

БРЕКИ АЛЕКСАНДР ДЖАЛЮЛЬЕВИЧ

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ПАР ТРЕНИЯ
И СМАЗОЧНЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ САМОПРОИЗВОЛЬНЫХ
ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЙ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА**

05.02.04 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

**Санкт-Петербург
2021**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный консультант: **Чулкин Сергей Георгиевич** доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Цветков Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии судоремонта федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», г. Санкт-Петербург

Березина Елена Владимировна
доктор технических наук, профессор кафедры химии, физики, математики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановская государственная медицинская академия», г. Иваново

Шалыгин Михаил Геннадьевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой трубопроводных транспортных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», г. Брянск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится «25» января 2022 года в 16 часов на заседании диссертационного совета У.05.02.04 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, главный корпус, 3-й этаж, ауд. 327.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.02.04
доктор технических наук, профессор



Ю.Г. Барабанщиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время, в любой области промышленности при эксплуатации различных механизмов, машин и оборудования, задачи снижения энергетических потерь на трение и износ являются наиболее важными. В высоконагруженных узлах трения машин происходит самопроизвольное изменение состояния материала фрикционного контакта, приводящее к сменам механизмов трения, следствием которых являются повышение силы и коэффициента трения, интенсивности и скорости износа, схватывание, задир, резкий рост контактных температур. Для уменьшения данных явлений ведётся разработка различных технических решений, связанных с разработкой новых материалов пар трения и смазочных сред с высокими триботехническими характеристиками с использованием улучшенных пакетов присадок, дисперсных наполнителей, указанных в стратегических направлениях развития материалов и технологий до 2030 года.

Большой объем литературных источников по экспериментальному выявлению закономерностей трения скольжения твёрдых тел, показал существование трех важных взаимосвязанных проблем в науке о трении и изнашивании:

- существуют отклонения от двучленного закона трения скольжения, выражаемые в форме изгибов на линейных графиках зависимости средней силы трения от нагрузки, возникающие при изменении состояния фрикционного контакта, в связи с чем, необходима разработка новой обобщённой математической модели закона трения;

- многочисленные экспериментальные лабораторные и промышленные результаты показывают, что в зоне фрикционного контакта тел из различных материалов в смазочной среде реализуются явления, приводящие к самопроизвольному изменению силы трения скольжения от пути и времени, проявляющемуся в виде переходных процессов, в связи с чем, возникает необходимость разработки новых математических моделей для описания закономерностей динамики фрикционного взаимодействия;

- многие закономерности трения скольжения под действием огромного числа факторов, и сложности процесса трения трудно поддаются математическому моделированию и, в ряде случаев, не имеют адекватного математического описания, что создаёт дополнительные трудности для их последующего практического использования при проектировании, изготовлении, эксплуатации, ремонте машин и приборов для снижения энергетических потерь на трение и повышения их износостойкости.

Первые две проблемы являются фундаментальными для науки о трении и изнашивании. Третья проблема относится к важнейшим прикладным проблемам трибологии. Эффективность решения третьей проблемы базируется на степени разрешения первых двух.

К сожалению, сегодня пока нет научно обоснованных теоретических и практических рекомендаций для промышленности в подборе перспективных материалов триботехнического назначения. Закономерности изменения триботехнических характеристик в процессе эксплуатации во многом противоречивы в связи с самопроизвольными изменениями состояний фрикционного контакта, обусловленными сложными физико-химическими процессами. Уменьшение возникающих при работе трибоузлов противоречий может быть достигнуто посредством разработки и верификации обобщенных математических моделей, описывающих изменение триботехнических

характеристик материалов пар трения в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта.

Актуальность выбранной темы исследования также подтверждается ее выполнением в рамках:

- гранта РФФИ № 13-08-00553 и государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки России. Коды проектов: № 933-2014, № 1972-2014;

- гранта Российского научного фонда: "Формирование беспористых покрытий из нанокпозиционных материалов типа «износостойкая матрица – наночастицы дисульфида молибдена (вольфрама)», обладающих низким коэффициентом трения, методом химического осаждения из газовой фазы", № 15-13-00045;

- государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А18-118012190023-2 "Термодинамика и кинетика структурных превращений и накопления повреждений в процессах деформирования и разрушения многокомпонентных твердых тел");

- программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение от 17.11.2020 № 075-15-2020-934).

Степень разработанности темы. Работа выполнена на основе результатов экспериментальных и теоретических исследований в области трения скольжения и изнашивания материалов с различными физическими, механическими и эксплуатационными свойствами, приведенных в работах таких отечественных и зарубежных ученых как Э.И. Адирович, В.В. Алисин, Г. Амонтон, А.С. Ахматов, А.Я. Башкарёв, В.А. Белый, Е.В. Берёзина, Д.И. Блохинцев, Ф.П. Боуден, Э.Д. Браун, П.У. Бриджмен, В.П. Булатов, Н.А. Буше, И.А. Вышнеградский, Д.Н. Гаркунов, Б.М. Гинзбург, Дж. Годдард, И.Г. Горячева, В.В. Гриб, Л. Гюмбель, Б.В. Дерягин, Н.Б. Демкин, М.Н. Добычин, Ю.Н. Дроздов, Г.И. Епифанов, А.К. Зайцев, А.Ю. Ишлинский, В.Н. Кашеев, В.Д. Кузнецов, Ш.О. Кулон, И.В. Крагельский, Ю.П. Козырев, В.С. Комбалов, П. Конти, Б.И. Костецкий, Е.Г. Котельников, Д. Лесли, А.С. Лодж, В.Ф. Лоренц, В.И. Максак, Р.М. Матвеевский, М.Э. Мерчант, Н.М. Михин, В.М. Мусалимов, Н.К. Мышкин, Ф.А. Опейко, Л.И. Погодаев, А.С. Проников, Э. Рабинович, С. Рубинштейн, А.И. Свириденко, Г.Э. Свирский, Е.Б. Седакова, М.А. Скотникова, Д. Тейбор, М.М. Тененбаум, Д.М. Толстой, Г.А. Томлинсон, Х. Уилман, Ю.А. Фадин, С.В. Федоров, Х.Г. Хауэлл, Ю.Н. Цветков, А.В. Чичинадзе, С.Г. Чулкин, Р.П. Штейн, Л.Ш. Шустер, Х. Эрнст и др.

В результате исследований многих отечественных и зарубежных авторов разработано большое количество математических моделей трения скольжения, накоплены огромные массивы экспериментальных данных в этой области, которые проходят обработку в современных программных продуктах, в том числе в Big Data. Однако проблемы моделирования трения скольжения и сопровождающего его изнашивания в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта относятся к нерешенным проблемам трибологии.

Цели и задачи работы. В связи с обозначенными проблемами общей целью работы является разработка и верификация математических моделей трения скольжения твёрдых тел в различных средах при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, необходимых для повышения эффективности оценки триботехнических свойств материалов (включая смазочные), покрытий и модифицированных поверхностных слоев.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач:

1. Разработать обобщённую математическую модель закона трения скольжения, с учётом смены режимов трения при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта.

2. Разработать новую математическую модель динамики изменения характеристик трения скольжения, с учётом наличия переходных процессов при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта.

3. Разработать новую математическую модель закона динамики изнашивания в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта, частными случаями которой являются характерные зависимости изнашивания конкретных узлов трения.

4. Провести верификацию разработанной обобщённой математической модели закона трения скольжения твёрдых тел в различных смазочных средах, в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта. Провести анализ закономерностей трения, оцифровку и математическую обработку экспериментальных данных, полученных другими исследователями.

5. Провести верификацию разработанной новой математической модели динамики изменения характеристик трения посредством экспериментального выявления закономерностей трения скольжения в различных материалах пар трения и смазочных средах при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта.

6. Провести верификацию новой математической модели закона динамики изнашивания посредством экспериментального выявления закономерностей процесса изнашивания материалов пористых газотермических покрытий в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта.

7. Разработать и провести верификацию математической модели трения в условиях сверхмедленного скольжения.

8. Создать машину сверхмедленного трения и осуществить экспериментальное выявление закономерностей динамики изменения характеристик трения скольжения в диапазоне скоростей от 30 до 10000 нм/сек. Провести сравнение полученных результатов с триботехническими характеристиками материалов пар трения, полученных на стандартных машинах трения.

9. Обобщить большой объем экспериментально полученных триботехнических характеристик материалов пар трения и смазочных сред, а также разработанные математические модели, для расчёта площадей контакта, контактных давлений, температуры вспышки и интенсивности усталостного изнашивания в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана обобщённая математическая модель закона трения скольжения твёрдых тел, позволяющая описать зависимость силы трения от нагрузки при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, обусловленных сложными физико-химическими и механическими процессами.

2. Установлено, что в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта изменение силы трения в зависимости от нормальной нагрузки имеет кусочно-линейный характер, а такие параметры фрикционного взаимодействия как дифференциальный коэффициент трения, равнодействующая сил молекулярного притяжения и молекулярная составляющая силы трения изменяются сигмоидально.

3. Разработана обобщённая формула для расчёта классического коэффициента трения в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта,

позволяющая аналитически описать принципиальную схему изменения классического коэффициента трения.

4. Впервые разработана математическая модель, описывающая динамику изменения силы трения при наличии одного и более переходных процессов, обусловленных самопроизвольными изменениями состояния фрикционного контакта под воздействием определённых физико-химических процессов. Посредством данной модели можно определить интенсивность изменения силы трения, динамику изменения работы и импульса силы трения, а также интегральные средние значения данных трибологических характеристик.

5. Впервые разработана обобщённая математическая модель, описывающая все характерные участки классической кривой динамики изнашивания: участок приработки, участок нормального износа и участок предельного износа. Данная математическая модель, при различных значениях входящих в неё параметров, позволяет описать шесть типов закономерностей динамики изнашивания, конкретных узлов трения.

6. Выявлены закономерности динамики изменения силы трения при сверхмедленном движении гладких стальных поверхностей и установлено их соответствие с разработанной математической моделью динамики изменения характеристик трения. Установлено отсутствие стационарных значений силы трения, характерных для более высоких скоростей скольжения. Показано, что разработанная обобщённая математическая модель закона трения скольжения выполняется для случая трения при сверхмедленном движении.

7. Разработана новая смазочная композиция, содержащая наночастицы диселенида вольфрама (патент на изобретение RU 2586335 С1, 10.06.2016, заявка № 2014153023/04 от 25.12.2014).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит:

1) в обобщении математических моделей, содержащих характеристики трения, для расчёта контурной и фактической площадей контакта, контактных давлений, сближения, температуры вспышки и интенсивности усталостного изнашивания с учётом самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта.

2) в возможности представления математической модели обобщённого закона трения в виде кусочно-линейной функции, позволяющей проводить анализ фрикционного взаимодействия твёрдых тел при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта;

3) в выборе функциональных зависимостей, которые хорошо аппроксимируют кусочно-постоянные и кусочно-непрерывные функции и, при этом, являются нелинейными, дифференцируемыми и непрерывными, что является необходимым условием для описания трения скольжения твёрдых тел при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта;

4) в различении классического коэффициента трения, выражающего долю силы трения от нормальной нагрузки при скольжении, и дифференциального коэффициента трения, выражающего интенсивность изменения силы трения при изменении нагрузки и их совместном использовании;

5) в использовании в разработанных обобщённых математических моделях: приращения дифференциального коэффициента трения; резкости перехода от одного режима трения к другому; критического значения нормальной силы; которые являются важными дополнительными трибологическими характеристиками, необходимыми для оценки фрикционных переходов.

Практическая значимость работы состоит:

1) в разработке новой смазочной композиции, содержащей наночастицы диселенида вольфрама (патент на изобретение RU 2586335 С1, 10.06.2016, заявка № 2014153023/04 от 25.12.2014);

2) в использовании методических разработок для создания базы данных (свидетельство о регистрации базы данных RU 2014620905, заявка № 2014620573 от 28.04.2014);

3) в разработке новых эффективных смазочных композиций, содержащих частицы фторированного графена, для пропитки подшипников скольжения из пористых материалов;

4) в разработке эффективного композиционного покрытия триботехнического назначения с матрицей из линейного полиимида с шарнирными развязками и наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама;

5) в повышении точности расчёта средних значений силы трения, средней работы и импульса трения, классического коэффициента трения;

6) в создании автором машины сверхмедленного трения, позволяющей существенно расширить диапазон варьирования скорости скольжения (от $3 \cdot 10^{-8}$ м/с и выше) для выявления новых закономерностей фрикционного взаимодействия твёрдых тел из различных материалов.

7) в использовании компонентов разработанных обобщённых математических моделей для создания четырёх программных комплексов, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

8) во внедрении научных положений и результатов работы в НПП Телар для снижения энергетических потерь на трение и износа ответственного оборудования и в ТГПУ им. Л.Н. Толстого в учебный процесс.

Методология и методы исследования. Теоретическими основами исследования являются: «формула двучленного закона трения Б.В. Дерягина», «формула двучленного закона для условий граничного трения А.С. Ахматова», «Теория внешнего трения Б.И. Костецкого» и «Молекулярно-механическая теория трения И.В. Крагельского». Методологическими основами исследования являются: «Системный анализ в трибологии Х. Чихоса», «Основы математического анализа», «Основы математической статистики», «Основы математического и физического моделирования трения и изнашивания».

Для верификации разработанных обобщённых математических моделей трения скольжения в работе использованы как стандартизованные методы триботехнических испытаний, так и авторские методики, реализуемые с использованием специально разработанного автором оборудования для испытаний на трение и износ. В частности, для расширения диапазона скоростей скольжения, автором создана машина сверхмедленного трения МТБМ, позволяющая проводить испытания при скоростях скольжения до 10^{-8} м/с и разработана соответствующая методика. В работе использованы оригинальные методы обработки результатов триботехнических испытаний, представляющие собой алгоритмы пошаговой аппроксимации экспериментальных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обобщённая математическая модель закона трения скольжения твёрдых тел, позволяющая описать зависимость силы трения от нагрузки при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, обусловленных сложными физико-химическими и механическими процессами.

2. Обобщённая формула для расчёта классического коэффициента трения в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта,

позволяющая аналитически описать принципиальную схему изменения коэффициента трения.

3. Обобщённая математическая модель, описывающая динамику изменения силы трения при наличии переходных процессов, обусловленных самопроизвольными изменениями состояния фрикционного контакта под воздействием определённых физико-химических процессов.

4. Обобщённая математическая модель закона динамики изнашивания, позволяющая, при различных значениях входящих в неё параметров, описать шесть типов закономерностей динамики изнашивания конкретных узлов трения.

5. Закономерности трения скольжения твёрдых тел без смазки и в средах жидких и консистентных смазочных материалов, обусловленные изменением состояния фрикционного контакта под действием нормальной нагрузки.

6. Закономерности динамики изменения характеристик трения скольжения твёрдых тел без смазки и в средах жидких смазочных материалов при изменениях состояний фрикционного контакта.

7. Закономерности трения в условиях сверхмедленного скольжения гладких стальных поверхностей.

8. Обобщённые математические модели, содержащие характеристики трения, для расчёта площади контакта, контактных давлений, сближения, температуры вспышки и интенсивности усталостного изнашивания на случай самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается:

- корректным использованием известных теорий и концепций трения твёрдых тел различной природы;
- использованием современных программных продуктов для обработки экспериментальных данных;
- проведением исследований посредством поверенных технических средств, приборов и оборудования;
- подтверждением справедливости разработанных обобщённых математических моделей трения скольжения посредством экспериментальных исследований материалов различной природы.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на следующих российских и международных конференциях: VI Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" Москва, 10–13 ноября 2015 г; Dedicated to 50-th anniversary year of tribology - proceedings of 8-th international scientific conference, BALTTTRIB 2015, Kaunas, 26–27 ноября 2015; Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016», Рязань, 02–04 марта 2016 г; VI Всероссийская конференция по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи НАНО. Москва, 22–25 ноября 2016 г.; IOP conference series: materials science and engineering. 3rd international conference on innovative materials, structures and technologies, IMST 2017, Riga, 27–29 сентября 2017 г.; VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" Москва, 07–10 ноября 2017 г; Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы и приложения: XV Международная конференция, посвященная столетию со дня рождения профессора Николая Михайловича Коробова. Тула, 28–31 мая 2018 г; IOP conference series: earth and environmental science. International Scientific Conference on Efficient Waste Treatment 2018, EWT 2018. St. Petersburg, 13–14 декабря 2018 г; Materials today: Proceedings

2019 International Scientific Conference on Materials Science: Composites, Alloys and Materials Chemistry, MS-CAMC 2019. Amsterdam. Saint Petersburg, 20–21 ноября 2019 г.; Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы, приложения и проблемы истории: XVII Международная конференция, посвящённая 100-летию со дня рождения профессора Н. И. Фельдмана и 90-летию со дня рождения профессоров А. И. Виноградова, А. В. Малышева и Б. Ф. Скубенко. Тула, 23–28 сентября 2019 г.; Актуальные проблемы морской энергетики: девятая Международная научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 20–21 февраля 2020 года; AIP conference proceedings. "Proceedings International Conference "Problems of Applied Mechanics"". Bryansk, 01–03 декабря 2020 г.; Третий международный научно-технический семинар "Моделирование синтеза и деструкции перспективных материалов". Минск, 15–16 октября 2020 г.

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора. По материалам диссертации опубликовано 79 работ, из них 47 работ в журналах и изданиях, включенных в Перечень ВАК, и 20 - в одну из баз данных и систем цитирования Web Of Science и/или Scopus, 6 монографий, 6 объектов интеллектуальной собственности.

Выносимые на защиту положения, результаты экспериментов и их анализ принадлежат лично автору или получены при его определяющем участии. Все представленные в диссертации новые математические модели, разработаны лично автором.

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах» в части пунктов:

п.7. Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоев.

п.8. Триботехнические свойства смазочных материалов.

п.10. Физическое и математическое моделирование трения и изнашивания.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Диссертация общим объемом 378 страниц, содержит 173 рисунка и 14 таблиц. Список литературы включает 426 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и основные задачи исследования. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о методологии и методах исследования, и об апробации работы.

В первой главе приведены результаты аналитических исследований закономерностей внешнего трения скольжения твёрдых тел. Проведён анализ результатов исследований от Леонардо да Винчи до Шарля Кулона и произведён вывод двучленного закона трения Кулона, посредством данных его оригинальной работы. Формула двучленного закона трения Шарля Кулона:

$$F_f = A + \frac{F_N}{f_c}, \quad (1)$$

где A – составляющая силы трения не зависящая от нормальной нагрузки, F_N – нормальная нагрузка, f_c – коэффициент трения по Шарлю Кулону. Однако анализ расчётной схемы Кулона и его уравнений показал, что:

$$A = \frac{F_M}{f_c}, \quad (2)$$

где F_M – сила сцепления поверхностей трения (в современном понимании сила адгезии или равнодействующая сил молекулярного притяжения). Таким образом:

$$F_f = \frac{1}{f_c} \cdot (F_N + F_M). \quad (3)$$

С другой стороны справедливо равенство:

$$\frac{dF_f}{dF_N} = \frac{1}{f_c} = f_D, \quad (4)$$

где f_D – дифференциальный коэффициент трения. Соответственно:

$$F_f = f_D \cdot (F_N + F_M). \quad (5)$$

Формула (5) выражает двучленный закон трения Б.В. Дерягина, который можно вывести на основании данных Кулона из других исходных предпосылок.

Для выявления закономерностей трения скольжения твёрдых тел при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, в границах данной работы используются концепции Б.В. Дерягина, В.Д. Кузнецова, А.С. Ахматова, Б.И. Костецкого, И.В. Крагельского и П.У. Бриджмена.

В результате анализа процесса трения с точки зрения межмолекулярных взаимодействий академик Б.В. Дерягин приходит к формуле (5), которую записывает, с уточнением и своей интерпретацией:

$$F_f = f_D \cdot (F_N + F_M) = f_D \cdot F_N + f_D \cdot p_M \cdot A_r, \quad (6)$$

где $f_D = dF_f/dF_N$ – дифференциальный коэффициент трения (истинный по Б.В. Дерягину), F_M – равнодействующая сил молекулярного притяжения между трущимися телами, p_M – удельная сила молекулярного притяжения, A_r – фактическая площадь контакта. Б.В. Дерягин основное внимание уделяет величинам f_D и F_M .

Академик В.Д. Кузнецов и Г.Д. Полосаткин, уделяя основное внимание коэффициенту трения Леонардо да Винчи – Амонтона (классический, стандартный коэффициент трения), использовали формулу:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = f_D + \frac{F_{fM}}{F_N}, \quad (7)$$

где $f_{\mathcal{L}\mathcal{A}}$ – классический коэффициент трения (кажущийся по В.Д. Кузнецову), $F_{fM} = f_D \cdot F_M$ – молекулярная составляющая силы трения. Согласно В.Д. Кузнецову, с увеличением F_N фактическая площадь контакта поверхностей увеличивается, вследствие чего увеличивается и F_M . Но так как $f_{\mathcal{L}\mathcal{A}}$ падает с увеличением F_N , то из (7) следует, что F_M изменяется с увеличением F_N очень медленно или почти остаётся постоянной, что и определяет линейность закона трения.

Ахматов А.С. получил формулу двучленного закона трения с учётом притяжения граничных слоёв:

$$F_f = f_D \cdot [F_N + (p_M + p_A) \cdot A_r], \quad (8)$$

где p_A – удельная сила молекулярного притяжения граничных слоёв. Такая формулировка, констатирует справедливость закона (5) для трения смазанных поверхностей твёрдых тел.

Костецкий Б.И., принимая справедливость закона (5), основное внимание уделил энергетическим характеристикам процесса трения и их сопоставлению с характерными зависимостями классического коэффициента трения от нагрузки и скорости скольжения. Работа внешнего трения по Б.И. Костецкому расходуется в основном на образование теплоты и поглощение энергии:

$$W_f = Q_f + \Delta U_f, \quad (9)$$

где Q_f – количество теплоты, выделенное в процессе трения (тепловой эффект трения), ΔU_f – энергия, поглощённая (скрытая, запасённая) в процессе трения.

Отношение поглощённой энергии к работе сил внешнего трения зависит от нормальной нагрузки (соответственно давления), скорости скольжения и вектора параметров трения:

$$\frac{\Delta U_f}{W_f} = \zeta(F_N, v_f, \vec{\Phi}), \quad (10)$$

где v_f – скорость скольжения; $\vec{\Phi}$ – вектор параметров трения: свойства материалов, свойства среды, температура и т.п.

В результате крупного обобщения экспериментальных результатов различных авторов, Б.И. Костецкий разработал принципиальную схему зависимости классического (стандартного) коэффициента трения от нормальной нагрузки (давления) и скорости скольжения, которая с использованием обозначений, принятых в данной работе, показана на рисунке 1.

При анализе зависимости классического коэффициента трения от нормальной нагрузки Б.И. Костецким выделяется четыре характерных участка:

1. Участок приспособляемости *I*.
2. Участок «нормального» внешнего трения *II*.
3. Участок нарушения динамического равновесия *III*.

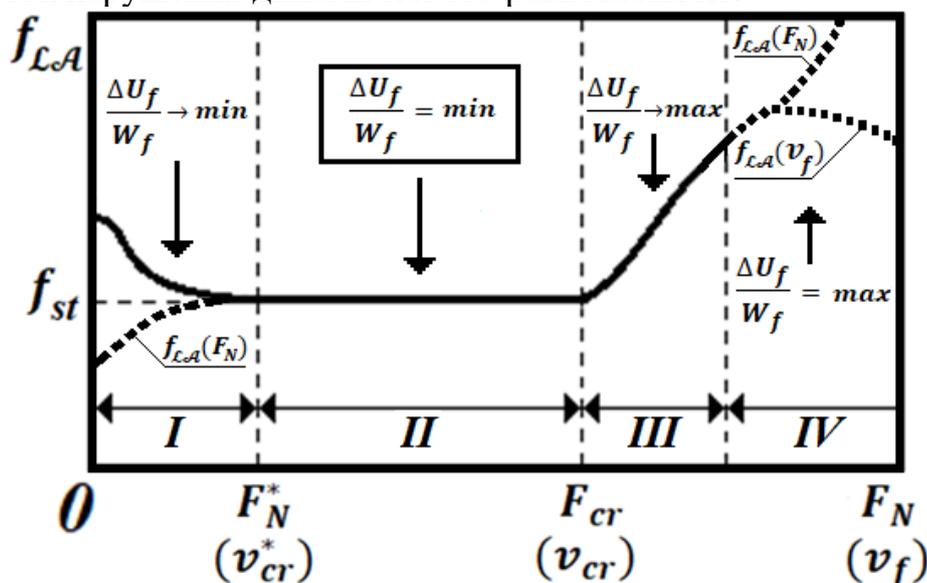


Рис.1. Принципиальная схема изменения коэффициента трения от нормальной нагрузки (скорости скольжения) по Б.И. Костецкому

4. Участок развития «паталогических» процессов *IV*.

Согласно принципальной схеме Б.И. Костецкого на участках *I* и *II* закон (5) выполняется, а на участках *III* и *IV* происходят отклонения от него, в связи с наличием которых данный закон нуждается в уточнении. Отклонения обусловлены различными причинами, среди которых выделяются сближение поверхностей, внедрение микронеровностей и адгезионное взаимодействие.

Согласно И.В. Крагельскому, в зависимости от величины адгезии и относительной глубины внедрения будут иметь место: упругое оттеснение материала; пластическое оттеснение материала; срез внедрившегося материала; схватывание плёнок, покрывающих поверхности твердых тел и их разрушение (схватывание первого рода); схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала (схватывание второго рода).

Все виды нарушения фрикционных связей могут происходить одновременно (параллельно, синхронно), а также последовательно.

И.В. Крагельским сформулировано правило положительного градиента механических свойств:

$$\frac{d\tau_x(z)}{dz} > 0, \quad (11)$$

где τ_x – разрушающее напряжение в направлении плоскости касания; z – координата, перпендикулярная к плоскости касания. В зависимости от величины отношения глубины внедрения микронеровности h_r к радиусу кривизны её вершины r_r и правила (11) Крагельским И.В., Михиным Н.М. и Друяновым Б.А. показаны условия перехода от одного вида фрикционных связей к другим.

При соблюдении правила положительного градиента и соответствующих условий выполняется закон (5), а при отрицательном градиенте происходят смены режимов трения, которые необходимо учитывать вводя поправки в (5).

Анализ результатов исследований трения скольжения П.У. Бриджмена, Б.И. Костецкого, И.К. Александрова, А.С. Ахматова, И.В. Крагельского, Г.И. Елифанова показал, что отклонения от закона (5), обусловленные сменой режимов трения, соответствуют схеме, показанной на рисунке 2.

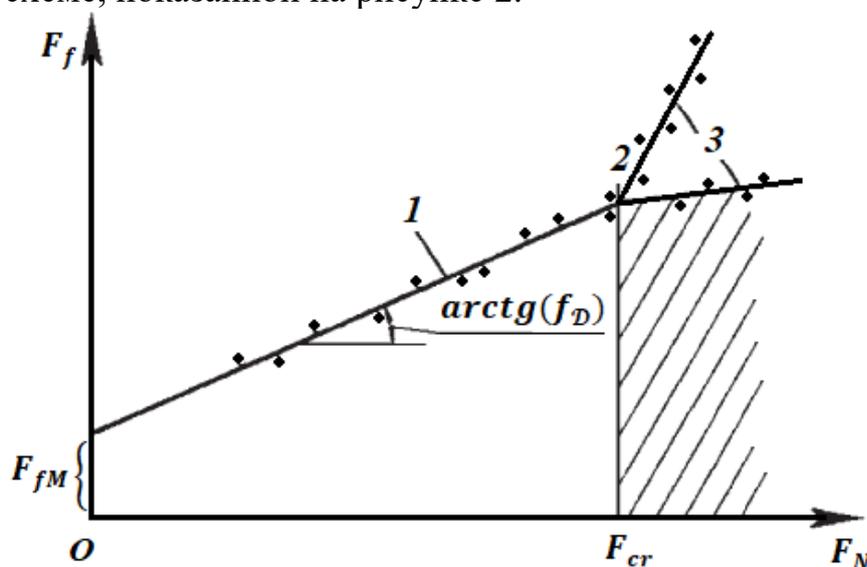


Рис.2. Уточнённая схема зависимости силы трения от нормальной нагрузки (И.К. Александрова): 1 – зависимость при «нормальном» процессе трения; 2 – критическая нагрузка; 3 – отклонения от закона (5)

Следует отметить, что часто встречаются отклонения от закона (5) в виде, подобном излому линейной зависимости, однако существуют варианты, когда две линейные зависимости соединяются дугообразной кривой, например, как это следует из работ П.У. Бриджмена и Г.И. Елифанова.

Зависимости, показанные на рис.2, строятся на основании результатов исследований динамики изменения силы трения при различных нагрузках. Анализ экспериментальных закономерностей изменения силы трения от пути и времени при переменном комплексе условий показал, что в случае изменений состояний фрикционного контакта возникают переходные процессы, при которых средняя сила трения переходит от одного стационарного значения к другому, при этом может изменяться и характер её колебаний. Как отмечает Костецкий Б.И., наличие нескольких переходов создаёт неопределённость характеристик трения (рис.3).

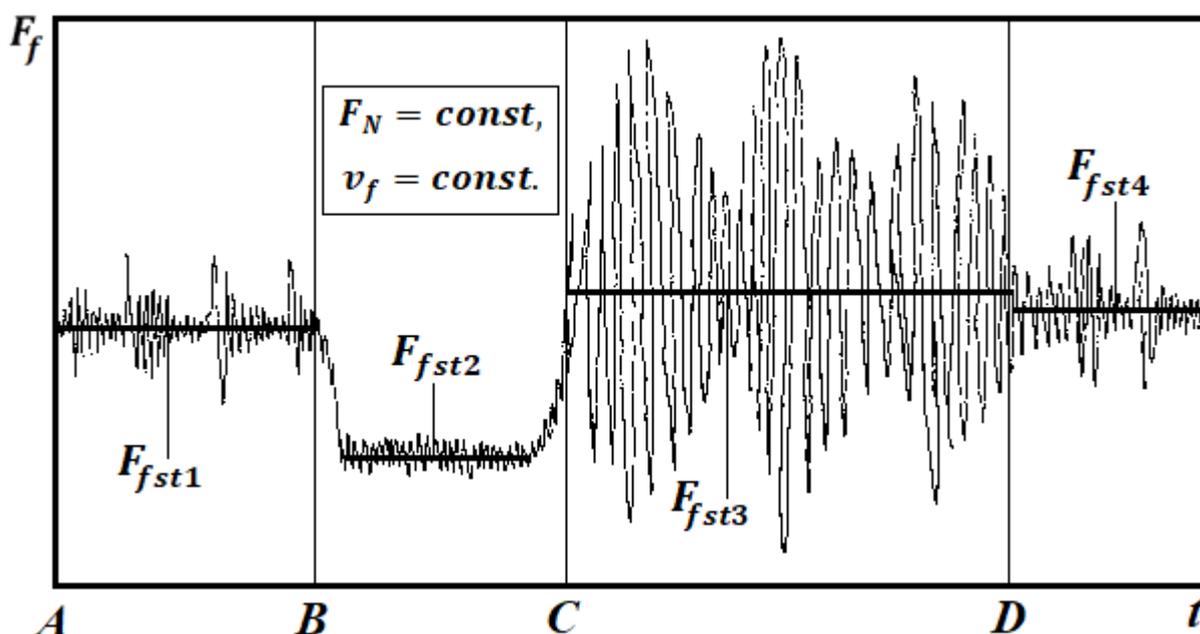


Рис.3. Пример зависимости силы трения от времени при возникновении на контакте различных физико-химических процессов (по Б.И. Костецкому)

Анализ данных Б.И. Костецкого показал, что изменения силы трения имеют поли-сигмоидальный характер и возникает необходимость создания математических моделей для адекватного описания этих изменений и корректной оценки средних значений силы трения для выявления закономерностей, приведённых на рис.2.

Во второй главе работы рассмотрено системное представление внешнего трения в соответствии с концепцией Хорста Чихоса и приведены составляющие физических моделей, анализ которых позволил разработать программу экспериментальных исследований для выявления закономерностей трения и изнашивания твёрдых тел при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта. При этом принимался приоритет эмпирических методов в исследовании трения и изнашивания твёрдых тел, обусловленный следующими фактами, сформулированными А.К. Зайцевым:

- теорией и практикой установлено, что процессы трения и изнашивания материалов чрезвычайно сложны и зависят от большого массива факторов;
- небольшие изменения в условиях трения и изнашивания элементов трибосистем могут вносить заметные, а часто весьма значительные изменения количественных и качественных характеристик данных процессов (см. рис.3);
- процессы трения и изнашивания связаны с основными свойствами материалов трущихся элементов трибосистем и с их состоянием, но зависят и от ряда других условий;
- количественные характеристики трения и изнашивания нельзя заранее вычислить, но можно определить непосредственными опытами (например, рис.3).

В третьей главе приведены разработанные автором математические модели для описания внешнего трения скольжения твёрдых тел при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, базирующиеся на результатах различных авторов и подлежащие экспериментальной проверке. Рассмотрены основные подходы к построению математических моделей и степень соответствия математической модели объекту исследования и реализован выбор функциональных зависимостей для описания трения скольжения твёрдых тел при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта.

Показано, что функция (5) является решением дифференциального уравнения:

$$F_f - \frac{dF_f}{dF_N} \cdot F_N = f_D \cdot F_M. \quad (12)$$

С учётом наличия отклонений от двучленного закона (5) на определённом диапазоне изменения нормальной силы естественно предположить, что:

$$F_f - \frac{dF_f}{dF_N} \cdot F_N = f_{D0} \cdot F_M + \varphi(F_N). \quad (13)$$

где $\varphi(F_N)$ – некоторая функция от нормальной силы, f_{D0} – начальное значение дифференциального коэффициента трения (до смены режима трения).

В границах развиваемой концепции трения (по аналогии с работами Мусалимова В.М.) предложена функция $\varphi(F_N)$:

$$\varphi(F_N) = \frac{\Delta f}{\psi_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N \cdot (F_N - F_\Omega))) - \frac{\Delta f \cdot F_N}{1 + \exp(-\psi_N \cdot (F_N - F_\Omega))}, \quad (14)$$

где Δf – приращение дифференциального коэффициента трения, ψ_N – резкость перехода от одного режима трения к другому (по нормальной нагрузке), F_Ω – критическое значение нормальной силы.

Подставляя (14) в (13) получаем дифференциальное уравнение:

$$F_f - \frac{dF_f}{dF_N} \cdot F_N = f_D \cdot F_M + \frac{\Delta f}{r} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N \cdot (F_N - F_\Omega))) - \frac{\Delta f \cdot F_N}{1 + \exp(-\psi_N \cdot (F_N - F_\Omega))}. \quad (15)$$

Решением дифференциального уравнения (15) является следующая математическая модель для уточнённого закона трения скольжения:

$$F_f = f_{D0} \cdot F_N + f_{D0} \cdot F_M + \frac{\Delta f}{\psi_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N \cdot (F_N - F_\Omega))), \quad (16)$$

которую, с учётом наличия n смен режимов трения, можно записать следующим образом:

$$F_f = f_{D0} \cdot F_N + f_{D0} \cdot F_M + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_i}{\psi_{Ni}} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{Ni} \cdot (F_N - F_{\Omega i}))). \quad (17)$$

Соответственно формулы для удельных сил трения:

$$\begin{aligned} \tau_{fa} &= f_{D0} \cdot p_a + f_{D0} \cdot p_{Ma} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_i}{\psi_{Nai}} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{Nai} \cdot (p_a - p_{\Omega ai}))), \\ \tau_{fr} &= f_{D0} \cdot p_r + f_{D0} \cdot p_{Mr} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_i}{\psi_{Nri}} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{Nri} \cdot (p_r - p_{\Omega ri}))), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\psi_{Nai} = \psi_{Ni} \cdot A_a, \quad \psi_{Nri} = \psi_{Ni} \cdot A_r,$$

где p_a, p_r – номинальное и фактическое давление, A_a, A_r – номинальная и фактическая площадь контакта, p_{Ma}, p_{Mr} – соответствующие удельные равнодействующие сил молекулярного притяжения.

Математические модели (16) и (17) уточняют двучленный закон трения скольжения (5). Качественное графическое представление уточнённого закона внешнего трения (16) приведено на рис.4.

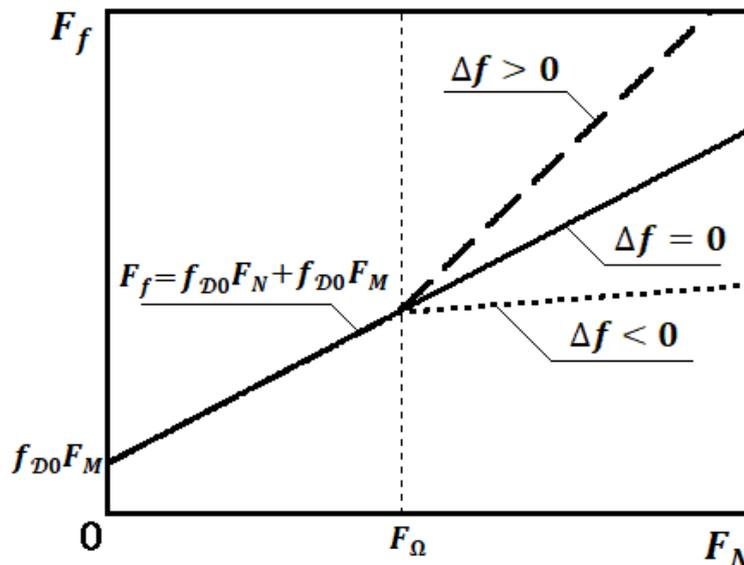


Рис.4. Качественное графическое представление обобщённого закона трения скольжения для случая одной смены режима трения

Из приведённого рисунка 4 видно, что при различных вариантах приращения дифференциального коэффициента трения после достижения критической нормальной нагрузки имеют место три варианта развития событий:

- 1) линейный рост силы трения не меняется $\Delta f = 0$;
- 2) линейный рост силы трения увеличивается $\Delta f > 0$;
- 3) линейный рост силы трения уменьшается $\Delta f < 0$.

Соответственно представленный закон (16) при $\Delta f = 0$ переходит в двучленный закон трения скольжения (5).

При анализе экспериментальных данных уравнение (16) целесообразно представлять в виде кусочно-линейной функции:

$$F_f = \begin{cases} f_{D0} \cdot F_N + f_{D0} \cdot F_M, & 0 \leq F_N < F_\Omega, \\ (f_{D0} + \Delta f) \cdot (F_N - F_\Omega) + f_{D0} \cdot F_\Omega + f_{D0} \cdot F_M, & F_N \geq F_\Omega. \end{cases} \quad (19)$$

Качественно, график функции (19) приведён на рисунке 5.

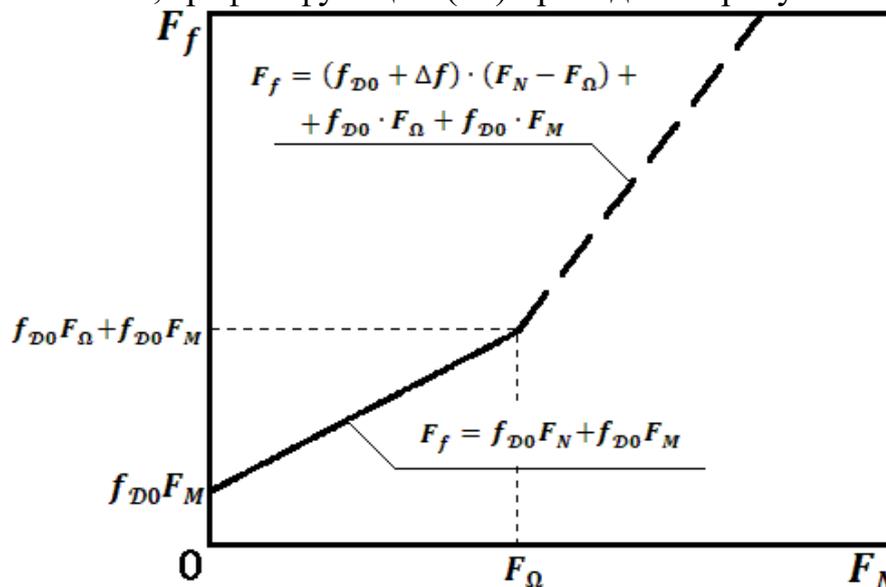


Рис.5. Представление закона трения в виде кусочно-линейной функции

Анализ (16) в виде (19) позволяет определять параметры трения после смены режима трения, а именно, дифференциальный коэффициент трения при смене условий фрикционного взаимодействия равен:

$$f_D^* = f_{D0} + \Delta f,$$

а зависимость дифференциального коэффициента трения от нормальной нагрузки определяется дифференцированием (16):

$$f_D(F_N) = \frac{dF_f}{dF_N} = f_{D0} + \frac{\Delta f}{1 + \exp(-\psi_N \cdot (F_N - F_\Omega))}. \quad (20)$$

График функции (20) приведён на рисунке 6.

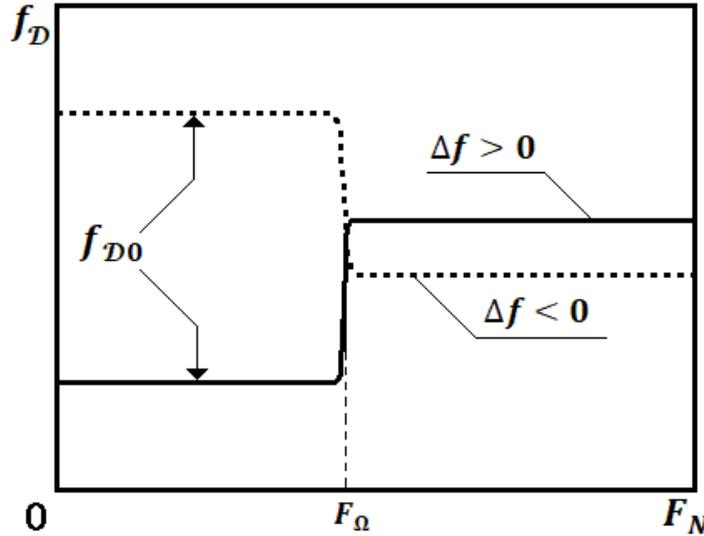


Рис.6. График зависимости дифференциального коэффициента трения от нормальной нагрузки при смене режима трения

Выражение в (19) при условии $F_N \geq F_\Omega$ является двучленным законом трения скольжения:

$$F_f = (f_{D0} + \Delta f) \cdot (F_N - F_\Omega) + f_{D0} \cdot (F_\Omega + F_M), \quad (21)$$

который можно интерпретировать с позиций молекулярной теории трения Б.В. Дерягина. Соответственно, молекулярная составляющая силы трения после достижения критической нагрузки постоянна и равна:

$$F_{fM}^* = f_{D0} \cdot (F_\Omega + F_M),$$

а равнодействующая сил молекулярного притяжения при том же условии $F_N \geq F_\Omega$ определяется из следующего соотношения:

$$F_M^* = \frac{f_{D0} \cdot (F_\Omega + F_M)}{f_{D0} + \Delta f}. \quad (22)$$

Разделив (17) на F_N , имеем формулу для коэффициента $f_{L\mathcal{A}}$:

$$f_{L\mathcal{A}} = \frac{F_f}{F_N} = f_{D0} \cdot \left(1 + \frac{F_M}{F_N}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_i}{F_N \cdot \psi_{N_i}} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{N_i} \cdot (F_N - F_{\Omega_i}))). \quad (23)$$

Молекулярная составляющая силы трения и равнодействующая сил молекулярного притяжения при смене режима трения меняются скачкообразно, аналогично коэффициенту трения в функции (20).

Далее приведены разработанные автором математические модели динамики процесса трения при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, учитывающие наличие переходных процессов.

Самый первый переходный процесс реализуется при переходе контактирующих твёрдых тел от покоя к скольжению. В этом случае имеет место

всего два режима. По данным первой главы данный процесс описывается сигмоидальной зависимостью.

Динамику изменения силы трения в самом простейшем случае можно описать следующей формулой¹:

$$F_f(t) = \frac{\Delta F_f}{1 + \exp(-\psi_t \cdot (t - t_\Omega))}, \quad (24)$$

где ΔF_f – приращение силы трения от начального до нового установившегося значения; ψ_t – резкость фрикционного перехода от одного режима трения к другому (по времени); t – время; t_Ω – критическое значение времени. График зависимости (24) показан на рисунке 7а.

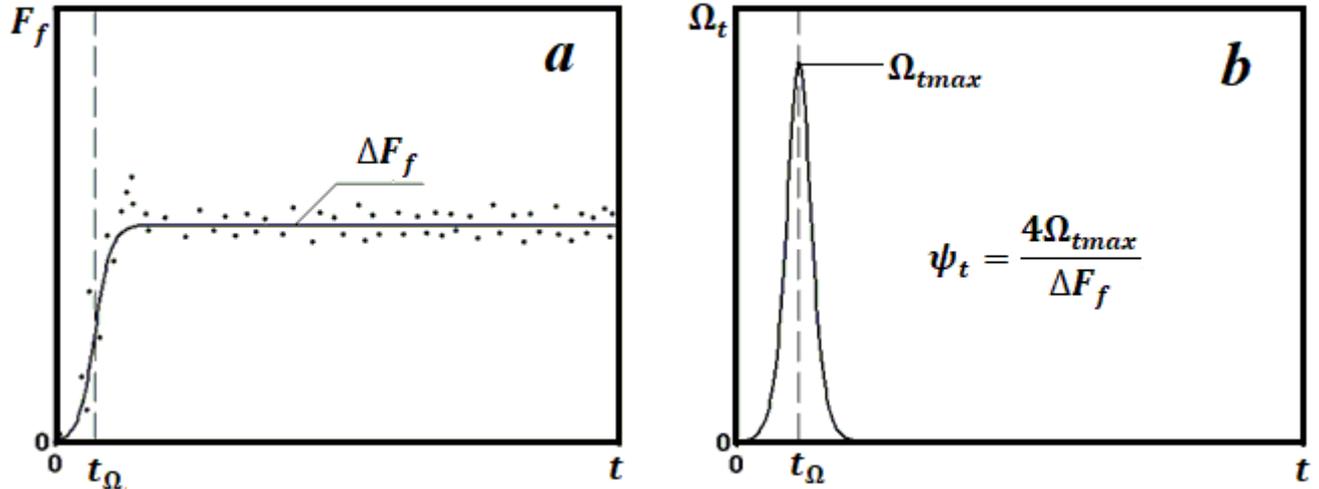


Рис.7. График зависимости: a - (24); b - (25)

Дифференцируя функцию (24) определяем интенсивность изменения силы трения по времени при переходном процессе:

$$\Omega_t(t) = \frac{dF_f}{dt} = \frac{\Delta F_f \cdot \psi_t \cdot \exp(-\psi_t \cdot (t - t_\Omega))}{[1 + \exp(-\psi_t \cdot (t - t_\Omega))]^2}. \quad (25)$$

где Ω_t – интенсивность изменения силы трения по времени. График зависимости (25) показан на рисунке 7b. Из рисунка 7b видно, что моменту времени t_Ω соответствует максимальная интенсивность изменения силы трения при переходном процессе (для случая одного перехода):

$$\Omega_{tmax} = \frac{\Delta F_f \cdot \psi_t}{4}, \quad (26)$$

откуда резкость фрикционного перехода по времени равна:

$$\psi_t = \frac{4\Omega_{tmax}}{\Delta F_f}. \quad (27)$$

Функция (25) может быть с хорошим приближением представлена с использованием Гауссовой функции:

$$\Omega_t(t) \approx \frac{\Delta F_f \cdot \psi_t}{4} \cdot \exp \left[-\pi \left(\frac{\psi_t}{4} \cdot (t - t_\Omega) \right)^2 \right]. \quad (28)$$

¹ Для больших интервалов времени, скачок силы трения при переходе от покоя к скольжению даёт незначительный вклад в общую картину процесса, поэтому в этом случае мы данным скачком пренебрегаем.

Проведение аналогии с Гауссовой функцией позволяет выразить связь между резкостью фрикционного перехода по времени с продолжительностью переходного процесса следующим образом:

$$\psi_t \cong \frac{4\sqrt{2\pi}}{\Delta t_f} \quad (29)$$

где Δt_f – продолжительность переходного процесса.

Подставляя (29) в (26), получим следующую приближённую формулу:

$$\Omega_{tmax} \cong \frac{\Delta F_f \cdot \sqrt{2\pi}}{\Delta t_f} \quad (30)$$

Интегрируя функцию (24), принимая постоянную интегрирования равной нулю, получим зависимость импульса силы трения от времени:

$$I_f(t) = \frac{\Delta F_f}{\psi_t} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_t \cdot (t - t_\Omega))), \quad (31)$$

где I_f – импульс силы трения скольжения.

Графики (31) при различных значениях резкости ψ_t , после момента времени t_Ω , начинают переходить в график функции:

$$I_f(t) = \Delta F_f \cdot (t - t_\Omega). \quad (32)$$

Моменту времени t_Ω соответствует следующий импульс силы трения:

$$I_f(t_\Omega) = \frac{\Delta F_f}{\psi_t} \cdot \ln(2). \quad (33)$$

Разделив (31) на (33) и используя формулу перехода к новому основанию $\log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a}$ получим:

$$I_f(t) = I_f(t_\Omega) \cdot \log_2(1 + \exp(\psi_t \cdot (t - t_\Omega))). \quad (34)$$

Чаще всего, исследования на трение и изнашивание реализуются при постоянной скорости скольжения, поэтому:

$$t = \frac{l_f}{v_f}, t_\Omega = \frac{l_\Omega}{v_f}, \quad (35)$$

где v_f – скорость скольжения, l_f – путь трения, l_Ω – критическое значение пути.

Подставляя (35) в (24) получим зависимость силы трения от пути для случая одного перехода:

$$F_f(l_f) = \frac{\Delta F_f}{1 + \exp\left(-\frac{\psi_t}{v_f} \cdot (l_f - l_\Omega)\right)}. \quad (36)$$

Введём новое обозначение:

$$\psi_l = \frac{\psi_t}{v_f}, \quad (37)$$

где ψ_l – резкость фрикционного перехода от одного режима трения к другому по пути. Таким образом, резкость фрикционного перехода по пути равна отношению резкости фрикционного перехода по времени к скорости скольжения.

Подставляя (37) в (36), получим зависимость силы трения от пути, аналогичную (24):

$$F_f(l_f) = \frac{\Delta F_f}{1 + \exp(-\psi_l \cdot (l_f - l_\Omega))}. \quad (38)$$

По аналогии, интенсивность изменения силы трения по пути определяется следующим образом:

$$\Omega_l(l_f) = \frac{dF_f}{dl_f} = \frac{\Delta F_f \cdot \psi_l \cdot \exp(-\psi_l \cdot (l_f - l_\Omega))}{[1 + \exp(-\psi_l \cdot (l_f - l_\Omega))]^2}. \quad (39)$$

где Ω_l – интенсивность изменения силы трения по пути. Также по аналогии максимальная интенсивность изменения силы трения по пути (для случая одного перехода):

$$\Omega_{lmax} = \frac{\Delta F_f \cdot \psi_l}{4}, \quad (40)$$

откуда резкость фрикционного перехода по пути равна:

$$\psi_l = \frac{4\Omega_{lmax}}{\Delta F_f}. \quad (41)$$

Разделив (26) на (40) и используя (37) получим:

$$\Omega_{tmax} = v_f \cdot \Omega_{lmax}. \quad (42)$$

Связь между резкостью фрикционного перехода по пути с длиной интервала фрикционного перехода:

$$\psi_l \cong \frac{4\sqrt{2\pi}}{\Delta l_f}. \quad (43)$$

где Δl_f – длина интервала фрикционного перехода (участка пути, на котором произошел фрикционный переход).

Подставляя (43) в (40) получим:

$$\Omega_{lmax} \cong \frac{\Delta F_f \cdot \sqrt{2\pi}}{\Delta l_f}. \quad (44)$$

Интегрируя функцию (38), принимая постоянную интегрирования равной нулю, получим зависимость работы силы трения от пути:

$$W_f(l_f) = \frac{\Delta F_f}{\psi_l} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_l \cdot (l_f - l_\Omega))), \quad (45)$$

где W_f – работа силы трения скольжения.

Значению пути l_Ω соответствует следующая работа силы трения:

$$W_f(l_\Omega) = \frac{\Delta F_f}{\psi_l} \cdot \ln(2). \quad (46)$$

Разделив (45) на (46) и используя формулу перехода к новому основанию $\log_a b = \frac{\log_c b}{\log_c a}$ получим:

$$W_f(l_f) = W_f(l_\Omega) \cdot \log_2 \left(1 + \exp(\psi_l \cdot (l_f - l_\Omega)) \right). \quad (47)$$

Из формул (34) и (47) получаем очевидную взаимосвязь работы и импульса силы трения:

$$W_f = I_f \cdot \frac{\psi_t}{\psi_l} = I_f \cdot v_f. \quad (48)$$

Для случая нескольких переходных процессов зависимость динамики изменения силы трения можно описать следующей формулой:

$$F_f(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi}}{1 + \exp(-\psi_{ti} \cdot (t - t_{\Omega i}))}, \quad (49)$$

где ΔF_{fi} – приращение силы трения от одного стационарного значения к другому при i -м переходном процессе; ψ_{ti} – резкость фрикционного перехода (по времени) от одного режима трения к другому при i -м переходном процессе; $t_{\Omega i}$ – критическое значение времени при i -м переходном процессе; n – количество переходных процессов. Для описания более сложных переходных процессов в числителе (49) будет стоять $\Delta F_{fi}(t) \neq const$ некоторая функция времени.

Соответственно интенсивность изменения силы трения по времени, при наличии нескольких переходных процессов равна:

$$\Omega_t(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi} \cdot \psi_{ti} \cdot \exp(-\psi_{ti} \cdot (t - t_{\Omega i}))}{[1 + \exp(-\psi_{ti} \cdot (t - t_{\Omega i}))]^2}. \quad (50)$$

Зависимость импульса силы трения от времени, при наличии нескольких переходных процессов, можно определить по формуле:

$$I_f(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi}}{\psi_{ti}} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{ti} \cdot (t - t_{\Omega i}))). \quad (51)$$

По аналогии, зависимость силы трения от пути для случая нескольких переходных процессов:

$$F_f(l_f) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi}}{1 + \exp(-\psi_{li} \cdot (l_f - l_{\Omega i}))}, \quad (52)$$

где ψ_{li} – резкость фрикционного перехода (по пути) от одного режима трения к другому при i -м переходном процессе; $l_{\Omega i}$ – критическое значение пути при i -м переходном процессе. Для описания более сложных переходных процессов в числителе (52) будет стоять $\Delta F_{fi}(l_f) \neq const$ некоторая функция пути.

Интенсивность изменения силы трения по пути при n переходах:

$$\Omega_l(l_f) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi} \cdot \psi_{li} \cdot \exp(-\psi_{li} \cdot (l_f - l_{\Omega i}))}{[1 + \exp(-\psi_{li} \cdot (l_f - l_{\Omega i}))]^2}. \quad (53)$$

Зависимость работы силы трения от пути при n переходах:

$$W_f(l_f) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_{fi}}{\psi_{li}} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{li} \cdot (l_f - l_{\Omega i}))). \quad (54)$$

Приведённые соотношения описывают динамику процесса трения при самопроизвольных изменениях состояний области контакта.

Для аппроксимации экспериментальных точек с использованием зависимости (49) при $\Delta F_{fi}(t) = const$ (соответственно и зависимости (52)) реализуется следующий алгоритм действий:

1) в результате детального рассмотрения экспериментальных точек выделяются области, которые аппроксимируются сигмоидальными (обобщёнными логистическими) функциями;

2) далее выделяются участки, которые аппроксимируются постоянными функциями;

3) посредством использования метода наименьших квадратов реализуется аппроксимация n выделенных участков постоянными функциями:

$$g_i(t) = F_{fi}, i = 1, 2, \dots, n,$$

откуда, посредством разностей, находим коэффициенты в числителях (49):

$$\Delta F_{fi} = F_{fi} - F_{fi-1};$$

4) сигмоидальные (обобщённые логистические) функции, по отдельности аппроксимирующие точки в выделенных изначально областях, записываются в общем виде следующим образом:

$$F_k(t) = \sum_{j=1}^{k-1} \Delta F_{fj} + \frac{\Delta F_{fk}}{1 + \exp(-\psi_{tk}(t - t_{\Omega k}))}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (55)$$

При использовании метода Карла Гаусса каждая из k сигмоидальных функций (55) приводится к линейному виду относительно ψ_{tk} и $t_{\Omega k}$:

$$\ln \left[\frac{\Delta F_{fk} - (F_k(t) - \sum_{j=1}^{k-1} \Delta F_{fj})}{F_k(t) - \sum_{j=1}^{k-1} \Delta F_{fj}} \right] = -\psi_{tk}(t - t_{\Omega k}), k = 1, 2, \dots, n. \quad (56)$$

Неизвестные характеристики ψ_{tk} и $t_{\Omega k}$ находятся из построения прямой среднееквдратичной регрессии по выражению (56).

5) выявленные параметры подставляются в (49) (соответственно в (52)), в результате чего определяется аналитическое и последующее графическое представление результатов экспериментального исследования.

Далее приведена, разработанная автором, математическая модель закона динамики изнашивания В.Ф. Лоренца (рис.8).

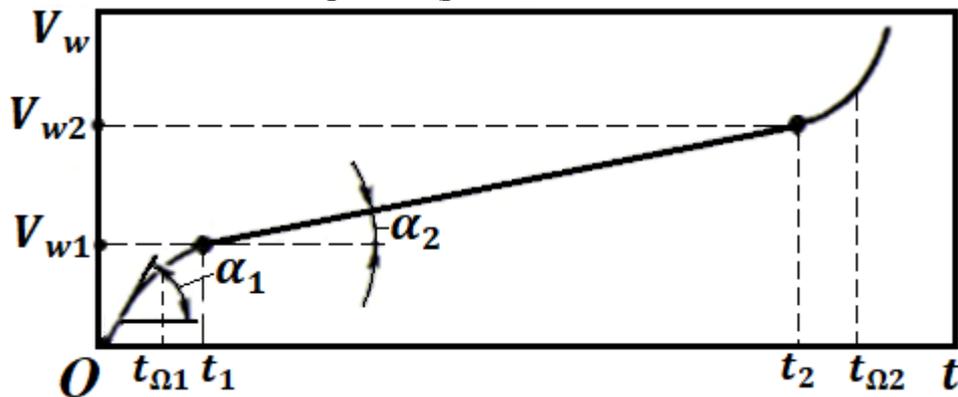


Рис.12. Закон динамики изнашивания В.Ф. Лоренца

Закон динамики изнашивания В.Ф. Лоренца можно аналитически представить в виде следующей трёхкомпонентной математической модели:

$$V_w(t) = J_{t0} \cdot t + \frac{\Delta J_{t1}}{\Upsilon_{t1}} \cdot \ln(1 + \exp(\Upsilon_{t1} \cdot (t - t_{\Omega 1}))) + \frac{\Delta J_{t2}}{\Upsilon_{t2}} \times \ln(1 + \exp(\Upsilon_{t2} \cdot (t - t_{\Omega 2}))), \quad (57)$$

где V_w — объёмный износ; J_{t0} — начальная скорость изнашивания (начальная интенсивность изнашивания по времени); $\Delta J_{t1} = (J_{t1} - J_{t0})$ — разность скоростей изнашивания в начале и в конце периода приработки; Υ_{t1} — резкость изменения скорости изнашивания в процессе перехода от приработки к нормальному режиму; $t_{\Omega 1}$ — момент времени, соответствующий максимальному ускорению изнашивания в период приработки; $\Delta J_{t2} = (J_{t2} - J_{t1})$ — разность скоростей изнашивания нормального периода работы и периода аварийного износа; Υ_{t2} — резкость изменения скорости изнашивания в процессе перехода от нормального режима к аварийному периоду; $t_{\Omega 2}$ — момент времени, соответствующий максимальному ускорению изнашивания в процессе перехода от нормального режима к аварийному периоду. Отметим, что для закона Владимира Федоровича Лоренца в модели (57) $J_{t0} > 0$, $\Delta J_{t1} < 0$ и $\Delta J_{t2} > 0$.

Дифференцируя (57) получим зависимость скорости изнашивания (интенсивности изнашивания по времени) от времени:

$$J_t(t) = J_{t0} + \frac{\Delta J_{t1}}{1 + \exp(-\gamma_{t1} \cdot (t - t_{\Omega 1}))} + \frac{\Delta J_{t2}}{1 + \exp(-\gamma_{t2} \cdot (t - t_{\Omega 2}))}. \quad (58)$$

Математическая модель (57), при различных значениях входящих в неё параметров J_{t0} , ΔJ_{t1} и ΔJ_{t2} позволяет описать шесть типов закономерностей изнашивания, выделенных М.М. Тененбаумом.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на выявление закономерностей трения скольжения твёрдых тел в различных средах, обусловленных изменением состояния фрикционного контакта под действием нормальной нагрузки.

Выявлены закономерности изменения силы трения с ростом нагрузки при скольжении твёрдых тел в среде смазочных масел с дисперсными частицами гидросиликата магния $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ (схема испытаний «колодка-ролик», частота вращения подвижного образца 300 мин^{-1} , время испытания 240 мин). Результаты исследования трения скольжения стали 35 по бронзе БРАЖ9-4 в среде смазочного масла Addinol Zylinderöl Z1500 с дисперсными частицами гидросиликата магния (размер дисперсных частиц добавки составлял в среднем 10 мкм, а концентрация добавки в смазочном масле составляла 0,5 и 1% по массе) показаны на рис.9.

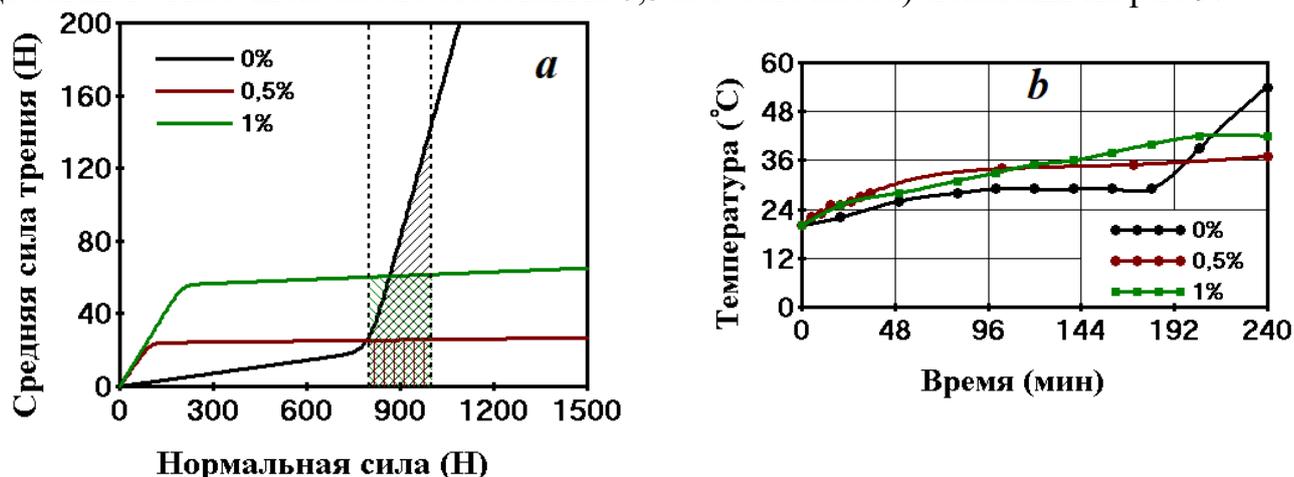


Рис.9. Графики зависимости силы трения от нормальной нагрузки (а) и температуры смазочного материала от времени испытания (б)

Графики зависимости, показанные на рис.9а соответствуют уточнённому закону трения и аналитически выражаются в виде (16), при значениях параметров, приведённых в таблице 1.

Таблица 1. Параметры модели (16), выражающей графики на рис.9а

Конц, %	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_{Ω}, H
0	0,024	0	0,6	0,05	800
0,5	0,24	0	-0,238	0,09	100
1	0,28	0	-0,273	0,07	200

Результаты исследования трения скольжения стали 35 по стали Р6АМ5 в среде масла М8В с частицами $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ (размер частиц в среднем 20мкм, а концентрация добавки в смазочном масле 0,5% по массе) показаны на рис.10.

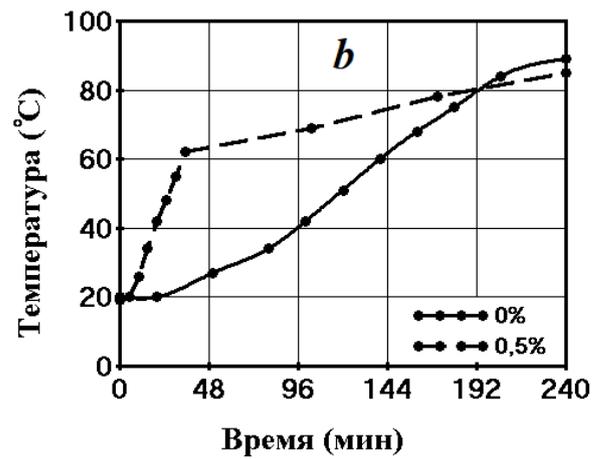


Рис.10. Графики зависимости силы трения от нормальной нагрузки (а) и температуры смазочного материала от времени испытания (b)

Графики зависимости, показанные на рис.10а также соответствуют уточнённому закону трения и аналитически выражаются в виде (16), при значениях параметров, приведённых в таблице 2.

Таблица 2. Параметры модели (16) для графиков на рис.10а

Конц, %	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_Ω, H
0	0,1	0	0,14	0,5	300
0,5	0,1	0	0,097	0,5	300

Результаты исследования трения стали 3 по стали Р6АМ5 в среде смазочного масла М14Г2ТС с частицами (10 и 20мкм) $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ показаны на рис.11.

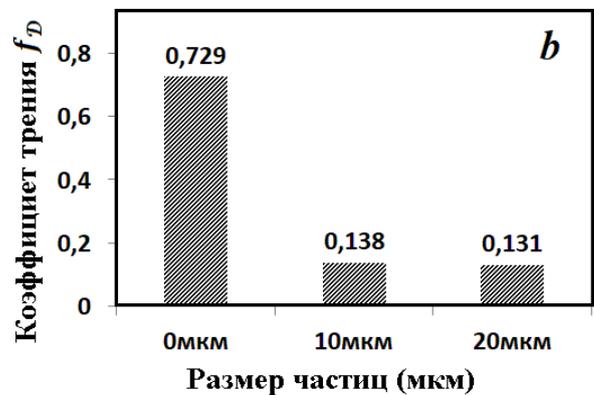
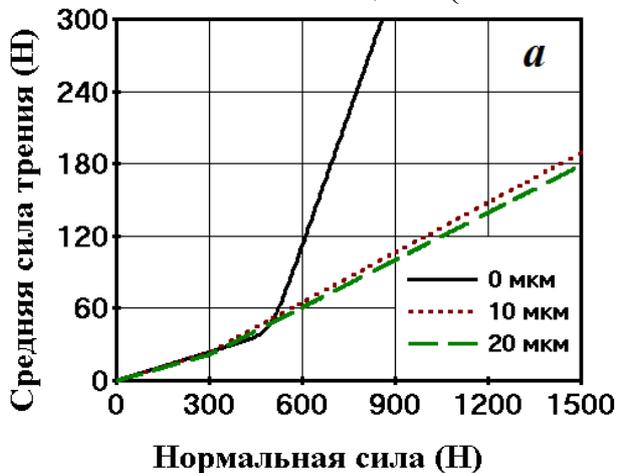


Рис.11. Графики зависимости $F_f(F_N)$ (а) и гистограмма f_D на диапазоне нагрузки [500; 1000] (b) (концентрация 1% по массе)

Графики зависимости, показанные на рис.11а аналитически выражаются в виде (16), при значениях параметров, приведённых в таблице 3.

Таблица 3. Параметры модели (16), выражающей графики на рис.11а

$d, \text{мкм}$	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_Ω, H
0	0,079	0	0,65	0,05	500
10	0,079	0	0,059	0,5	300
20	0,072	0	0,059	0,5	300

Экспериментальные исследования жидких смазочных композиций с дисперсными частицами гидросиликата магния позволили установить следующее:

- среднее значение силы трения на диапазоне нормальной силы [800; 1000] при добавлении в смазочное масло Addinol Zylinderöl Z1500 0,5% дисперсной добавки уменьшается на 69%, а при добавлении 1% – на 26%, что говорит об эффективности смазочных композиций в жёстких условиях нагружения;

- среднее значение силы трения на диапазоне нормальной силы [300; 1000] при добавлении в смазочное масло M8V 0,5% дисперсной добавки уменьшается на 13,2%, а дифференциальный коэффициент трения – на 18%, что говорит об относительно небольшом антифрикционном эффекте смазочной композиции в жёстких условиях нагружения для данной пары трения;

- дифференциальный коэффициент трения на диапазоне F_N от 500 до 1000Н при добавлении в смазочное масло M14Г2ТС 1% дисперсной добавки с частицами размером 10мкм уменьшается в 5,3 раза, а при добавлении частиц размером 20мкм – в 5,6 раза, что говорит о существенном антифрикционном эффекте.

Экспериментальные данные подтверждают образование стекловидных вторичных структур, восстанавливающих поверхности при трении тел из стали и бронзы в среде масел, содержащих частицы $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$.

Выявлены закономерности изменения силы трения с ростом нагрузки при скольжения твёрдых тел в среде Литол-24, содержащего дисперсные добавки различной природы (схема испытаний «ролик-ролик», частота вращения подвижного образца 1500 мин⁻¹, время испытания составляло 180с).

Результаты исследования трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в среде смазочного материала Литол-24 с частицами графита (0,1мм) приведены на рис.12.

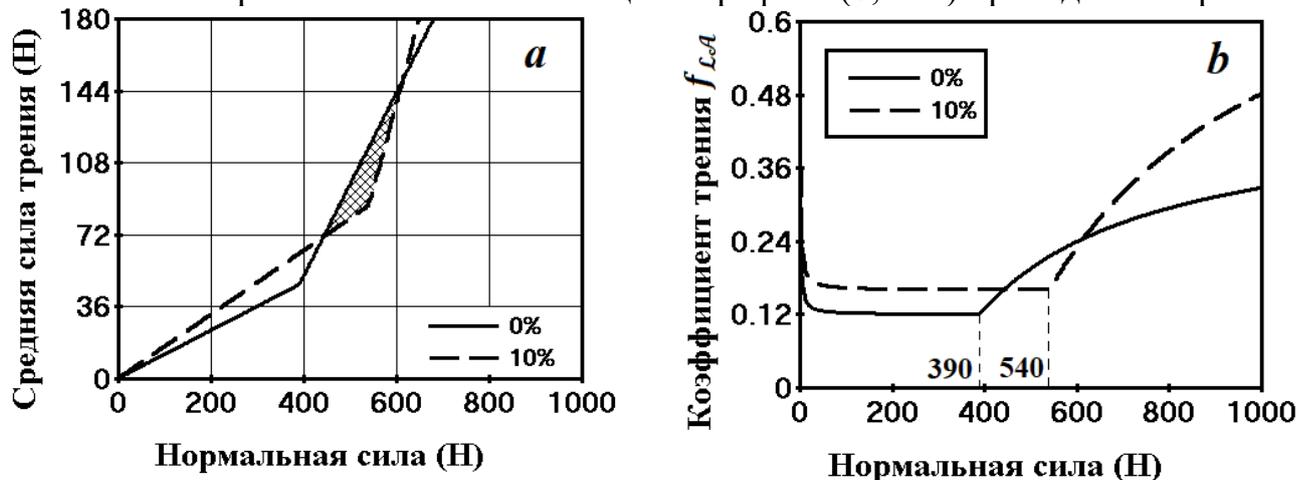


Рис.12. Зависимости силы (a) и коэффициента трения (b) от нормальной нагрузки для смазочных материалов Литол-24 и Литол-24+10%Графит

Зависимости, показанные на рис.12a аналитически выражаются в виде (16), а зависимости на рис.12b аналитически выражаются в виде (23) для $n=1$, при значениях параметров, приведённых в таблице 4.

Таблица 4. Параметры моделей (16) и (23) для графиков на рис.12

Конц, %	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_Ω, H
0	0,12	0,3	0,34	0,5	390
10	0,16	0,4	0,7	0,5	540

Результаты исследования трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в среде Литол-24 с дисперсными частицами MoS_2 (7мкм) показаны на рис.13.

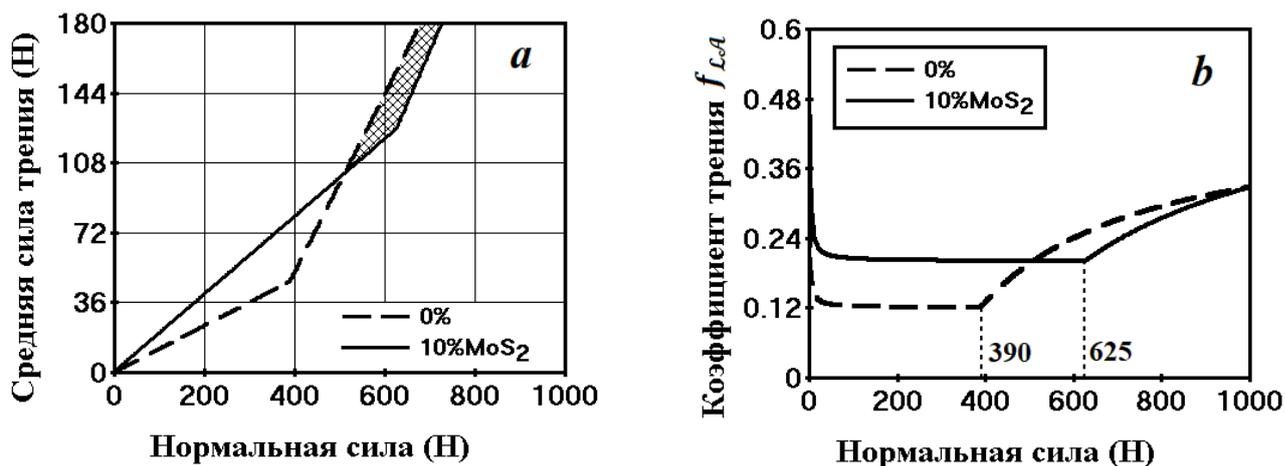


Рис.13. Графики зависимости силы и коэффициента трения от нормальной нагрузки для смазочных материалов Литол-24 и Литол-24+10%MoS₂

Зависимости, показанные на рис.13а аналитически выражаются в виде (16), а зависимости на рис.13b аналитически выражаются в виде (23) для $n=1$, при значениях параметров, приведённых в таблице 5.

Таблица 5. Параметры моделей (16) и (23) для графиков на рис.13

Конц, %	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_Q, H
0	0,12	0,3	0,34	0,5	390
10	0,2	0,5	0,34	0,5	625

Результаты исследование трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в среде Литол-24 с частицами фуллереновой сажи (8,5% C₆₀) показаны на рис.14.

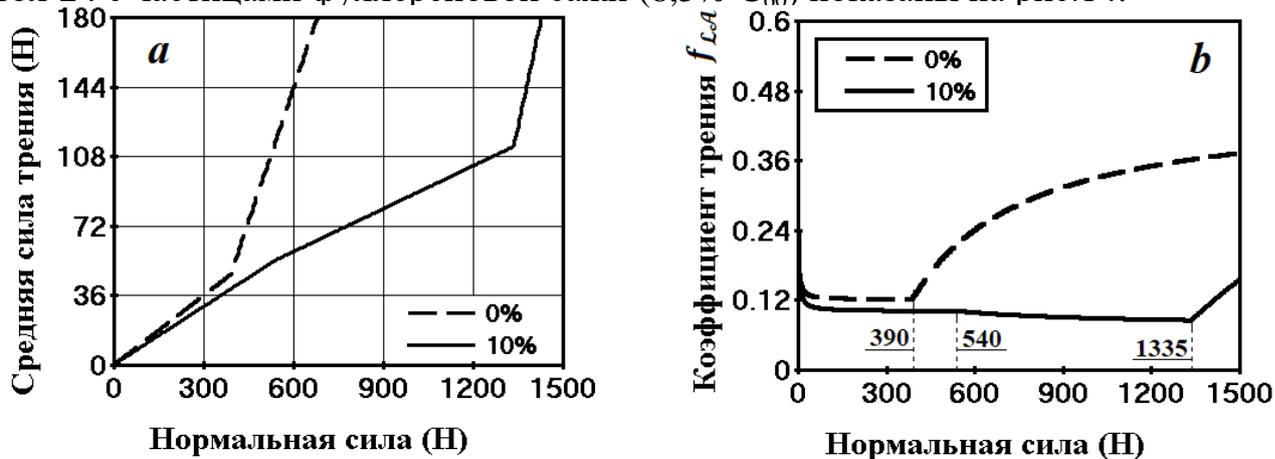


Рис.14. Графики зависимости силы и коэффициента трения от нормальной нагрузки для смазочных материалов Литол-24 и Литол-24+10%ФС

Зависимости, показанные на рис.14а аналитически выражаются в виде (17) $n=1$ и $n=2$, а зависимости на рис.14b аналитически выражаются в виде (23) для $n=2$, при значениях параметров, приведённых в таблице 6.

Таблица 6. Параметры моделей (17) и (23) для графиков на рис.14

Конц, %	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_Q, H
0	0,12	0,3	0,34	0,5	390
10	0,1	0,4	-0,026 0,65	0,5 0,5	540 1335

Зависимость силы трения, с параметрами, соответствующими концентрации 10% ФС имеет вид:

$$F_f(F_N) = 0.1F_N + 0.4 + \left(\frac{-0.026}{0.5}\right) \ln(1 + \exp(0.5(F_N - 540))) + \left(\frac{0.65}{0.5}\right) \ln(1 + \exp(0.5(F_N - 1335))). \quad (59)$$

Результаты исследования трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в среде Литол-24 с частицами Zn (40-100 мкм, 3%) и Cd (0,3-1,6мм, 2%) показаны на рис.15.

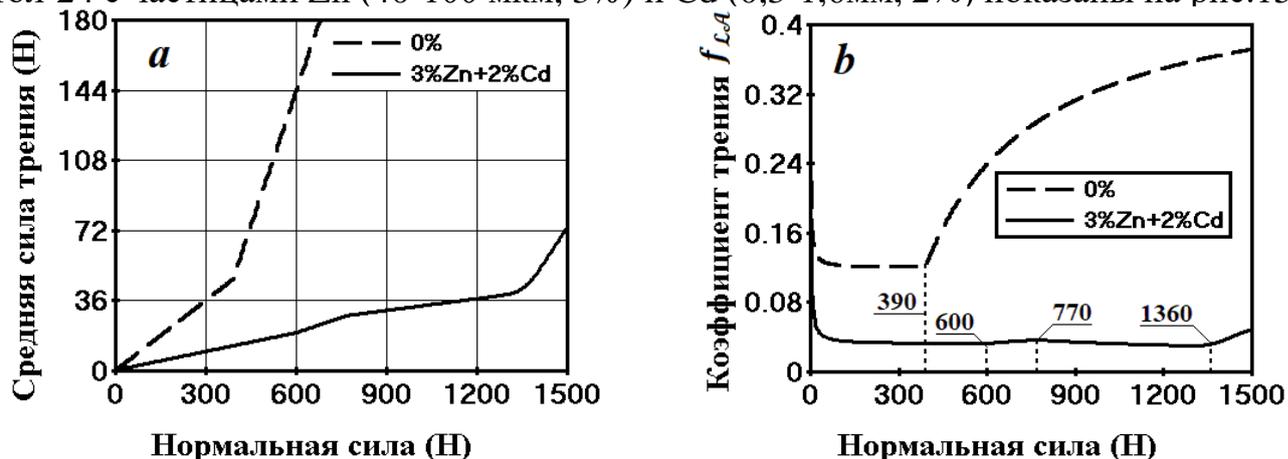


Рис.15. Графики зависимости силы и коэффициента трения от нормальной нагрузки для смазочных материалов Литол-24 и Литол-24+3%Zn+2%Cd

Зависимости, показанные на рис.15а аналитически выражаются в виде (17) $n=1$ и $n=3$, а зависимости на рис.15b аналитически выражаются в виде (23) для $n=1$ и $n=3$, при значениях параметров, приведённых в таблице 7.

Таблица 7. Параметры моделей (17) и (23) для графиков на рис.15

Конц, %	f_{D0}	F_M, H	Δf			ψ_N, H^{-1}			F_{Ω}, H		
0	0,12	0,3	0,34			0,5			390		
5	0,032	0,4	0,02	-0,032	0,22	0,5	0,5	0,05	600	770	1360

Зависимость силы трения, с параметрами, соответствующими концентрации 3% Zn+2% Cd имеет вид:

$$F_f(F_N) = 0.032F_N + 0.4 + \left(\frac{0.02}{0.5}\right) \ln(1 + \exp(0.5(F_N - 600))) + \left(\frac{-0.032}{0.5}\right) \ln(1 + \exp(0.5(F_N - 770))) + \left(\frac{0.22}{0.05}\right) \ln(1 + \exp(0.05(F_N - 1360))) \quad (60)$$

В процессе экспериментальных исследований консистентных смазочных композиционных материалов с различными дисперсными добавками было установлено, что при добавлении в пластичный смазочный материал Литол-24 дисперсных частиц:

- графита – критическая нагрузка увеличивается на 28%;
- дисульфида молибдена – критическая нагрузка увеличивается на 37% и происходит увеличение стационарного участка зависимости классического коэффициента трения от нагрузки;
- фуллереновой сажи – критическая нагрузка перед участком повреждаемости увеличивается в 3,4 раза и происходит увеличение общего стационарного участка зависимости классического коэффициента трения от нагрузки;
- цинка и кадмия – критическая нагрузка перед участком повреждаемости увеличивается в 3,5 раза и происходит увеличение общего стационарного участка зависимости классического коэффициента трения от нагрузки;

Таким образом, все полученные данные показывают увеличение несущей способности смазочного слоя и в целом подтверждают справедливость принципиальной схемы изменения коэффициента трения от нормальной нагрузки, созданной Б.И. Костецким.

Посредством оцифровки и математической обработки экспериментальных данных известных авторов (П.У. Бриджмен, Б.И. Костецкий, А.С. Ахматов, И.В. Крагельский, Г.И. Епифанов), выявлены закономерности изменения силы трения металлических материалов с ростом нагрузки.

Эмпирические закономерности изменения удельной силы трения с ростом давления при скольжении твёрдых тел из магния, платины и висмута по стали в воздушной среде (плоскость-плоскость, поворот), выявленные по данным П.У. Бриджмена, выражаются в виде следующих зависимостей:

- для трения скольжения магния по стали в среде воздуха

$$\tau_{fa} = 0.18p_a + \left(\frac{-0.157}{0.0045}\right) \ln(1 + \exp(0.0045(p_a - 1330))), \quad (61)$$

- для трения скольжения платины по стали в среде воздуха

$$\tau_{fa} = 0.21p_a + \left(\frac{-0.152}{0.003}\right) \ln(1 + \exp(0.003(p_a - 1600))), \quad (62)$$

- для трения скольжения висмута по стали в среде воздуха

$$\tau_{fa} = 0.055p_a + 5 - \left(\frac{0.0545}{0.003}\right) \ln(1 + \exp(0.003(p_a - 1100))) + \left(\frac{0.12}{0.003}\right) \ln(1 + \exp(0.003(p_a - 4100))). \quad (63)$$

Полученные зависимости (61) – (63) подтверждают справедливость математической модели (18), а расчёт с их использованием классического коэффициента трения позволяет дополнить принципиальную схему изменения коэффициента трения от нормальной нагрузки (рис.1).

Дополненная принципиальная схема (рис.16) показывает несколько видов зависимостей коэффициента $f_{\mathcal{L}\mathcal{A}}$ от нормальной нагрузки:

1. Зависимость $YBCZ$ утверждает справедливость закона Леонардо да Винчи – Амонтона:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = \frac{f_{D0} \cdot F_N}{F_N} = const. \quad (64)$$

2. Зависимость $KBCZ$ утверждает справедливость закона Леонардо да Винчи – Амонтона – Кулона:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = f_{D0} + \frac{f_{D0} \cdot F_M}{F_N}. \quad (65)$$

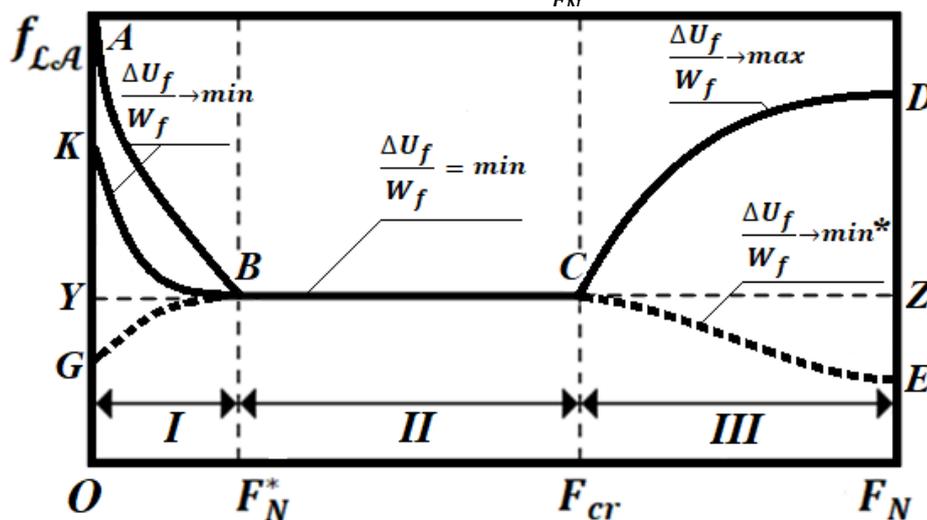


Рис.16. Дополненная принципиальная схема изменения классического коэффициента трения

3. Зависимость $YBCD$ утверждает справедливость соотношения:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = f_{D0} + \frac{\Delta f}{\psi_N \cdot F_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N \cdot (F_N - F_{\Omega}))), \Delta f > 0. \quad (66)$$

4. Зависимость *KBCD* утверждает справедливость соотношения:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = f_{D0} + \frac{f_{D0} \cdot F_M}{F_N} + \frac{\Delta f}{\psi_N \cdot F_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N \cdot (F_N - F_{\Omega}))), \Delta f > 0. \quad (67)$$

5. Зависимость *GBCE* утверждает справедливость соотношения:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = f_{D0} + \frac{\Delta f}{\psi_N \cdot F_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_N \cdot (F_N - F_{\Omega}))), \Delta f < 0. \quad (68)$$

6. Зависимость *ABCD* утверждает справедливость соотношения:

$$f_{\mathcal{L}\mathcal{A}} = f_{D0} + \frac{f_{D0} \cdot F_M}{F_N} + \frac{\Delta f_1}{\psi_{N1} \cdot F_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{N1} \cdot (F_N - F_{\Omega1}))) + \frac{\Delta f_2}{\psi_{N2} \cdot F_N} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{N2} \cdot (F_N - F_{\Omega2}))), \Delta f_1 < 0, \Delta f_2 > 0, F_{\Omega2} > F_{\Omega1}. \quad (69)$$

Вообще говоря, все шесть перечисленных зависимостей получаются из уравнения (69) при различных значениях входящих в него величин.

Действительно, полагая в (69) $F_M = 0, \Delta f_1 = 0, \Delta f_2 = 0$ мы получим зависимость (64), то есть закон Леонардо да Винчи – Амонтона. При $F_M \neq 0, \Delta f_1 = 0, \Delta f_2 = 0$ мы получим зависимость (65), то есть закон Леонардо да Винчи – Амонтона – Кулона. При $F_M = 0, \Delta f_1 > 0, \Delta f_2 = 0$ мы получим зависимость (66). При $F_M \neq 0, \Delta f_1 > 0, \Delta f_2 = 0$ мы получим зависимость (67). При $F_M = 0, \Delta f_1 < 0, \Delta f_2 = 0$ мы получим зависимость (68) и, наконец, при $F_M \neq 0, \Delta f_1 < 0, \Delta f_2 > 0, F_{\Omega2} > F_{\Omega1}$ мы приходим собственно к зависимости (69).

Эмпирическая закономерность изменения силы трения с ростом нагрузки при скольжении твёрдого тела из железа по железу в воздушной среде (плоскость-плоскость, поступательное), выявленная по данным Б.И. Костецкого, выражается в виде следующей зависимости:

$$F_f(F_N) = 0.75 \cdot F_N + 250 + \left(\frac{2.34}{0.5}\right) \ln(1 + \exp(0.5(F_N - 500))). \quad (70)$$

График функции (70) отражает зависимость четвёртого типа *KBCD* (рис.16). При этом участок *BC* очень мал по длине, что говорит о быстром переходе от приспособляемости пары трения к её повреждаемости с ростом нормальной нагрузки. Это обстоятельство связано, по-видимому, со сродством материалов.

Закономерности изменения удельной силы предельного статического трения с ростом давления при трении тел из стали 12X1 (плоскость-плоскость, поступательное), разделённых нанослоями стеариновой кислоты, выявленные по данным А.С. Ахматова, соответствуют математической модели (18). Значения параметров модели (18) для различной толщины слоёв стеариновой кислоты приведены в таблице 8.

Таблица 8. Параметры модели (18) по данным А.С. Ахматова

h_l , нм	f_{D0}	τ_{Ma} , МПа	Δf	ψ_{Na} , МПа ⁻¹	$p_{\Omega a}$, МПа
10	0,19	7,5	0,15	0,1	235
20	0,15	5,5	0,18	0,1	235
40	0,13	3,2	0,26	0,1	285

С учётом характера изменения выявленных фрикционных характеристик зависимость средней удельной силы предельного статического трения от номинального давления и толщины слоя твёрдой стеариновой кислоты аналитически можно выразить следующим образом:

$$\tau_{fa}(p_a, h_l) = \left(0.11 + \frac{0.8}{h_l}\right) \cdot p_a + 9.8 \exp(-0.028h_l) + \left(\frac{0.125 \exp(0.0183h_l)}{0.1}\right) \ln \left(1 + \exp \left(0.1 \left(p_a - (0.083h_l^2 - 2.5h_l + 251.7)\right)\right)\right). \quad (71)$$

С увеличением толщины слоя твёрдой стеариновой кислоты трение в целом уменьшается, в частности снижаются значения начального дифференциального коэффициента трения и молекулярной составляющей удельной силы трения, что связано с экранированием силового поля поверхностей трения.

Эмпирические закономерности изменения удельной силы трения с ростом фактического давления при трении тел из стали 45 по твёрдому сплаву ВК6 (диск-ребро куба, вращение), разделённых граничным слоем дистиллятного масла селективной очистки, выявленные по данным И.В. Крагельского, соответствуют математической модели (18). Значения параметров модели (18) для различных скоростей скольжения приведены в таблице 9.

Таблица 9. Параметры модели (18) по данным И.В. Крагельского

$v_f, \text{м/с}$	f_{D0}	$\tau_{Mr}, \text{МПа}$	Δf	$\psi_{Nr}, \text{МПа}^{-1}$	$p_{\Omega r}, \text{МПа}$
0,126	0,07	18,3	0,23	0,05	1417
1	0,06	87	0,57	0,05	1165
3	0,066	50	0,21	0,05	1078

Соответствующие таблице 9 графики функции $f_{LA} = f_{LA}(p_r)$ отражают зависимость четвёртого типа *KBCD* (рис.16). При этом участок *BC* мал по длине, что говорит о быстром переходе от приспособляемости пары трения к повреждаемости (паталогическому трению по Б.И. Костецкому). Это обстоятельство связано с разрывом граничного смазочного слоя в жёстких условиях испытаний.

Эмпирическая закономерность изменения удельной силы трения с ростом номинального давления при резании тел из алюминия стальным резцом в воздушной среде, выявленная по данным Г.И. Епифанова, выражается в виде следующей зависимости:

$$\tau_{fa} = 1.12 \cdot p_a + \left(\frac{-1.09}{4.9} \right) \ln(1 + \exp(4.9(p_a - 1.97))). \quad (72)$$

Имеет место закономерность, выражаемая кривой *YBCE* (рис.16), что говорит о практическом отсутствии участка приспособляемости пары трения. Это обстоятельство связано, по-видимому, с быстрыми процессами приработки.

Закономерности изменения силы трения с ростом нагрузки при скольжении нанесённых при различных температурах покрытий из полиамида П-54 по поверхности из стали 45 (ролик-ролик, вращение) в воздушной среде соответствуют математической модели (16). Значения параметров модели (16) для различных температур нанесения покрытий приведены в таблице 10.

Таблица 10. Параметры модели (16) для различных температур нанесения покрытий из полиамида П-54

$T, ^\circ\text{C}$	f_{D0}	F_M, H	Δf	ψ_N, H^{-1}	F_{Ω}, H
260	0,025	0	0,29	0,09	1190
280	0,025	0	0,045	0,1	1100
300	0,0585	0	0,28	0,05	950
340	0,035	0	0,027	0,1	600

Зависимость средней силы трения от нормальной нагрузки и температуры нанесения покрытия из полиамида П-54 можно выразить следующим образом:

$$F_f(F_N, T) = \left(0.025 + \frac{0.037}{1 + \exp(-0.35(T-290))} - \frac{0.029}{1 + \exp(-0.12(T-320))} \right) F_N + \left(\frac{3.435 - 0.0121T + \frac{0.024}{2.9} \ln(1 + \exp(2.9(T-280))) - \frac{0.0184}{2.9} \ln(1 + \exp(2.9(T-300)))}{0.085} \right) \ln(1 + \exp(0.085(F_N - 12423 \exp(-0.0088T)))) \quad (73)$$

Соответствующие таблице 10 графики функции $f_{L\mathcal{A}} = f_{L\mathcal{A}}(F_N)$ отражают зависимость четвёртого типа $YBCD$ (рис.16).

Таким образом, разработанные математические модели зависимости силы (удельной силы) трения и коэффициента трения от нормальной нагрузки (давления) подтверждаются как экспериментальными результатами автора работы, так и в результате анализа экспериментальных данных различных известных трибологов.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на выявление закономерностей динамики изменения силы трения скольжения и изнашивания твёрдых тел в различных средах при изменениях состояний фрикционного контакта.

Выявлены закономерности динамики изменения силы трения скольжения твёрдых тел (четырёхшариковая машина трения, ГОСТ 9490–75) в среде смазочных масел: И-40А; GAZPROMNEFT API GL-4 80W-85; MTF GL4 SAE 75W-90; ACF GEAR OIL API GL-4 G-BOX 75W-90; ТНК ТРАНС ГИПОИД 80W-90 API GL-5.

Зависимость силы трения от пути трения при скольжении шаров из стали ШХ15 в среде смазочного масла И-40А выражается функцией, соответствующей математической модели (52):

$$F_f = \frac{25.5}{1+\exp(-3(l_f-0.1))} + \frac{8}{1+\exp(-0.3(l_f-135))} - \frac{4.5}{1+\exp(-0.03(l_f-320))} + \frac{3.5}{1+\exp(-0.03(l_f-500))} - \frac{2.5}{1+\exp(-0.03(l_f-900))} + \frac{3.5}{1+\exp(-0.03(l_f-1300))} + \frac{2}{1+\exp(-0.01(l_f-1450))}. \quad (74)$$

График функции (74) показан на рисунке 17.

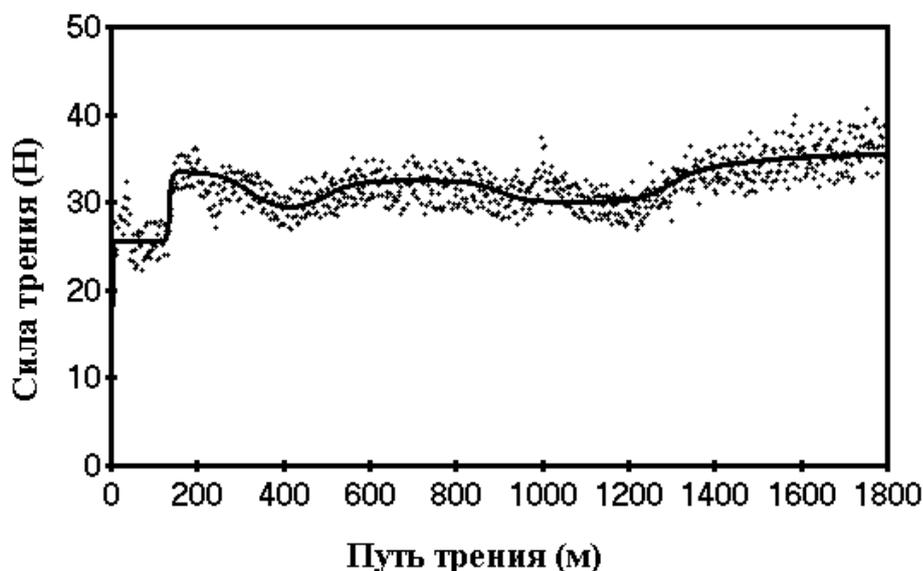


Рис.17. Зависимость силы трения скольжения от пути при скольжении в среде смазочного масла И-40А

Функцию (74) удобно представить в виде матрицы параметров (табл.11). Соответственно параметры функциональных зависимостей для остальных смазочных масел приведены в таблице 11.

**Таблица 11. Значения параметров (52) для трения скольжения
в среде исследуемых смазочных масел**

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7
Смазочное масло И-40А							
ΔF_{fi}	25,5	8	-4,5	3,5	-2,5	3,5	2
ψ_{li}	3	0,3	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01
$l_{\Omega i}$	0,1	135	320	500	900	1300	1450
Смазочное масло GAZPROMNEFT API GL-4 80W-85							
ΔF_{fi}	28	-0,3	0,3	0,3	0,3	0	0
ψ_{li}	3	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0
$l_{\Omega i}$	0,3	150	600	1400	1600	1600	1600
Смазочное масло MTF GL4 SAE 75W-90							
ΔF_{fi}	24	1,7	-3,6	-1,34	0	0	0
ψ_{li}	3	0,06	0,01	0,01	0	0	0
$l_{\Omega i}$	0,3	110	290	600	600	600	600
Смазочное масло ACF GEAR OIL API GL-4 G-BOX 75W-90							
ΔF_{fi}	28,7	-0,77	0,35	0,32	0,39	0	0
ψ_{li}	3	0,03	0,03	0,03	0,03	0	0
$l_{\Omega i}$	0,1	80	400	800	1100	1100	1100
Смазочное масло ТНК ТРАНС ГИПОИД 80W-90 API GL-5							
ΔF_{fi}	30,3	-2,7	-0,39	0,7	0	0	0
ψ_{li}	3	0,03	0,03	0,03	0	0	0
$l_{\Omega i}$	0,1	65	600	1000	1000	1000	1000

Таким образом, изменение силы трения скольжения тел из стали ШХ15 в различных жидких смазочных средах имеет поли-сигмоидальный характер, причём переходные процессы, обусловленные изменением физико-химического состояния области контакта, могут приводить как к увеличению, так и к снижению сопротивления скольжению. Функция (52) хорошо аппроксимирует экспериментальные точки, и выражает динамику изменения средней силы трения. Соответственно интегрирование (52) в пределах всего пути трения даёт достаточно точное значение средней интегральной работы силы трения, что позволяет повысить точность расчёта мнимой плотности энергии трения (по Фляйшеру).

Выявлены закономерности трения скольжения пористых материалов на основе железа и меди по стали ШХ15 (ролик-плоскость, вращение), пропитанных смазочным маслом марки Kluber Constant GLY 2100 с дисперсными частицами фторированного графена.

Закономерности трения скольжения пористого материала на основе железа, пропитанного смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена, выражаются в виде следующих зависимостей:

- для трения в среде базового масла Kluber Constant GLY 2100

$$F_f(t) = \frac{0.039t+27}{1+\exp(-0.3(t-8))} - \frac{0.039t-10}{1+\exp(-0.3(t-250))} \quad (76)$$

- для трения в среде базового масла с 0,01% графена (по массе)

$$F_f(t) = \frac{25}{1+\exp(-0.35(t-5))} - \frac{1.5}{1+\exp(-0.35(t-35))} \quad (77)$$

- для трения в среде базового масла с 0,1% графена:

$$F_f(t) = \frac{22.5}{1+\exp(-0.21(t-10))} - \frac{0.8}{1+\exp(-0.35(t-55))} + \frac{0.019t-7}{1+\exp(-0.35(t-370))} \quad (78)$$

Закономерности трения пористого композиционного материала на основе меди, содержащего масло с частицами графена, выражаются в виде зависимостей:

- для трения в среде базового масла Kluber Constant GLY 2100

$$F_f(t) = \frac{18}{1+\exp(-7.3(t-0.5))} + \frac{10.7}{1+\exp(-0.55(t-3))} + \frac{2}{1+\exp(-2.1(t-17))} - \frac{1.4}{1+\exp(-0.5(t-100))}, \quad (79)$$

- для трения в среде базового масла с 0,01% графена (по массе)

$$F_f(t) = \frac{21.5}{1+\exp(-0.47(t-5))} + \frac{0.39}{1+\exp(-0.37(t-330))}, \quad (80)$$

- для трения в среде базового масла с 0,1% графена:

$$F_f(t) = \frac{21.3}{1+\exp(-0.47(t-5))} - \frac{0.8}{1+\exp(-0.37(t-270))}. \quad (81)$$

Экспериментальные исследования трения скольжения пористых тел из железа и меди, пропитанных смазочным маслом с дисперсными частицами фторированного графена показали следующее:

- при трении пористого тела из железа по стальной поверхности, средний коэффициент трения в случае добавления в масло 0,01% агрегатов из чешуек фторированного графена уменьшается на 32,6%, а при добавлении 0,1% – на 36%;

- при трении пористого тела из меди по стальной поверхности, средний коэффициент трения в случае добавления в масло 0,01% агрегатов из чешуек фторированного графена уменьшается на 27%, а при добавлении 0,1% – на 30%.

- разработанная формула (49) хорошо аппроксимирует экспериментальные точки, и выражает динамику изменения средней силы трения.

Выявлены закономерности динамики трения композиционного материала с матрицей из линейного полиимида с шарнирными развязками А-ООО и наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама (60x5нм) по гладкой поверхности из стали 12X1 (плоскость-плоскость, поступательное движение, нормальная нагрузка 70Н, скорость скольжения 0,1мм/с).

Зависимость средней силы трения от пути для матрицы имеет вид:

$$F_f(l_f) \approx \frac{6+0.34l_f}{1+27\exp(-16l_f)}. \quad (82)$$

Интегрируя (82) в пределах всего пути, получаем значение средней работы силы трения при испытании А-ООО:

$$W_f = \int_0^{10} F_f(l_f) dl_f \approx \int_0^{10} \frac{6+0.34l_f}{1+27\exp(-16l_f)} dl_f \approx 75,74 \text{ Н} \cdot \text{мм}. \quad (83)$$

Зависимость средней силы трения от пути для покрытия А-ООО+5%WSe₂, выражается функцией:

$$F_f(l_f) \approx \frac{4.65+0.129l_f}{1+2.5\exp(-3,5l_f)}. \quad (84)$$

Интегрируя (84) в пределах всего пути, получаем значение средней работы силы трения при испытании А-ООО+5%WSe₂:

$$W_f = \int_0^{10} \bar{F}_f(l_f) dl_f \approx \int_0^{10} \frac{4.65+0.129l_f}{1+2.5\exp(-3,5l_f)} dl_f \approx 51,27 \text{ Н} \cdot \text{мм}. \quad (85)$$

Из полученных результатов следует, что средняя работа силы трения при испытании материала А-ООО+5%WSe₂ составила на 32% меньше, чем при испытании матрицы, что говорит меньших энергетических потерях и хороших антифрикционных свойствах композита, обусловленных наличием равномерно распределённых наночастиц WSe₂.

Выявлены закономерности сверхмедленного трения (скорость скольжения 37нм/с) гладких поверхностей из стали 12X1 (рис.18).

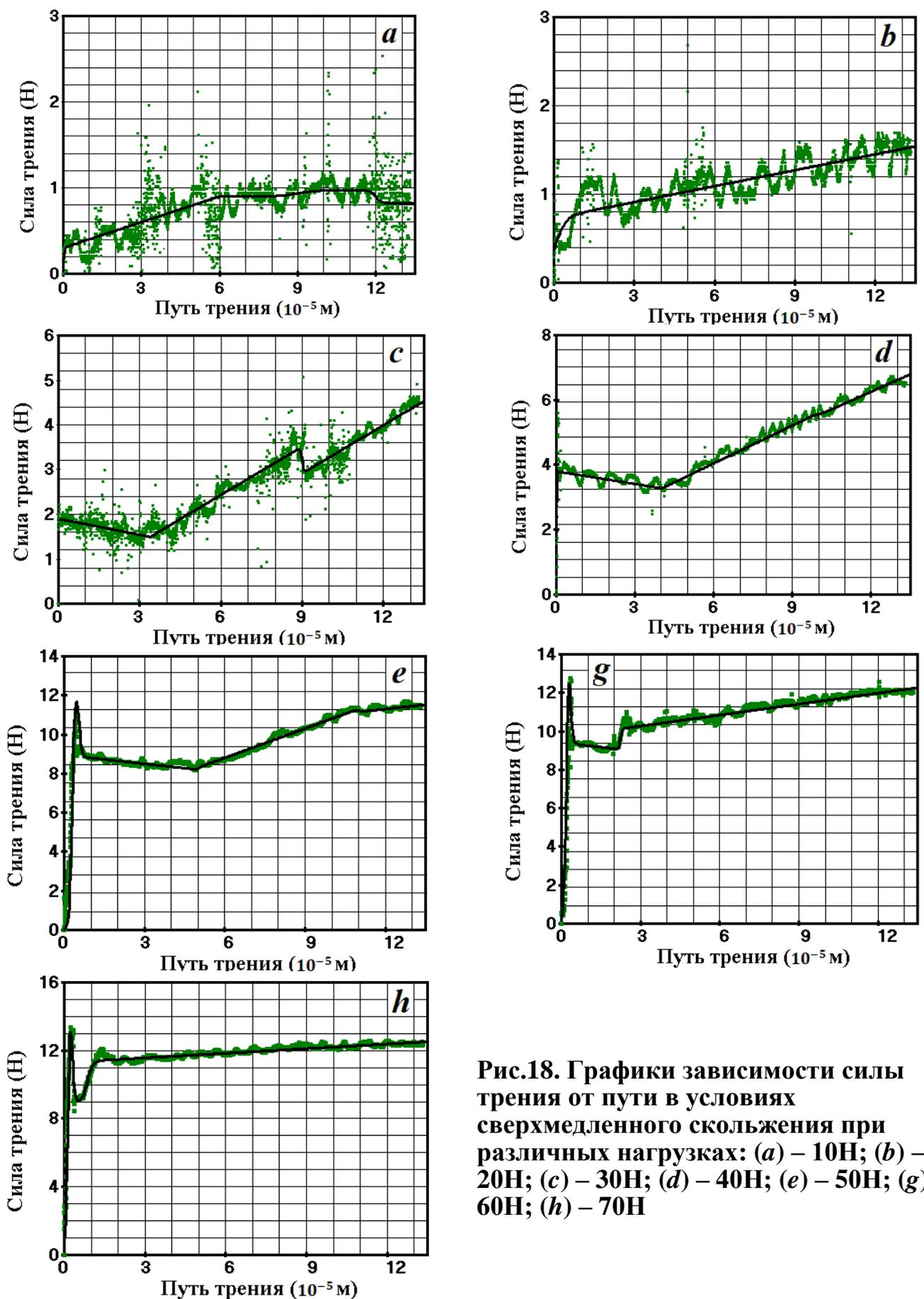


Рис.18. Графики зависимости силы трения от пути в условиях сверхмедленного скольжения при различных нагрузках: (a) – 10Н; (b) – 20Н; (c) – 30Н; (d) – 40Н; (e) – 50Н; (g) – 60Н; (h) – 70Н

Графики, показанные на рис.18, хорошо описываются формулой (52) с линейными и постоянными функциями в числителях. В частности, зависимость

средней силы трения от пути при нормальной нагрузке 10Н (рис.18а), с использованием (52), можно выразить функцией:

$$F_f = \frac{0.00001l_f + 0.3}{1 + \exp(-0.003l_f)} - \frac{0.00001l_f - 0.6}{1 + \exp(-0.003(l_f - 60000))} + \frac{0.07}{1 + \exp(-0.0003(l_f - 90000))} - \frac{0.15}{1 + \exp(-0.001(l_f - 120000))}. \quad (86)$$

Параметры функциональных зависимостей для всех нормальных нагрузок приведены в таблице 12.

Таблица 12

<i>i</i>	1	2	3	4
Нормальная нагрузка 10Н				
ΔF_{fi}	$0.00001l_f + 0.3$	$0.6 - 0.00001l_f$	0.07	-0.15
ψ_{li}	0.003	0.003	0.0003	0.001
$l_{\Omega i}$	0	60000	90000	120000
Нормальная нагрузка 20Н				
ΔF_{fi}	$0.000006 \cdot l_f + 0.73$	0	0	0
ψ_{li}	0.0005	0	0	0
$l_{\Omega i}$	0	0	0	0
Нормальная нагрузка 30Н				
ΔF_{fi}	$-0.000012l_f + 1.9$	$0.000048l_f - 1.63$	-0.6	0
ψ_{li}	0.03	0.03	0.003	0
$l_{\Omega i}$	0	34000	90000	90000
Нормальная нагрузка 40Н				
ΔF_{fi}	$-0.000013l_f + 3.8$	$0.000052l_f - 2.1$	$-0.000003l_f + 0.23$	0
ψ_{li}	0.03	0.01	0.001	0
$l_{\Omega i}$	0	40000	100000	100000
Нормальная нагрузка 50Н				
ΔF_{fi}	$0.00001l_f + 12.7$	$-0.000025l_f - 3.75$	$0.000065l_f - 3.15$	$3.7 - 0.000035l_f$
ψ_{li}	0.002	0.002	0.002	0.002
$l_{\Omega i}$	3000	5500	50000	110000
Нормальная нагрузка 60Н				
ΔF_{fi}	$0.00001l_f + 21.7$	$-0.000025l_f - 12.3$	$0.000034l_f + 0.3$	0
ψ_{li}	0.002	0.002	0.003	0
$l_{\Omega i}$	2100	3000	22400	22400
Нормальная нагрузка 70Н				
ΔF_{fi}	$0.00001l_f + 22.1$	$-0.00001l_f - 13.2$	$0.000009l_f + 2.4$	0
ψ_{li}	0.002	0.002	0.001	0
$l_{\Omega i}$	1600	2600	8500	8500

Интегрированием полученных при различных нагрузках зависимостей силы трения от пути в пределах всего пути трения $\Delta l_f = 133200$ нм определили значения средних работ трения. Далее рассчитали значения средних сил трения:

$$\bar{F}_f = \frac{W_f}{\Delta l_f}. \quad (87)$$

Результаты проведённых расчётов приведены в таблице 13.

Таблица 13

$F_N, \text{Н}$	$W_f, \text{Н} \cdot \text{мм}$	$\bar{F}_f, \text{Н}$
10	102855.6	0.77
20	149431	1.122
30	357000	2.68
40	610753	4.585
50	1262303	9,48
60	1436615.5	10,785
70	1562835.6	11.73

На основании полученных данных (табл.13) построили графики зависимости средней силы и коэффициентов трения от нормальной нагрузки (рис.19).

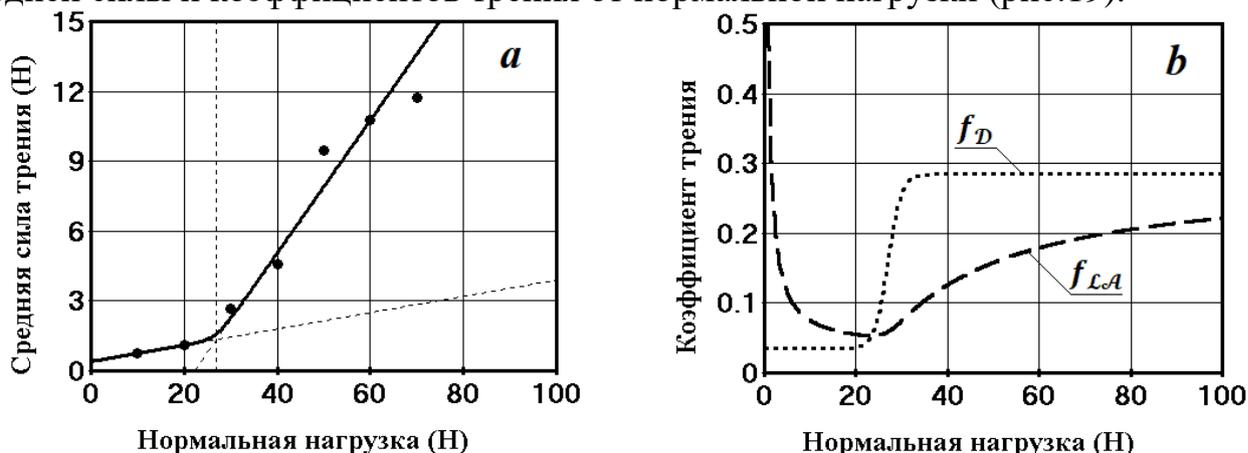


Рис.19. Графики зависимости средней силы (а) и коэффициентов трения (b) от нормальной силы, при трении скольжения стали 12Х1 по стали 12Х1

Представленная на рис.19а зависимость имеет вид:

$$F_f(F_N) = 0.035 \cdot F_N + 0.4 + \left(\frac{0.25}{0.7}\right) \cdot \ln(1 + \exp(0.7(F_N - 27))). \quad (88)$$

Соответственно дифференциальный коэффициент трения равен (рис.19b):

$$f_D = \frac{dF_f}{dF_N} = 0.035 + \frac{0.25}{1 + \exp(-0.7(F_N - 27))}, \quad (89)$$

а коэффициент трения Леонардо да Винчи – Амонтона равен:

$$f_{LA} = 0.035 + \frac{0.4}{F_N} + \left(\frac{0.25}{0.7 \cdot F_N}\right) \cdot \ln(1 + \exp(0.7(F_N - 27))). \quad (90)$$

На диапазоне нормальной силы от 0 до 27Н имеет место зависимость:

$$F_f = 0.035 \cdot F_N + 0.4, \quad (91)$$

а, начиная с нагрузки 27Н и далее, имеет место следующая зависимость:

$$F_f = 0.285 \cdot (F_N - 27) + 1.345. \quad (92)$$

Молекулярная составляющая силы трения при новом режиме равна 1.345Н.

Из рисунка 19b видно, что график функции $f_{LA} = f_{LA}(F_N)$ отражает зависимость четвёртого типа *KBCD* (рис.16). При этом участок *BC* мал по длине, что говорит о быстром переходе от приспособляемости пары трения к интенсификации адгезии её элементов с ростом нормальной нагрузки (в данном случае, трению подвергались концевые меры длины, которые при притирке прочно слипаются, поэтому здесь не говорится об участке повреждаемости). Это связано со средством трущихся материалов и с их высокой гладкостью.

Справедливость формулы (49) подтверждается также при исследовании закономерностей трения скольжения шайб из карбида кремния в среде воды:

$$F_f(t) = \frac{2.03}{1 + \exp(-0.01(t-490))} - \frac{0.11}{1 + \exp(-0.005(t-10500))} - \frac{0.09}{1 + \exp(-0.005(t-21500))}. \quad (93)$$

В конце пятой главы приведен пример использования разработанной математической модели для описания динамики процесса изнашивания, при обработке экспериментальных данных, полученных в результате триботехнических испытаний пористых газотермических покрытий (ГТП) упрочнённых и не упрочнённых сульфитроцементацией. Схема испытаний ролик-ролик (ролики из стали 45, покрытие наносилось на неподвижный ролик), длительность одного испытания составляла 90 мин. Нормальная сила, прижимающая ролики составляла 200Н. Частота вращения подвижного ролика во всех опытах была равна 250 об/мин. Установлено, что зависимость объёмного износа от времени для образцов с ГТП не упрочнёнными сульфитроцементацией имеет следующий вид:

$$V_w(t) = 16 \cdot 10^3 t - \left(\frac{11.12 \cdot 10^3}{0.5} \right) \ln(1 + \exp(0.5(t - 15))). \quad (94)$$

Функция (94) подтверждает справедливость математической модели (57) при условии $\Delta J_{t2} = 0$, то есть без участка предельного износа кривой В.Ф. Лоренца.

Зависимость объёмного износа от времени для образцов с ГТП упрочнёнными сульфитроцементацией имеет вид:

$$V_w(t) = 9.2 \cdot 10^3 t - \left(\frac{8.1 \cdot 10^3}{2} \right) \ln(1 + \exp(2(t - 5))) + \left(\frac{10.3 \cdot 10^3}{0.5} \right) \ln(1 + \exp(0.5(t - 78))). \quad (95)$$

Функция (95) подтверждает справедливость математической модели (57).

В шестой главе реализовано обобщение некоторых математических моделей, содержащих характеристики трения, и приведены рекомендации по использованию результатов проведённых исследований.

В результате анализа ряда математических моделей, содержащих стандартный коэффициент трения, установлено, что они описывают зависимости определённых величин без учёта самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта. В связи с этим было реализовано обобщение существующих математических моделей посредством использования зависимостей, описывающих обобщённую принципиальную схему изменения коэффициента (рис.16). Для обобщения использовалась формула (23).

В частности, дополнены формулы И.В. Крагельского для определения интенсивности усталостного изнашивания. Уточнённая формула для определения линейной интенсивности изнашивания при упругом контакте:

$$J_h = C_1 \left(\frac{k^* \cdot \left[f_{D0} \left(1 + \frac{p_{Ma}}{p_a} \right) + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta f_i}{\psi_{Nai} \cdot p_a} \cdot \ln(1 + \exp(\psi_{Nai}(p_a - p_{\Omega ai}))) \right]}{C_2 \sigma_s} \right)^\ell \times \left(\frac{E}{1 - \mu^2} \right)^{\ell - \beta \ell - 1} p_a^{\beta \ell + 1}. \quad (96)$$

где C_1, C_2 – параметры, характеризующие рельеф поверхности; k^* – коэффициент пропорциональности между коэффициентом трения и действующими в контакте напряжениями; σ_s – предел текучести; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; ℓ – показатель, характеризующий усталостные свойства материалов; $\beta = 1/(2\nu + 1)$; ν – показатель кривой опорной поверхности.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые разработана обобщённая математическая модель закона трения скольжения, с учётом смены режимов трения при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта.

2. Впервые разработана новая математическая модель динамики изменения характеристик трения скольжения, с учётом наличия переходных процессов при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта.

3. Впервые разработана новая математическая модель закона динамики изнашивания в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта, частными случаями которой являются характерные зависимости изнашивания конкретных узлов трения.

4. Проведена верификация разработанной обобщённой математической модели закона трения скольжения твёрдых тел в различных смазочных средах, в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта, подтвердившая её справедливость. Проведён анализ закономерностей трения, оцифровка и математическая обработка экспериментальных данных, полученных другими исследователями, в результате чего также подтверждена справедливость разработанной математической модели.

5. Проведена верификация разработанной новой математической модели динамики изменения характеристик трения посредством экспериментального выявления закономерностей трения скольжения в различных материалах пар трения и смазочных средах при самопроизвольных изменениях состояний фрикционного контакта, подтвердившая её справедливость.

6. Проведена верификация новой математической модели закона динамики изнашивания посредством экспериментального выявления закономерностей процесса изнашивания материалов пористых газотермических покрытий в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта.

7. Разработана и верифицирована математическая модель трения в условиях сверхмедленного скольжения.

8. Создана машина сверхмедленного трения и осуществлено экспериментальное выявление закономерностей динамики изменения характеристик трения скольжения в диапазоне скоростей от 30 до 10000 нм/сек. Проведено сравнение полученных результатов с триботехническими характеристиками материалов пар трения, полученных на стандартных машинах трения и установлено, что в при сверхмедленном движении сила трения не приходит к стационарному значению, а переходные процессы происходят между участками её линейного изменения.

9. Обобщён большой объем экспериментально полученных триботехнических характеристик материалов пар трения и смазочных сред, а также математические модели, для расчёта площадей контакта, контактных давлений, температуры вспышки и интенсивности усталостного изнашивания в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта. Установлено, что дифференциальный коэффициент трения на диапазоне нагрузки от 500 до 1000Н при добавлении в смазочное масло M14Г2ТС 1% частиц гидросиликата магния размером 10мкм уменьшается в 5,3 раза, а при добавлении частиц размером 20мкм – в 5,6 раза, что говорит о существенном антифрикционном эффекте. Выявлено, что при трении пористых тел из железа и меди по стальной поверхности, средний коэффициент трения, в случае добавления в масло для пропитки 0,01% агрегатов из чешуек фторированного графена, уменьшается на 32,6%, и 27% соответственно.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в журналах, индексируемых в базах данных Scopus или Web of science

1. **Breki A.D.**, Chulkin, S.G., Gvozdev, A.E., Kuzovleva, O.V. On the evolution of mathematical models of friction sliding of solids // *Chebyshevskii Sbornik*, 2020, 21(4), pp. 327–332.
2. **Breki A.D.**, Gvozdev, A.E., Kuzovleva, O.V., Kuzovlev, V.Yu. Empirical mathematical models of plasticity, strength and wear resistance of materials on the example of P18 steel // *Chebyshevskii Sbornik*, 2020, 21(3), pp. 272–291.
3. **Breki A.D.**, Chulkin, S.G., Kolmakov, A.G., Mazin, E.V., Kuzmin, A.M. Mathematical regularities of changes in the characteristics of the friction process of a porous composite material based on copper containing oil with graphene // *Chebyshevskii Sbornik*, 2021, 22(1), pp. 390–402.
4. **Breki A.D.**, Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Kuzovleva O.V. Empirical mathematical model for the wear kinetics of porous gas-thermal coatings // *Russian metallurgy (Metally)*. 2021. T. 2021. № 4. pp. 496-500.
5. **Breki A.D.**, Chulkin S.G., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Mathematical simulation of the sliding friction of silicon carbide in an aqueous medium // *Russian metallurgy (Metally)*. 2021. T. 2021. № 4. pp. 507-511.
6. **Breki A.D.**, Chulkin S.G., Dobrovolsky N.M., Kuzovleva O.V., Gvozdev A.E., Mazin E.V. Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene // *Чебышевский сборник*. 2021. Т. 22. № 1 (77). pp. 378-389.
7. Nosonovsky M., **Breki A.D.** Ternary logic of motion to resolve kinematic frictional paradoxes // *Entropy*. 2019. T. 21. № 6. P. 620.
8. **Breki A.D.**, Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Didenko A.L., Nosonovsky M. Frictional properties of a nanocomposite material with a linear polyimide matrix and tungsten diselenide nanoparticle reinforcement // *Journal of Tribology*. 2019. T. 141. № 8. P. 082002.
9. **Breki A.D.**, Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Semiempirical mathematical models of the pivoting friction of SHKH15 steel over R6M5 steel according to the ball–plane scheme with consideration of wear // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. T. 10. № 4. pp. 1008-1013.
10. **Breki A.D.**, Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Sergeev N.N. Investigation of the pivoting friction of SHKH15 steel over R6M5 and 10R6M5-MP steel with the use of mathematical modeling // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2019. T. 10. № 4. pp. 927-932.
11. Koltsova T.S., **Breki A.D.**, Larionova T.V., Tolochko O.V. Operational characteristics of the composite aluminum - carbon nanofibers // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. T. 38. № 1. pp. 11-15.
12. **Breki A.**, Nosonovsky M. Ultraslow frictional sliding and the stick-slip transition // *Applied Physics Letters*. 2018. T. 113. № 24. P. 241602.
13. **Breki A.**, Nosonovsky M. Einstein's viscosity equation for nanolubricated friction // *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*. 2018. T. 34. № 43. pp. 12968-12973.
14. **Breki A.D.**, Kol'tsova T.S., Skvortsova A.N., Tolochko O.V., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Lisenkov A.A., Fadin Y.A., Gvozdev A.E., Provotorov D.A. Tribotechnical properties of composite material "aluminum–carbon nanofibers" under friction on steels 12KH1 and SHKH15 // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. T. 9. № 4. pp. 639-643.
15. **Breki A.D.**, Aleksandrov S.E., Tyurikov K.S., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. T. 9. № 4. pp. 714-718.
16. Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., **Breki A.D.** Low-temperature plasma-chemical deposition of nanocomposite antifriction molybdenum disulfide (filler)–silicon oxide (matrix) coatings // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017. T. 90. № 11. pp. 1753-1759.

17. **Breki A.D.**, Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Khonelidze D.M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. pp. 126-129.
18. **Breki A.D.**, Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. pp. 32-36.
19. **Breki A.D.**, Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS_2 nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. pp. 56-59.
20. **Breki A.D.**, Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 4. pp. 509-514.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

21. **Бреки А.Д.** Обобщенная математическая модель внешнего трения скольжения твердых тел / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков // *Материаловедение*, 2021. №10. С.44-48.
22. **Бреки А.Д.** Закономерности трения скольжения стали Р6М5 по стали 45 в среде смазочного материала Литол-24 с дисперсными частицами / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 10. С. 28-34.
23. **Бреки А.Д.** Математические модели трения скольжения антифрикционных покрытий из полиамида П-54 по стали 45 / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.В. Стукач и [др.] // *Сталь*. 2020. № 8. С. 34-38.
24. **Бреки А.Д.** Влияние микроскопических грибов *aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки "ЛИТА" / А.Д. Бреки, С.А. Семенов, Н.Е. Стариков и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 7. С. 108-117.
25. **Бреки А.Д.** Математические модели характеристик процесса фрикционного взаимодействия гетерофазных металлических систем / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, И.В. Минаев и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. № 7. С. 39-53.
26. **Бреки А.Д.** Влияние магнитных наночастиц Fe_3O_4 на трение и износ стали 10X17H13M2T в режиме верчения в среде смазочного масла / А.Д. Бреки, И.А. Тюрикова, А.А. Шатульский и [др.] // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева*. 2018. № 4 (47). С. 103-111.
27. **Бреки А.Д.** Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов "Литол24-частицы гидросиликатов магния" / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов и [др.] // *Материаловедение*. 2017. № 3. С. 38-42.
28. **Бреки А.Д.** О зависимости вязкости масел от наличия в них наночастиц твердых смазочных материалов и взвешенных частиц износа при использовании эмпирического уравнения Вальтера / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 3. С. 90-98.
29. **Бреки А.Д.** О влиянии масел с наночастицами твёрдых смазочных материалов на потери мощности в зубчатых передачах / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 4. С. 171-180.
30. **Бреки А.Д.** Антифрикционные свойства покрытия на основе SiO_2 , содержащего наночастицы MoS_2 со средним размером 61 нм при трении по стали ШХ15 / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, К.С. Тюриков и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 7. С.334-343.

31. **Бреки А.Д.** Исследование трения стали ШХ15 по покрытию на основе SiO_2 , содержащего наночастицы дисульфида молибдена со средним размером 53 нм / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, К.С. Тюриков и [др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 7. С. 363-373.

32. **Бреки А.Д.** Лабораторные исследования трения стали ШХ15 по покрытию на основе SiO_2 , содержащему наночастицы MoS_2 со средним размером 64 нм / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, К.С. Тюриков и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 4 (73). С. 52-67.

33. **Бреки А.Д.** Закономерности трения верчения стали ШХ15 по поверхности покрытия на основе SiO_2 , содержащего наночастицы MoS_2 со средним размером 70 нм, нанесённого на подложку из стали 12Х18Н10Т / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, К.С. Тюриков и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 48-59.

34. **Бреки А.Д.** Использование обобщенного треугольника Паскаля для описания колебаний силы трения материалов / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2016. № 11. С. 3-8.

35. **Бреки А.Д.** О фрикционном взаимодействии металлических материалов с учетом явления сверхпластичности / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков и [др.] // Материаловедение. 2016. № 8. С. 21-25.

36. Медведева В.В. Исследование изнашивания стали ШХ15 в среде пластичных смазочных композиционных материалов, содержащих дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов и [др.] // Технология металлов. 2016. № 7. С. 9-15.

37. Медведева В.В. Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала с наполнителем из дисперсных частиц слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов и [др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 4. С. 257-267.

38. Медведева В.В. Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 75-82.

39. Медведева В.В. Триботехнические свойства пластичных смазочных композиционных материалов с наполнителями из дисперсных частиц меди и цинка / В.В. Медведева, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 109-119.

40. **Бреки А.Д.** Триботехнические характеристики композиционных покрытий с матрицей из полигетероарилена ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при трении скольжения в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 3 (66). С. 17-28.

41. **Бреки А.Д.** Исследование трения верчения стали ШХ15 по поверхности пористого покрытия (AL,TI)N, нанесённого на подложку из CoCrMo , при использовании твёрдого смазочного материала из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, А.А. Лисенков, М.А. Данилова и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5 (68). С. 22-34.

42. **Бреки А.Д.** Сравнительное исследование противоизносных свойств смазочных композиционных материалов, содержащих сплошные наночастицы дисульфида вольфрама и фуллереноподобные частицы дисульфида молибдена при трении стали ШХ15 по поверхности стали 45 / А.Д. Бреки, С.Е. Александров, О.В. Толочко и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 5 (68). С. 63-77.

43. **Бреки А.Д.** Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе алюминия, упрочнённых углеродными нановолокнами, при трении по стали 12Х / А.Д. Бреки, Т.С. Кольцова, А.Н. Скворцова и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 4 (21). С. 11-23.

44. **Бреки А.Д.** Синтез и триботехнические свойства композиционных покрытий с матрицей из полиимида ПМ-ДАДФЭ и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев и [др.] // *Материаловедение*. 2015. № 12. С. 36-40.
45. **Бреки А.Д.** Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена "Р-ОДФО" с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 11-1. С. 133-139.
46. **Бреки А.Д.** Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами диселенида вольфрама на трение в подшипниках качения / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин и [др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2015. № 11-1. С. 171-180.
47. **Бреки А.Д.** Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в подшипниках качения / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин и [др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2015. № 11-1. С. 78-86.
48. **Бреки А.Д.** Взаимодействие дисперсных компонентов смазочного композиционного материала, содержащего наночастицы дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 7-1. С. 197-205.
49. **Бреки А.Д.** Выбор дисперсности наполнителя из частиц дихалькогенидов вольфрама для создания смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 7-1. С. 235-243.
50. **Бреки А.Д.** Оценка взаимодействия между наночастицами дихалькогенидов вольфрама в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева и [др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2015. № 7-2. С. 8-14.
51. **Бреки А.Д.** Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена "ДАИ" с наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 8-2. С. 148-155.
52. **Бреки А.Д.** Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена "Р-ОООД" с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко и [др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 8-2. С. 181-188.
53. **Бреки А.Д.** Составляющие технологического процесса создания смазочных композиционных материалов, содержащих высокодисперсные частицы слоистого модификатора трения / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков и [др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2015. № 4 (61). С. 19-25.
54. **Бреки А.Д.** О диспергировании в маслах дисперсных наполнителей при приготовлении смазочных композиционных материалов и в процессе функционирования узлов трения / А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов и [др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2015. № 4 (61). С. 51-54.
55. **Бреки А.Д.** О расчёте седиментации высокодисперсного наполнителя при хранении жидкого смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов и [др.] // *Известия ЮЗГУ*. 2015. № 5 (62). С. 27-31.
56. **Бреки А.Д.** Оценка триботехнических свойств композиционных покрытий на основе полигетероарилена "ПМ-ДАДФЭ" с наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при трении в среде смазочного масла / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко и [др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2015. № 6(63). С.44-48.
57. **Бреки А.Д.** Оценка триботехнических свойств композиционных покрытий на основе полигетероарилена "ПМ-ДАДФЭ" с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама при трении в среде смазочного масла / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко и [др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2015. № 6 (63). С. 48-54.
58. **Бреки А.Д.** Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле / А.Д. Бреки, О.В.

Толочко, Н.Е. Стариков и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 3 (16). С. 17-23.

59. Максимов М.Ю. Синтез и применение наноразмерных частиц дихалькогенидов вольфрама для трибологии / М.Ю. Максимов, Е.С. Васильева, **А.Д. Бреки** и [др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. С. 316.

60. **Бреки А.Д.** Исследование нагрузочной способности смазочных композиций с наночастицами WS_2 и WSe_2 для железнодорожных втулок / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, М.Ю. Максимов, С.Г. Чулкин // Вопросы материаловедения. 2012. № 2 (70). С. 109-113.

61. **Бреки А.Д.** Состояние нефтяных смазочных композиционных материалов в подшипниковых узлах в процессе теплообмена / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева и [др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 12-1. С. 117-124.

62. Фадин Ю.А. Акустическая эмиссия и шероховатость поверхности хрупких материалов / Ю.А. Фадин, О.Ф. Киреенко, С.В. Сычев, **А.Д. Бреки** // Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 24. С. 1-6.

63. **Бреки А.Д.** Закономерности трения скольжения стали 35 по бронзе БРАЖ9-4 в среде смазочного масла с дисперсными частицами гидросиликата магния / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.Е. Гвоздев и [др.] // Материаловедение. 2021. № 7. С. 13-20.

64. Кобыхно И.А. Закономерности трения многоуровневых композиционных материалов, содержащих высокодисперсные частицы фуллереновой сажи / И.А. Кобыхно, Ф.А. Юнусов, **А.Д. Бреки** и [др.] // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 5. С. 7-11.

65. **Бреки А.Д.** Особенности трения скольжения стали Р6АМ5 по стали Ст3 в среде смазочного масла М14Г2ТС с присадкой порошка гидросиликата магния / А.Д. Бреки, С.Г. Чулкин, А.Е. Гвоздев и [др.] // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 8. С. 30-36.

66. Чулкин С.Г. Увеличение износостойкости пористых газотермических покрытий путем химико-термической обработки / С.Г. Чулкин, **А.Д. Бреки**, А.А. Шатульский и [др.] // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2020. № 1 (52). С. 71-77.

67. Яхимович В.А. Методика исследования износа резьбы бурильных труб при многократном свинчивании и выдержке под нагрузкой / В.А. Яхимович, А.Д. Бреки, А.А. Альхименко и [др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24. № 3. С. 8-20.

Монографии

68. Чулкин С.Г. Снижение износа и энергетических потерь на трение в оборудовании механической обработки посредством применения консистентных смазочных материалов: монография / С.Г. Чулкин, С.П. Алексеев, **А.Д. Бреки**, А.Е. Гвоздев – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. – 194с.

69. **Бреки А.Д.** Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов и [др.] – Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. – 158с.

70. **Бреки А.Д.** Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама для узлов трения машин: монография / А.Д. Бреки, В.В. Кудрявцев, А.Л. Диденко и [др.] – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 128с.

71. **Бреки А.Д.** Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко и [др.] – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 276с.

72. **Бреки А.Д.** Триботехнические свойства жидких смазочных композиционных материалов, содержащих полученные методом газофазного синтеза высокодисперсные дисульфид и диселенид вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко и [др.] – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 152с.

73. **Бреки А.Д.** Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко и [др.] – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – 144с.

Объекты интеллектуальной собственности

74. Гвоздев А.Е., **Бреки А.Д.**, Дорохин Ю.С., Журавлев Г.М., Клементьев Д.С., Кутепов С.Н., Малий Д.В., Медведев П.Н., Минаев И.В., Сергеев А.Н., Хонелидзе Д.М. Программный комплекс расчета мощности сил, определяющих процессы пластического деформирования, поверхностного формоизменения и фрикционного взаимодействия слитковых, порошковых и наноконпозиционных металлических систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018661010, 30.08.2018. Заявка № 2018618274 от 31.07.2018.

75. Гвоздев А.Е., **Бреки А.Д.**, Цой Е.В., Журавлев Г.М., Клементьев Д.С., Кутепов С.Н., Малий Д.В., Калинин А.А., Минаев И.В., Сергеев А.Н. Программный комплекс для расчета характеристик нестационарных тепловых полей и адиабатических эффектов в процессах обработки металлических, порошковых, аморфных, неметаллических и наноконпозиционных систем и материалов конструкционного, инструментального и триботехнического назначения. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018663400, 26.10.2018. Заявка № 2018660543 от 02.10.2018.

76. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Минаев И.В., Сергеев А.Н., **Бреки А.Д.**, Малий Д.В., Казаков М.В., Кутепов С.Н. Программный комплекс для расчета напряженного и деформированного состояния металлических, порошковых, аморфных, неметаллических, наноструктурных композиционных систем и материалов конструкционного, инструментального и триботехнического назначения в различных условиях. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664179, 12.11.2018. Заявка № 2018660758 от 05.10.2018.

77. **Бреки А.Д.**, Гвоздев А.Е., Дорохин Ю.С., Клементьев Д.С., Кутепов С.Н., Кузовлева О.В., Малий Д.В., Медведев П.Н., Минаев И.В., Провоторов Д.А., Проскураков Н.Е., Сергеев А.Н., Хонелидзе Д.М. Программный комплекс для моделирования ресурсосберегающих производств обработки и фрикционного взаимодействия металлических систем. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017616180, 02.06.2017. Заявка № 2017613672 от 10.04.2017.

78. Рудской А.И., Толочко О.В., Васильева Е.С., **Бреки А.Д.**, Хильченко С.В. Смазочная композиция с нанодисперсным диселенидом вольфрама. Патент на изобретение RU 2586335 С1, 10.06.2016. Заявка № 2014153023/04 от 25.12.2014.

79. Гвоздев А.Е., Сергеев Н.Н., Провоторов Д.А., Гадалов В.Н., Колмаков А.Г., Сергеев А.Н., Минаев И.В., Золотухин В.И., Сапожников С.В., **Бреки А.Д.**, Романенко Д.Н., Малий Д.В., Боголюбова Д.Н., Цурин Ю.С. Мультимедийная лекция по теме "Планы оптимальных исследований металлических систем в сопряженных механических, тепловых и физико-химических полях и средах". Свидетельство о регистрации базы данных RU 2014620905. Заявка № 2014620573 от 28.04.2014.