уменьшают силу осадки.
2. Испытанные смазочные материалы с добавлением фуллеренов и углеродных нанотрубок показали аналогичный характер изменения коэффициента трения от температуры и повысили критическую температуру на $10 - 20 ^\circ\text{C}$ до наступления деструкции граничного слоя и резкого возрастания коэффициента трения.

ГЛАВА 6. СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Используя математические модели, представленные в главе 2 данной работы, приведены данные теоретических расчетов и экспериментальных данных. Процентное расхождение данных представим в виде табл. 6.1 – 6.6.

В табл. 6.1 – 6.6 буквой *а* отмечены температуры, полученные опытными данными; буквой *б* температуры, рассчитанные математической моделью, построенной на основе модифицированного уравнения Рейнольдса с переменной вязкостью (гл. 2, раздел 2.3); буквой *в* температуры, рассчитанные моделью, построенной на основе уравнения Фурье (гл. 2, раздел 2.2); буквой *г* температуры, рассчитанной моделью, построенной на основе энергетического баланса трения (гл. 2, раздел 2.1). Опытные данные коэффициента трения сравнивали с теоретическими расчетами модели, основанной на теории гидродинамической смазки (гл. 2, раздел 2.3).

Сравнение данных при смазочной композиции с серпентинитом

Отличие расчетных от экспериментальных данных температуры смазочного слоя $\theta_{\text{ср}}$ с добавкой серпентинита и коэффициента трения $f_{\text{ср}}$ не превышает 15 %, что свидетельствует об адекватности математических моделей (табл. 6.1 и 6.2).

Таблица 6.1 – Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов температуры смазочного слоя с добавлением серпентинита в диапазоне нагрузок от 150 до 450 Н

Смазочные композиции	Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % серпентинита	Моторное масло + 0,1 % серпентинита
$N, \text{ Н}$	150Н/300Н/450Н		
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$ (<i>а</i>)	27/39,4/42,1	28,3/37,3/38,5	24,5/38,1/32,1
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	28,1/40/44,1	29/37,8/39,3	25/39/34

(б)			
Расхождение, %	4/1/4	2/1/2	2/2/5
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	26,8/39/41,7	28/37,1/38,2	24/37,6/31,4
(в)			
Расхождение, %	0/1/0	1/0/0	2/1/2
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	25/38,6/41,4	27,7/36,3/37,8	23/37,1/31,3
(з)			
Расхождение, %	8/2/1	2/2/1	6/2/2

Таблица 6.2 – Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов коэффициента трения с добавлением серпентинита в диапазоне нагрузок от 150 до 450 Н

Смазочные композиции	Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % серпентинита	Моторное масло + 0,1 % серпентинита
N, H	150Н/300Н/450Н		
$f_{\text{ср}}$	0,19/0,08/0,06	0,14/0,08/0,08	0,13/0,09/0,07
$f_{\text{ср}}$	0,21/0,07/0,06	0,15/0,07/0,08	0,15/0,08/0,06
(б)			
Расхождение, %	10/14/0	7/14/0	15/12/15

Сравнение данных при смазочной композиции с шунгитом

Анализ табл. 6.3 – 6.4 показал, что сравнение экспериментальных и расчетных данных температуры смазочного слоя с добавкой шунгита составила не более 4 %, а

коэффициента трения не более 5 % при изменении нагрузки от 150 до 450 Н и скорости от 4,4 м/мин до 26,4 м/мин.

Таблица 6.3 – Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов температуры смазочного слоя с добавлением шунгита в диапазоне нагрузок от 150 до 450 Н

Смазочные композиции	Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % шунгита
$N, Н$	150Н/450Н	
$\theta_{cp}, ^\circ C$ (a)	23,2/24,9	22,8/25,2
$\theta_{cp}, ^\circ C$ (б)	23,8/25,2	23/25,7
Расхождение, %	2,5/1,2	0/1,9
$\theta_{cp}, ^\circ C$ (в)	23/24,5	22,3/25
Расхождение, %	0/1,6	2,2/0
$\theta_{cp}, ^\circ C$ (г)	22,3/24	21,8/24,4
Расхождение, %	4/3,8	4,5/3,2

Таблица 6.4 – Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов коэффициента трения с добавлением шунгита в диапазоне нагрузок от 150 до 450 Н

Смазочные композиции	Моторное масло	Моторное масло + 0,05 % шунгита
$N, Н$	150Н/450Н	
f_{cp}	0,065/0,055	0,061/0,058

$f_{\text{ср}}$ (б)	0,068/0,054	0,063/0,058
Расхождение, %	4,6/1,8	3,3/0

Сравнение данных при смазочной композиции с фуллереном

В табл. 6.5 и 6.6 приведены данные теоретических и экспериментальных расчетов момента трения и температуры смазочного слоя при скорости 1,5 м/с и нагрузках 80 и 200 Н. Концентрация фуллеренов в смазочном слое изменялась в диапазоне от 0,2 до 2 %.

Графические зависимости опытных и теоретических данных момента трения от концентрации фуллеренов в моторном масле при различной нагрузке показаны на рис. 6.1. Отличие этих данных показало хорошую корреляцию. Значения экспериментальных данных отличаются от теоретических не более чем на 16%.

Таблица 6.5 – Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов момента трения при смазочной композиции с концентрацией фуллеренов в диапазоне от 0,2 до 2 %

Концентрация фуллеренов, %	0	0,2	0,8	1	1,5	2
Линейная скорость, м/с	1,5					
Нагрузка, Н	80					
Момент трения, Н·м (а)	0,22	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09
Момент трения, Н·м (б)	0,28	0,19	0,18	0,17	0,15	0,13
Расхождение, %	11	16	15	16	16	16
Нагрузка, Н	200					
Момент трения, Н·м (а)	0,096	0,069	0,054	0,046	0,041	0,04

Момент трения, Н·м (δ)	0,09	0,072	0,06	0,052	0,047	0,04
Расхождение, %	6	4	10	12	13	0

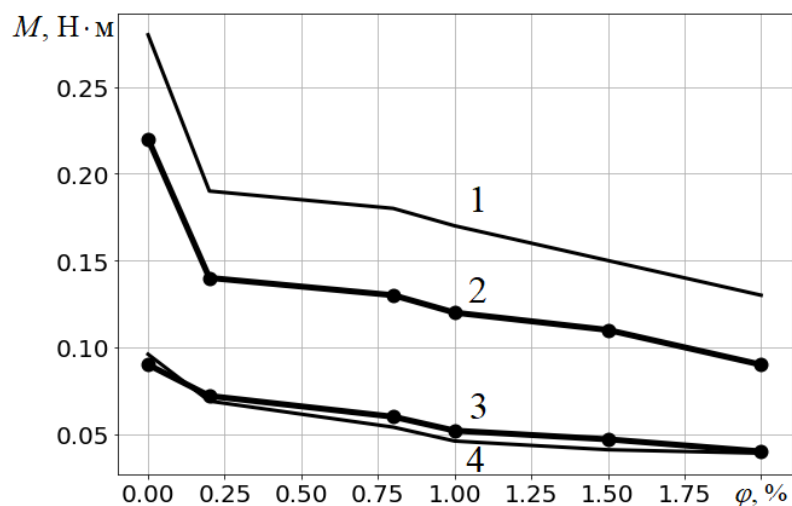


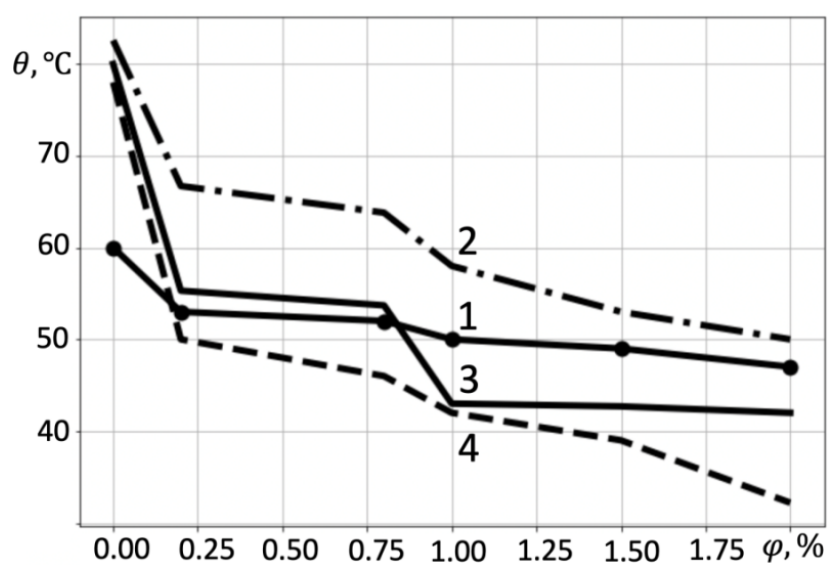
Рисунок – 6.1. Зависимость момента трения от концентрации фуллеренов: 1 – теоретические данные при нагрузке 80 Н, 2 – экспериментальные данные при нагрузке 80 Н, 3 – экспериментальные данные при нагрузке 200 Н, 4 – теоретические данные при нагрузке 200 Н

Зависимости опытных и теоретических данных температуры смазочного слоя от концентрации фуллеренов в моторном масле при нагрузках 80 и 200 Н приведены на рис. 6.2. Значения данных отличаются друг от друга не более чем на 20%.

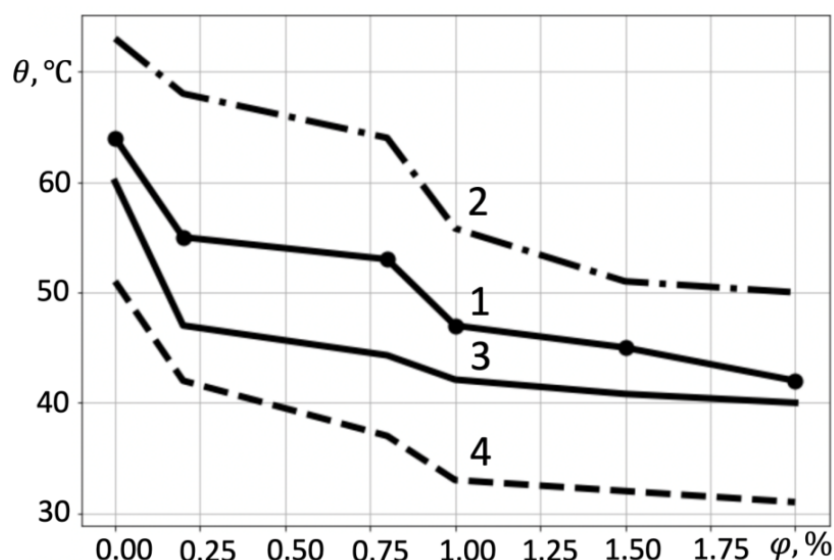
Таблица 6.6 – Сравнение экспериментальных и теоретических расчетов температуры смазочного слоя с фуллеренами

Концентрация фуллеренов, %	0	0,2	0,8	1	1,5	2
Линейная скорость, м/с	1,5					
Нагрузка, Н	80					
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$ (a)	60	53	52	50	49	47
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$ (z)	78	50	46	42	39	32,2
Расхождение, %	13	5	11	16	20	17
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	82,58	66,7	63,8	58	53	50

(б)						
Расхождение, %	18	19	22	16	7	6
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	80	55,3	53,7	43	42,7	42
(в)						
Расхождение, %	20	4	1	14	13	10
Нагрузка, Н	200					
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	64	55	53	47	45	42
(а)						
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	51	42	47	43	41	38
(з)						
Расхождение, %	18	20	17	10	3	13
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	73	68	64	55,8	51	50
(б)						
Расхождение, %	12	19	17	18	13	16
$\theta_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	60	47	44,3	42,1	40,8	40
(в)						
Расхождение, %	6	14	16	10	9	4



a



б

Рисунок – 6.2. Зависимость температуры смазочного слоя от концентрации фуллеренов (а – нагрузка 80 Н, б – нагрузка 200 Н): 1 – экспериментальные данные;

2 – температуры, рассчитанные математической моделью, построенной на основе модифицированного уравнения Рейнольдса с переменной вязкостью; 3 - температуры, рассчитанные моделью, построенной на основе уравнения Фурье; 4 – теоретические данные, рассчитанные моделью, построенной на основе энергетического баланса трения.

Выводы по главе 6:

1. В результате сравнения экспериментальных и теоретических данных температуры смазочного слоя и коэффициента трения при использовании смазочных материалов, включающих микро-/нанодобавки (а именно: серпентинит, шунгит и фуллерен), разработанные математические модели показали хорошую сходимость. Отличие между опытными данными и теоретическими расчетами составило в среднем не более 13 %, что свидетельствует об адекватности математических моделей.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в дисциплину «Технологическое обеспечение качества изделий» и проведению подготовки специалистов в рамках магистратуры по направлению 15.04.01 «Машиностроение» в МИРЭА – Российский технологический университет (приложение Б).

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 нанодобавки: 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 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 $\sim 26\%$, интенсивность изнашивания на $\sim 60\%$ и температуру смазочной среды на $\sim 9\%$ 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 $\sim 18\%$. 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 $10 - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до резкого возрастания коэффициента трения.

8. Верификация разработанных моделей подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Благодарности:

Автор работы выражает благодарность своему научному руководителю д.т.н. проф. Албагачиеву А.Ю. за мудрое руководство и предоставление большой свободы при постановке целей, выборе методов, а также за помощь в анализе полученных данных и за предоставленные возможности учиться у специалистов. Отдельную благодарность автор выражает д.т.н., проф. Буяновскому И.А.; к.т.н. Усову П.П.; н.с. Михееву А.В. и к.т.н. Самусенко В.Д. Автор выражает искреннюю благодарность мужу, родителям, брату и сестрам за понимание и поддержку на всех этапах работы над диссертацией.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Полюшкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие / Н.Г. Полюшкин // Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск. – 2013. – 192 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов – М.: Изд – во МСХА, 2001. – 616 с.
3. Гнатченко И.И. Автомобильные масла и присадки: Справочное пособие / И.И. Гнатченко, В.А. Бородин, В.Р. Репников – СПб: Изд – во Полигон, 2000. – 360 с.
4. Погодаев Л.И. Повышение надёжности трибосопряжений / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин, П.П. Дудко – СПб: академия транспорта Российской Федерации, 2001. – 304с.
5. Радин Ю.А. Безызносность деталей машин при трении / Ю.А. Радин, П.Г. Суслов – Л.: Машиностроение, 1974. – 258 с.
6. Патент СССР №639040 С10М63/00 Фришберг М.В., Кишкопаров Н.В., Субботина О.Ю., Латош Н.И. Металлоплакирующий смазочный концентрат для ДВС // Патент СССР №639040 С10М63/00, 1991.
7. Харламов В.В. Влияние ультрадисперсного порошка сплава Cu-Sn на массоперенос при трении скольжения / В.В. Харламов, Л.В. Золотухина, И.В. Фришберг и др. // Трение и износ. – 1999. – №3(20). – С. 333 – 338.
8. Балтенас Р., Моторные масла / Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В.М. Шергалис – СПб.: Издательство Альфа – лаб. – 2000. – 272 с.
9. Задощенко Е.Г. Изучение влияния ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок / Е.Г. Задощенко, В.Э. Бурлакова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – №15(1). – С.85 – 92.
10. Петров В.М. Восстанавливающие антифрикционные препараты / В.М. Петров, А.Ю. Шабанов, Ю.В. Гончаренко — М.: Русэкотранс. — 2003. — 40 с.
11. Балабанов В.И. Безразборное восстановление трущихся «соединений автомобиля. Методы и средства. — М.: «Астрель. АСТ». — 2002. — 61 с.

12. Зуев В.В. Энергоплотность, свойства минералов и энергетическое строение Земли. — СПб.: Наука. — 1995. — 125 с.
13. Половинкин В.Н. Применение геомодификаторов трения для восстановления поверхностей узлов трения при эксплуатации. «СЛАВЯНТРИБО - 5. Наземная и аэрокосмическая трибология – 2000: проблемы и достижения» // В.Н. Половинкин, Ю.Г. Лавров, П.Б. Аратский // Материалы междунар. научн. - практ. Симпозиума. ВМПАВТО, РГТА. – СПб. – 2000. – С. 289 – 290.
14. Чулкин С.Г. Влияние геомодификаторов трения на приработку ответственных трибосопряжений / С.Г. Чулкин, В.М. Петров, П.Б. Аратский // Трение, износ, смазка. – 2001. – №3(3). – С. 78 – 93.
15. Мироненко И.Г. Влияние кондиционера металла «Феном» на триботехнические характеристики трущихся пар / И.Г. Мироненко, А.В. Кожевников, А.О. Токорев // Трение, износ, смазка. – 2002. – Вып. 12. – С. 15 – 22.
16. Половинкин В.Н. Антифрикционная противоизносная добавка в смазочные материалы минерального происхождения (геомодификатор трения) / В.Н. Половинкин, В.Б. Лянной, Ю.Г. Лавров // Трение, износ, смазка. – 1999. – №1(1). – С. 127–140.
17. Петров В.М. Влияние препарата «Форсан» на эксплуатационные параметры качества деталей ДВС / В.М. Петров, С.Г. Чулкин // ТИС. – №3(3). – 2001. С. 50 – 58.
18. Чулкин С.Г. Исследование влияния препарата «Форсан» на триботехнические характеристики пар трения из серого чугуна / С.Г. Чулкин, В.М. Петров // Триботехника на водном транспорте. Материалы симпозиума «Транстрибо - 2001». – СПб.: СПбГТУ. – 2001. – С. 83 – 86.
19. Чулкин С. Г. Триботехнические испытания препарата «Форсан» / С. Г. Чулкин, В.М. Петров // ТИС. – №2. – 2001. - С. 8, 57, 68, 130 – 135.
20. Половинкин В.Н. Применение геомодификаторов трения для восстановления изношенных поверхностей узлов трения при эксплуатации / В.Н. Половинкин, Ю.Г. Лавров, П.Б. Аратский // Материалы международного научно практич. Симпозиума «Славянтрибо – 5». – СПб. – 2000. – С. 289 – 291.

21. Патент № 2182268 С1, 06.08.2001 Стрелков С.М., Артемкин В.И., Постников В.А. и др. Способ без разборного обеспечения оптимальных зазоров в узлах трения // Патент № 2182268 С1. – 2001.
22. Виноградов В.Н. Механическое изнашивание сталей и сплавов. / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин – М.: Недра. – 1996.
23. Мироненко И.Г. Лабораторные исследования геомодификатора «Трибо» / И.Г. Мироненко, В.Б. Ломухин, А.Ф. Певнев и др. // Трение, износ, смазка. – 2002. – №4(4). – С.109 – 122.
24. Петров В.М. Применение модификаторов в узлах машин для решения триботехнических задач – СПб.: СПбГПУ. – 2004.
25. Погодаев Л.И. Повышение надёжности трибосопряжений / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин, П.П. Дудко – СПб.: академия транспорта Российской Федерации. – 2001. – 304 с.
26. Петров В.М. Восстанавливающие антифрикционные препараты / В.М. Петров, А.Ю. Шабанов, Ю.В. Гончаренко. — М.: Русэкотранс, 2003. — 40 с.
27. Буяновский И.А. Антифрикционная ресурсовосстанавливающая композиция присадок для пластичных смазок / И.А. Буяновский, Ю.Н. Дроздов, Ю.В. Гостев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2005. – № 7. – С. 34 – 36.
28. Кель А.В. Фуллерены и углеродные нанотрубки // Международный научный журнал «Инновационная наука» – 2016. – № 11(3). – С. 23 – 24.
29. Абрамишвили Г.С. Снижение влияния условий работы на питтинг деталей применением смазочного масла с высокодисперсным углеродом / Г.С. Абрамишвили, Д.С. Иосебидзе // Труды ГПИ. – Тбилиси. – 1985. – №15(297). – С. 46 – 48.
30. Иосебидзе Д.С. Новое трансмиссионное масло «Колхида» / Д.С. Иосебидзе, А.П. Чхеидзе, Г.С. Абрамишвили // Автомобильный транспорт. – 1985. – №1. – С. 24 – 25.
31. Керл Р.Ф. Фуллерены / Р.Ф. Керл, Р.Э. Смоли // В мире науки. – 1991 – №12. – С. 14 – 24.

32. Гинзбург Б.М. Влияние фуллерена C_{60} на характеристики трения и изнашивания стали / Б.М. Гинзбург, О.Ф. Киреенко, Д.Г. Точильников, В.П. Булатов // Письма в ЖТФ – 1995. – №21(22). – С. 62 – 66.

33. Гинзбург Б.М. Образование износостойкой структуры при трении скольжения стали по меди в присутствии фуллерена или фуллереновой сажи / Б.М. Гинзбург О.Ф. Киреенко, Д.Г. Точильников, В.П. Булатов // Письма в ЖТФ. – 1995. – №21(23). – С. 38 – 42.

34. Гинзбург Б.М. Влияние фуллерена C_{60} , фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжение металлов / Б.М. Гинзбург, М.В. Байдакова, О.Ф. Киреенко, Д.Г. Точильников, А.А. Шеппелевский // Журнал технической физики. – 2000. – №70(12). – С. 87 – 97.

35. Точильников Д.Г. Влияние C_{60} – содержащих присадок к смазочному маслу на оптимизацию процессов изнашивания при граничном трении металлов / Д.Г. Точильников, Б.М. Гинзбург // Журнал технической физики. – 1999. – № 69(6) – С. 102 – 105.

36. Яхьяев Н.Я. Новая смазочная композиция для модификации поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля / Н.Я. Яхьяев, Ж.Б. Бегов, Ш.Д. Батырмурзаев // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2009. – № 1. – С. 47—52.

37. Безмельницын, В.Н. Фуллерены в растворах / В.Н. Безмельницын, А.В. Елецкий, М.В. Окунь // Успехи физических наук. – №11. – 1998. – С. 1195 –1220.

38. Шпилевский Э.М. Вакуумное осаждение металл-фуллереновых пленок / Э.М. Шпилевский, Л.В. Баран, М.Э. Шпилевский // Материалы, технологии, инструменты. – 1998. №2(3). – 105 с.

39. Хмыль А.А. Свойства композиционных покрытий никель—фуллерен, осажденных электрохимическим способом / А.А. Хмыль, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.В. Шапчиц, М.Э. Шпилевский // Фуллерены и фуллереноподобные структуры. – Минск: БГУ. – 2000. – С. 83 – 90.

40. Шпилевский М. Э. Электролитическое осаждение никель-фуллереновых пленок / М. Э. Шпилевский, А.В. Шапчиц // Тез. докл. междунар. науч. конф.

«Магнитные материалы и их применение» (Минск, 30 сентября—2 октября 1998 г.).
– Минск. – 1998. – С. 179 –180.

41. Aleshin A.N. Fullerene Sci. and Technology. / A.N. Aleshin, Yu.F. Biryulin, N.B. Mironkov, L.V. Sharonova, E.N. Fadeeva, V.N. Zgonnik. – 1998. – №3(6). – P. 545 – 561.

42. Погодаев Л.И. Структурно – энергетические модели надёжности материалов и деталей машин / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин – СПб.: Академия транспорта Российской Федерации. – 2006. – 608 с.

43. Tachibana M. Temperature dependence of the microhardness of C₆₀ crystals // Physical Review B. – 1994. – №21(49). – P. 14945.

44. Tutt L. W. Optical limiting performance of C₆₀ and C₇₀ solutions / L.W. Tutt, A. Kost // Nature. – 1992. – № 6366(356). – P. 225 – 226.

45. Стельмах В.Ф. Структурные преобразования в фуллеренсодержащих полимерных слоях при ионной имплантации / В.Ф. Стельмах, Э.М. Шпилевский, В.Б. Оджаев // Тез. докл. междунар. симп. «Ионная имплантация в науке и технике» (Налэнчув, 22—24 января 1997 г.). – Люблин. – 1997. – 32 с.

46. Gupta B. K., Bhushan B. // Lubr. Engineering. – 1994. – №7(50). – P. 524 – 528.

47. Гинзбург Б.М. Образование защитной пленки на поверхности трения меди в присутствии фуллерена C₆₀ / Б.М. Гинзбург, О.Ф. Киреенко, М.В. Байдакова, В.А. Соловьев // ЖТФ. – 1999. – №11(69). – С. 113 – 116.

48. Шпилевский Э.М. Фуллерены - новые молекулы для новых материалов // Наука и инновации. – 2006. - № 5 (39).

49. Bhushan B. Coe Sublimed C₆₀ films for tribology / B. Bhushan, B.K. Gupta, Cleef Van, CappC, J.V. // Applied Physics Letters. – 1993. – №25(62). – P. 165, 3253 – 3255.

50. Gupta B.K Fullerene particles as an additive to liquid lubricants and greases for low friction and wear / B.K. Gupta, B. Bhushan // Lubrication Engineering. – 1994. – №7(50). – P. 524 – 528.

51. Гинзбург Б.М. и др. // ПЖТФ. – 1995. – №22(21) – С. 62 – 66.

52. Гинзбург Б.М. и др. // ПЖТФ. – 1995. – №23(21) – С. 35 – 38.

53. Bhushan B. Sublimed C₆₀ films for tribology / B.K. Gupta, G. W. Van Cleef, C. Capp, J. V. Cue // Tribol Trans. – 1993. – №4(36). – P. 574 – 580.
54. Цветков Ю.Н. Оценка влияния фуллереновых добавок на износостойкость и антифрикционные характеристики капролона / Ю.Н. Цветков, А.А. Татулян // Отчет о НИР ООО «ВМПАВТО». – 2006. – 58 с.
55. Федосов А.В. Повышение работоспособности металлорежущего оборудования за счет введения фуллероидных наномодификаторов в смазочные материалы: Автореф. дис. канд. техн. наук: – СПб. – 2006. – 22 с.
56. Sasaki N. Superlubricity of Graphene/C₆₀/Graphene Interface-Experiment and simulation / N. Sasaki, N. Itamura, H. Asawa, D. Tsuda, K. Miura // Japanese Society of Tribologists. – 2012. – №3(7).
57. Ruoff R.S. Solubility of fullerene C₆₀ in variety of solvents / R.S. Ruoff, D.S. Tse, M. Malhotra, D.C. Lorents // J. Phys. Chem. – 1993. – №13 (97). – P. 3379 – 3383.
58. Гиндзбург Б. М. Влияние фуллеренов C₆₀, фуллереновых саж и других углеродных материалов на граничное трение скольжение металлов / Б.М. Гиндзбург., М.В. Байдакова, О.Ф. Киреенко и др. // Журнал технической физики. – 2000. – №12(70). – С. 87—97.
59. Нечаева С.И. Механохимические превращения в композициях на основе полиамида и активного минерального наполнителя при трении / С.И. Нечаева, Ю.П. Топоров, В.В. Матвеев // Трение и износ. – 1994. – № 2(15). – С. 210 – 215.
60. Яхьяев Н. Я. Новая смазочная композиция для модификации поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля / Н. Я. Яхьяев, Ж. Б. Бегов, Ш. Д. Батырмурзаев // Вестник АГТУ. – 2009. - №1. – С. 251 – 255.
61. Gupta B.K. Fullerene particles as an additive to liquid lubricants and greases for low friction and wear / B.K. Gupta, B. Bhushan // Lubrication Engineering. – 1994. – №7(50). – P. 524 – 528.
62. Кускова Н.И. Триботехнические характеристики наноуглеродных материалов // Электронная обработка материалов. – 2006. – №6. – С. 50 – 56.

63. Жарова М.А. Техника и технологии трибологических исследований. Трибология и проблемы МЧС / М.А. Жарова, М.Н. Попова, Н.В. Усольцева, В.В. Терентьев // Тезисы докладов III Международного семинара. – Иваново: Иван. гос. ун-т. – 2012. – 66 с.
64. Якемсева М.В. Жидкие кристаллы и их практическое использование / М.В. Якемсева, Н.В. Усольцева, А.О. Гаврилова, Д.М. Васильев – 2012 – №1(39). – С. 82 – 87.
65. Терентьев В. Модификация пластичных смазочных материалов введение углеродного материала «Таунит - М» / В. Терентьев, В.Б. Лапшин, М.В. Якемсева, Н.В. Усольцева, О.Б. Аكوпова // Жидкие кристаллы и их практические использование. – 2013. – №2 – С. 73 – 79.
66. 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 наукоёмкие технологии. Региональные приложения. – 2021. – №4(68). – С. 63 – 68.
67. Ахвердиев, К. С. Гидродинамический расчет подшипников скольжения с учетом сил инерции смазочной жидкости, обладающей вязкоупругими свойствами / К. С. Ахвердиев, М. В. Яковлев, И. А. Журба // Трение и износ. – 2003. – № 2(24). – С. 121 – 126.
68. Буше Н.А. О способе оценки нагруженности радиальных подшипников скольжения / Н.А. Буше, С.М. Захаров // Трение и износ. – 1982.
69. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов – М.: Машиностроение. – 1999. – 329 с.
70. Орлов П. И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2. Под ред. П. Н. Ушаева. 3-е изд. – М.: Машиностроение. – 1988. – 544 с.
71. Захаров С.М. Нахождение, аппроксимация и области использования безразмерных характеристик / С.М. Захаров, И.А. Жаров // Трение и износ. – 1995. – № 1(16). – С. 12 – 28.

72. Пустынцев Е.Н. Расчет и проектирование подшипников скольжения. – М.: Машиноведение. – 1980.
73. Петров Н.П. Трение в машинах и влияние смазывающей жидкости / Н.П. Петров // Инж. журн. – 1934. – 102 с.
74. Петров Н.П. Трение в машинах / Н.П. Петров // Гидродин. теория смазки; Избр. работы. – 1948. – 84 с.
75. Крагельский И.В. Современные методы прогнозирования износа узлов трения / И.В. Крагельский, В.С. Комбалов, А.Р. Логинов и др. // Обзорная информация ГосИНТИ. – 1979. – №15. – 31 с.
76. Кревсун Э.П. Гидродинамические явления в паре трения торцового уплотнения // Трение и износ. – 1983. – №2(4). С. 232 – 237.
77. Крагельский И.В. Коэффициенты трения / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова // М.: Машгиз. – 1962. – 220 с.
78. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. // М.: Машгиз. – 1962. – 384 с.
79. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. // М.: Машиностроение. – 1968. – 480 с.
80. Гинзбург Б.М. / Б.М. Гинзбург, Д.Г. Точильников, В.П. Булатов // Трение и износ. – 1997. – №2(18). С. 235 – 239.
81. Furuham S. Measurement of piston frictional force in actual operating diesel engine / S. Furuham, M. Takiguchi // Int. Jalirb. Tribologie. – 1981. – №6. – P. 737 – 742.
82. Гинзбург Б.М. и др. // Трение и износ. – 1997. – №4(18). – С. 523 – 526.
83. Захаров С.М. Совместный расчет многоопорного коленчатого вала и подшипников скольжения / Захаров С.М. // Вестник машиностроения. – 1985. – №1. – С. 5 – 7.
84. Захаров С.М. Гидродинамический и тепловой расчет подшипников коленчатого вала поршневого двигателя / С.М. Захаров, В.Ф. Эрдман // Вестник машиностроения. – 1978. – №5. – С. 24-28.

85. Усов П.П. Численное решение первой упругодинамической задачи теории смазки цилиндрических тел конечной длины. – Машиноведение. – 1986. – №8. – С. 131 – 134.
86. Усов П.П. Определение зоны контакта и контактных напряжений при внутреннем соприкосновении цилиндрических тел. – Машиноведение. – 1981. – №6. – С. 75 – 81.
87. Усов П.П. Теоретическое исследование влияния шероховатости поверхности на несущую способность слоя смазки. – Машиноведение. – 1984. – №1. – С. 92 – 100.
88. Усов П.П. Теоретическое исследование напряженного состояния пары вал-втулка с учетом износа / П.П. Усов, Ю.Н. Дроздов, Ю.Н. Николашев // Машиноведение. – 1979. – № 2. – С. 80 – 87.
89. Усов П.П. Гидродинамическая смазка подшипника при наличии шероховатости // Трение и износ. – 1983. – № 6. – С. 1025 – 1037.
90. Усов П.П. Контактные задачи с учетом износа для сферического и цилиндрического подшипников скольжения с тонким вкладышем / П.П. Усов, М.А. Галахов // Машиноведение. – 1986. – № 3. – С. 82 – 88.
91. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения – М. – 1959.
92. Чернавский С.А. Подшипники скольжения / С.А. Чернавский. – М. – 1968. – 560 с.
93. Чжоу О влиянии шероховатости при гидродинамической смазке / Чжоу, Сейбел // Пробл. трения и смазки. – 1978. – №2. – С. 34 – 38.
94. Современная трибология: Итоги и перспективы. Отв. ред. К.В. Фролов. – М.: Издательство ЛКИ. – 2008. – 480 с.
95. Коровчинский М.В. Основы трения термического контакта при локальном трении // Новое в теории трения. – М.: Наука; АН СССР, Научный совет по трению и смазке. – 1968. – С. 5 – 72.

96. Коровчинский М.В. Основы трения термического контакта при локальном трении // Вопросы трения и проблемы смазки. М.: Наука; АН СССР, Научный совет по трению и смазке. – 1966. – С. 98 – 145.
97. F.P. Bowden A note on the surface temperature of sliding metals / Bowden F.P., Ridler K.E. // Proc. Cambridge Philos. Soc. – 1935. – №31(3) – P. 431.
98. Blok H. The Dissipation of Frictional Heat // Applied Scientific Research. Section A. – 1955. – № 2 – 3. P. 151 – 181.
99. Blok H. Afvoer van Wrijvingswarmte, (The Dissipation of Frictional Heat); Voordrachten Kon. Inst. van Ingenieurs; The Hague. – 1950. – №2. – P. 84.
100. Чичинадзе А.В. Диаграммы переходов и экранирующее действие смазочного слоя / А.В. Чичинадзе, И.А. Буяновский, Б.Э. Гурский // Трение и износ. – 2002. – №3(23) – С. 334 – 341.
101. Тепловая динамика трения: Сб. трудов / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Наука. – 1970. – 172 с.
102. Справочник по триботехнике / Под ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе. М.: Варшава: Машиностроение. – 1989. Т. 1: Теоретические основы. – 1990. – 400 с.; Т. 2: Смазочные материалы. – 416 с.
103. Чичинадзе А.В. Тепловые процессы при трении, изнашивании и смазке // Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2003. – 576 с.
104. 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.
105. 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.

106. Евдокимов А.Ю. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект / А.Ю. Евдокимов, И.Г. Фукс, И.А. Любинин – К.: Атика-Н. – 2012. – 292 с.
107. Горленко А.О. Эффективность применения дисульфида молибдена в качестве антифрикционного компонента смазочных масел / А.О. Горленко, И.Л. Шупиков, М.И. Прудников // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. - № 1 (41). – С.18 – 22.
108. Албагачиев А.Ю. Серпентины – как добавки к маслам: эффективность и механизм смазочного действия / А. Ю. Албагачиев, И. А. Буяновский, А. В. Дунаев, А. А. Гвоздев, В. Д. Самусенко // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2021. – № 5. – С. 89 – 99.
109. Задошенко Е.Г. Влияние наночастиц Fe_3O_4 на вязкостные и триботехнические характеристики олеиновой кислоты. – В кн.: Трибология-машиностроению. Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции 14 – 16 октября 2020 г. – М.: ИМАШ РАН. 2020. – С. 114 – 118.
110. **Тохметова А.Б.** Исследование трибологических свойств моторного масла с содержанием фуллеренов / А.Б. Тохметова, А.В. Михеев, М.А. Тананов // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2022. – № 4. – С. 108 – 112.
111. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение. – 2007. – 496 с.
112. Канарчук В.Е. Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы // Наукова думка. – Киев. – 1978. – 256 с.
113. Калимуллин Р.Ф. Концепция повышения долговечности автомобильных двигателей при эксплуатации // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – № 9 (184). – С.144 – 156.
114. Виноградов В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев // Москва: Машиностроение. – 1982. – 192 с.
115. А. Ю. Албагачиев Определение температуры нагрева смазочного слоя при трении / А. Ю. Албагачиев, А. Н. Михеев, М. А. Тананов, **А. Б. Тохметова** // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2022. – № 5. – С. 93-98.

116. 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. *

117. Albagachiev A.Y. Tribotechnical characteristics of nanomodifier 1 / A.Y. Albagachiev, N.N. Novikova, **A.B. Tokhmetova** // Journal of machinery manufacture and reliability. – Moscow, 2020. – №5. – P. 457 – 461. *

118. Албагачиев А.Ю. Трибологические свойства наномодификатора 2 / А.Ю. Албагачиев, **А.Б. Тохметова** // Проблемы машиностроения и автоматизации. – Москва. – 2020. – №3. – С. 50 – 53.

119. Albagachiev A.Y. Tribotechnical properties of nanomodifier 2 / A.Y. Albagachiev, **A.B. Tokhmetova** // Journal of machinery manufacture and reliability. – Moscow, 2020. – №10. – P. 870 – 873.

120. **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.

121. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022662966

Программный комплекс для расчета нестационарной задачи смазки двух сближающихся поверхностей

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) (RU)*

Авторы: *Албагачиев Али Юсупович (RU), Тохметова Айгерим Бауыржановна (KZ), Усов Павел Павлович (RU)*

Заявка № 2022662429

Дата поступления 01 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 июля 2022 г.

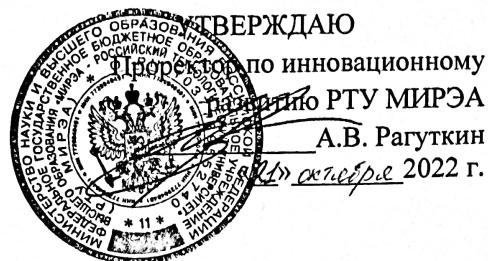


Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Тохметовой Айгерим Бауыржановны

«Влияние микро – /нанодобавок на трибологические свойства
смазочного материала» в учебном процессе

Комиссия МИРЭА – Российского технологического университета в составе Пирогова В.В., Зуева В.В., Скрипника С.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы внедрены в дисциплину «Технологическое обеспечение качества изделий» по направлению подготовки 15.04.01 «Машиностроение».

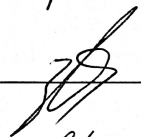
Комиссия:

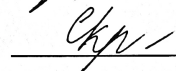
Заведующий кафедрой цифровых
и аддитивных технологий, к.т.н.

Доцент кафедры информационных
технологий в машино- и приборостроении, к.т.н.

Ассистент кафедры цифровых
и аддитивных технологий

 /Пирогов В.В.

 /Зуев В.В.

 /Скрипник С.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Листинг программы температурной задачи

```
import numpy as np
import pandas as pd
SAMPLE_PATH = 0.008
N = 200
MF = 200
ALFA_COEF = 0.5
SPEED = 0.266
H = 2e-6
Z = 1.9e-6
T_END = 3600
#lamda = 0.13
C = 2037
RO = 911
F = 112
WORK = 6.4e-04

def temper(lamda, force):
    tau_tau = force / WORK
    a = lamda / (C * RO)
    h = SAMPLE_PATH / (N - 1)
    tau = T_END / 100.0
    # =====
    T = np.ones(MF)
    alfa = np.zeros(MF)
    beta = np.zeros(MF)
    T[0] = 0
    time = 0
    while time < T_END:
        koef = ALFA_COEF * tau * SPEED * h * (1 - Z / H) / lamda
        # =====
        znam_1 = (2 * a * tau + h * h) + (2 * a * tau_tau * h * ALFA_COEF *
        SPEED * tau * (1 - Z / H))
        # =====
        znam_2 = lamda * (2 * a * tau + h * h)
        # =====
        chisl = h * h * T[1]
        alfa[0] = (2 * a * tau) / (2 * a * tau + h * h)
        # beta[0] = chisl / znam_1 / znam_2
        beta[0] =
        (h * h * T[0]) / (2 * a * tau + h * h) + (2 * a * tau_tau * h * ALFA_COEF * SPEED * tau * (1 - Z /
        H)) / (lamda * (2 * a * tau + h * h))
        for i in range(1, N-2):
```

```

    ai = lamda / (h * h)
    ci = lamda / (h * h)
    bi = 2 * lamda / (h * h) + C * RO / tau
    fi = - C * RO * T[i] / tau
    alfa[i] = ai / (bi - ci * alfa[i - 1])
    beta[i] = (ci * beta[i-1] - fi) / (bi - ci * alfa[i-1])
T[N-1] = 0
for i in range (N-2, 0, -1):
    T[i] = alfa[i] * T[i+1] + beta[i]
    time = time + tau
return np.mean(T)

```