

На правах рукописи

Δ

∪

ИЗМЕРОВ МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СЛАБОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ
НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЕМ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.5.3 – «Трение и износ в машинах»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Брянск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет».

Научный консультант **Тихомиров Виктор Петрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Малышев Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Российский государственный университет Нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», профессор кафедры «Трибология и технология ремонта нефтегазового оборудования»

Бреки Александр Джалюльевич
доктор технических наук,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор
международного научно-образовательного центра «BaltTribo-Polytechnic»

Харламов Павел Викторович
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», зав. кафедрой "Транспортные машины и триботехника"

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится « 31 » мая 2024 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета 99.0.033.02, созданного на базе ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук и ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.

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

Автореферат разослан « » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент


Хандожко В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Настоящая работа посвящена вопросам трения и изнашивания сопряжённых поверхностей, где контактное взаимодействие протекает на микроуровне при малых нагрузках и контактном давлении до 2 МПа. К таким механизмам можно отнести различные прецизионные механизмы, кинематические узлы мехатронных устройств и робототехники, точной аппаратуры, МЭМС, оптические приборы, аэростатические направляющие и многие другие, у которых величина допустимого износа сопоставима с величиной шероховатости (не превышает 10 мкм), а также механизмы, работающие при малых нагрузках в режиме приработки и некоторые уплотнительные устройства, где исходная шероховатость поверхностей определяет герметичность. В настоящей работе апробация предлагаемой методики была выполнена для предохранительной муфты стрелочного перевода типа ВСП-220Н, которая представлена в главе 5.

Современные методы расчёта узлов трения учитывают информацию о микрогеометрии поверхностей в виде средне-статистических показателей их качества согласно ГОСТ 2789-73 (Ra , Rz , Sm , tp и т.д.) и дают большие погрешности при оценке фактической площади контакта, вида деформационного состояния пятен контакта и их нагрузочной способности. По статистике около 80% проектируемых узлов трения требуют доработки, а финальные испытания сильно меняют окончательный вариант реализации. Для пар трения, где несущая способность узла определяется картиной контактного взаимодействия микронеровностей, учёт микрогеометрии и деформационного состояния фактических пятен контакта является определяющим фактором при их проектировании. Эффективное проектирование кинематических пар мехатронных систем требует идентификации процессов трения и устранения использования ограниченных знаний о природе сил трения. Отсутствие закономерностей трения и изнашивания на этом уровне приводит к необходимости доводочных операций опытных изделий или к ограничению сроков эксплуатации, при этом отсутствуют научно обоснованные сроки их технического обслуживания. С целью улучшения характеристик кинематических пар мехатронных систем и решения проблемы обеспечения износостойкости требуется выявить закономерности трения и изнашивания путем разработки соответствующих имитационных моделей.

Экспериментальные исследования контактного взаимодействия и изнашивания слабонагруженных (кинематических) пар трения показали, что исследуемые процессы на микроуровне кардинально отличаются от принятых и широко используемых закономерностей в макро-масштабе. Например, исследование сближения шероховатых поверхностей в микро-масштабе (на уровне контактирования микровыступов) показало, что фактические пятна контакта одновременно образуются как в пластическом, так и в упругом состоянии, и их соотношение в большей мере зависит от исходной микрогеометрии поверхностей и постоянно меняется в зависимости от

величины сближения. Субмикро-шероховатость, которую делает невидимой конечный радиус скругления щупа (5 мкм) при стандартном методе профилометрии, вносит свой вклад в картину напряжённого состояния и распределения пятен контакта, который становится тем больше, чем меньше контактное давление. В зависимости от упруго-пластического состояния фактических пятен контакта, возникающих на разных уровнях, меняется фактический коэффициент трения, а значит и интенсивность изнашивания, которые в этих условиях являются нелинейными и подчиняются разным законам трения в зависимости от состояния контакта.

Таким образом, в настоящее время не существует общей теории, которая адекватно описывала бы особенности процесса трения и изнашивания шероховатого слоя при малых нагрузках или в режиме приработки на основе анализа контактного взаимодействия микровыступов исходных поверхностей, поэтому решение проблемы обеспечения износостойкости кинематических пар с помощью имитационного моделирования многомасштабной структуры поверхности и контактного взаимодействия на уровне волнистости, шероховатости и субшероховатости является актуальным и вносит существенный экономический эффект при внедрении результатов исследований в народное хозяйство.

Целью работы является решение проблемы обеспечения заданной износостойкости кинематических пар трения на основе разработанной методологии моделирования трёхмерного контактного взаимодействия и трения сопряжённых поверхностей, с помощью информационных технологий.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Провести анализ современных методов и расчётов по моделированию микрогеометрии шероховатых поверхностей, оценке параметров их контактирования и расчёту триботехнических характеристик пар трения, где исходная шероховатость оказывает влияние на процессы трения.
2. Разработать трёхмерную модель строения микрогеометрии поверхностей деталей машин с учётом всех видов отклонений, которая должна максимально точно отражать микроструктуру реальной поверхности и будет являться основой для оценки распределения пятен контакта и их напряжённого состояния под действием заданной нагрузки. Провести оценку адекватности модели с реальными поверхностями.
3. Разработать методологию расчёта деформации микронеровностей на основе распределения фактических пятен контакта при взаимодействии трёхмерных моделей поверхностей с учётом их упруго-пластического состояния.
4. Разработать методику определения полного коэффициента трения сопряжённых поверхностей при малых нагрузках как сумму деформационной составляющей коэффициента на основе моделирования контактного взаимодействия трёхмерных моделей, и адгезионной составляющей с более точной её оценкой на нано-уровне.

5. Разработать алгоритм оценки интенсивности изнашивания шероховатого слоя сопряжённых поверхностей при малых нагрузках на основе моделирования изнашивания вершин микронеровностей, находящихся в пластическом или упругом состоянии с учётом распределения пятен фактического контакта при заданной нагрузке, а также методику прогнозирования ресурса трибосопряжения с применением имитационного моделирования.
6. Разработать методику оценки протекания уплотняемой среды через контакт трёхмерных моделей поверхностей уплотнительных устройств с учётом всех видов отклонений микрогеометрии с оценкой параметров структуры зазора.
7. Реализовать все модели и методы расчётов в виде рабочих программ для ЭВМ с целью их дальнейшего применения при проектировании узлов трения и уплотнительных устройств. Провести сравнение результатов моделирования с натурными экспериментами.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований является физика и механика контактного взаимодействия шероховатых поверхностей с учётом их микрогеометрии, трение покоя и скольжения, а также изнашивание твёрдых тел.

Предметом исследований является трение и изнашивание кинематических пар с учетом исходной микрогеометрии, работающих при малых нагрузках, а также герметичность стыка металл-металлических уплотнительных устройств.

Методы и достоверность исследований. Теоретические и эмпирические исследования проводились на базе современных представлений о строении волнистых и шероховатых (в том числе и фрактальных) поверхностей металлических деталей. В работе использованы основные положения теории строения поверхностных слоёв деталей машин (инженерии поверхностей), теории контактного взаимодействия поверхностей, теории упругости и пластичности, основы фрактальной геометрии и применение её к моделированию трёхмерных шероховатых поверхностей, основные положения статистических методов, теории подобия, а также теории трения и износа.

Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, проведёнными в работе, и экспериментальными исследованиями, взятыми из литературных данных, которые были проведены другими авторами, а также применением современных технических средств при анализе и приемлемой сходимостью теоретических и эмпирических результатов.

Научная новизна работы:

1. Установлено, что распределение пятен фактического контакта подчиняется степенному закону, где его переменные зависят от микрогеометрии сопряжённых поверхностей и вида обработки, а также

- показатель степени функции распределения коррелирует с фрактальной размерностью поверхностей и в среднем линейно растёт с ростом фрактальной размерности, а функцию распределения пятен контакта достоверно можно найти только посредством имитационного моделирования. (соответствует п.2 паспорта специальности 2.5.3).
2. Предложена модель деформации вершин микровыступов, которая отличается от классической тем, что первичный контакт возникает в пластическом состоянии на вершинах микровыступов, а при дальнейшем сближении с увеличением размеров пятен контакта происходит смена деформационного состояния на упругое, что полностью меняет физическую картину контактного взаимодействия и объясняет нелинейность сближения от нагрузки во многих экспериментах при этих условиях (соответствует п.2 паспорта специальности 2.5.3).
 3. При совместном решении контактной задачи для фрактальной модели поверхности и модели Герца получен критерий перехода от пластического состояния к упругому в виде критической площади пятна контакта a_c , который разграничивает области применения моделей: для пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии, адекватные результаты даёт фрактальная модель, а модель Герца работает только при упругом контакте (соответствует п.2 паспорта специальности 2.5.3).
 4. Найдена оптимальная фрактальная размерность поверхности, соответствующая минимуму коэффициента трения и являющаяся точкой разграничения его качественного изменения: до этого значения угол наклона микронеровностей мал, и деформационная составляющая практически не влияет на коэффициент трения, который определяется в основном адгезионными свойствами материала и растёт с уменьшением фрактальной размерности, а при значениях больше оптимальной ситуация полностью меняется: коэффициент трения в основном определяется деформационной составляющей при почти неизменной адгезионной из-за малой фактической площади пятен контакта, и растёт с ростом фрактальной размерности (соответствует п.3 и п.5 паспорта специальности 2.5.3).
 5. Установлено, что адгезионная составляющая коэффициента трения определяется величиной отклонения иглы кантилевера атомно-силового микроскопа при нагрузках на кантилевер до 1 нН при сканировании гладких образцов поверхности с Ra до 0.4, что позволяет использовать этот метод как более простой и точный при оценке адгезионной составляющей коэффициента трения из-за малого влияния деформационной составляющей (соответствует п.15 паспорта специальности 2.5.3).
 6. Разработанная модель изнашивания инженерных поверхностей при малых нагрузках позволила установить, что снижение интенсивности изнашивания в режиме приработки происходит из-за снижения фрактальной размерности поверхности за счёт износа фактических пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии, а при установившемся

режиме работы интенсивность изнашивания постоянна, так как фрактальная размерность практически не меняется из-за перехода большинства пятен контакта в упругое состояние после их износа (соответствует п.10 паспорта специальности 2.5.3).

7. Установлено, что представление межконтактного зазора поверхностей в виде пористой среды позволяет с помощью математического и имитационного моделирования оценить герметичность уплотнительных металл-металлических устройств путём расчёта фактического коэффициента извилистости, пористости и среднего радиуса каналов протекания, которые соответствуют исходной микрогеометрии сопряжённых поверхностей при их относительном расположении (соответствует п.10 и 17 паспорта специальности 2.5.3).

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. На основе предложенной трёхмерной многоуровневой модели, учитывающей макро- и микроотклонения, а также волнистость, разработаны компьютерные программы для ЭВМ, позволяющие создавать адекватные 3D модели инженерных поверхностей с высокой детализацией и следами обработки по заданным исходным параметрам с учётом случайных отклонений для проведения дальнейших исследований поведения трибосистем.
2. Создана база данных поверхностей на основе СУБД MySQL, которая включает в себя карты реальных поверхностей и их моделей с разными параметрами, что упрощает и автоматизирует дальнейшие исследования при выборе оптимального сочетания образцов при проектировании трибосистем.
3. На основе предложенной модели контактного взаимодействия сопряжённых поверхностей разработана компьютерная программа, позволяющая адекватно оценить контактную жёсткость стыка при малых нагрузках за счёт правильной идентификации упруго-пластического состояния контакта и исключить ошибки при расчёте трибосистем на этапе проектирования.
4. Предложен новый способ оценки адгезионной составляющей коэффициента трения на нано-уровне на основе применения атомно-силового микроскопа методом анализа величины отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном сканировании гладких образцов инженерных поверхностей, который даёт более точные результаты из-за малого влияния деформационной составляющей при измерениях.
5. Предложен алгоритм прогнозирования поведения узлов трения на этапе проектирования, работающих при малых нагрузках, или работающих в режиме приработки, который заключается в применении разработанных программ компьютерного моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, позволяющие рассчитать время изнашивания микронеровностей под действием заданной нагрузки, а также величину износа. Выбор разного сочетания 3D карт поверхностей из созданной базы

данных даст разную величину интенсивности изнашивания или разное время приработки, соответствующее достижению максимального числа пятен контакта, находящихся в упругом состоянии. При переборе разных сочетаний карт поверхностей можно найти такое их сочетание, при котором при заданной нагрузке будет минимальная интенсивность изнашивания или время приработки, и тогда для данного трибоузла следует назначить микрогеометрию, соответствующую выбранным поверхностям.

6. Принятая к внедрению на МУП «Брянское городское предприятие» компьютерная программа по расчёту герметичности уплотнительных устройств гидравлической системы автобусной техники позволила за счёт предупреждающего ремонта для одного предприятия уменьшить время простоя автопарка и сэкономить материалы и запчасти, что вместе с повышением экологичности предприятия снизило издержки на 1 192 201 руб. за 2020 год и повысило качество оказываемых услуг.

Положения, выносимые на защиту:

1. Многоуровневая модель микрогеометрии инженерной поверхности, учитывающая геометрические особенности строения на всех уровнях: макроотклонения, волнистость, шероховатость, субмикрощероховатость.
2. Модель контактного взаимодействия вершин микронеровностей шероховатого слоя при малых нагрузках, основанная на том, что первичный контакт микронеровностей находится в пластическом состоянии и описывается фрактальной моделью, который при дальнейшем сближении переходит в упругое состояние, описываемое моделью Герца.
3. Критерий перехода от пластического состояния к упругому в виде критической площади пятна контакта, полученный при совместном решении контактной задачи для фрактальной модели и модели Герца.
4. Выражение для оценки полного коэффициента трения между сопряжёнными поверхностями при малых нагрузках на основе анализа деформационного состояния пятен контакта и их микрогеометрии.
5. Способ оценки адгезионной составляющей коэффициента трения на наноуровне с помощью анализа величины отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном сканировании гладких образцов инженерных поверхностей.
6. Модель изнашивания фрактальных поверхностей при малых нагрузках, которая основана на анализе деформационного состояния пятен контакта микронеровностей, и позволяющая оценить вклад деформационной и адгезионной модели в интенсивность изнашивания в текущий момент времени для оценки продолжительности этапа приработки или долговечности узла трения, работающего в этих условиях.
7. Модель протекания уплотняемой среды через стык металлических поверхностей уплотнительного устройства, основанная на применении деформационной модели контактного взаимодействия многоуровневых трёхмерных моделей, позволяющая оценить величину утечек рабочей

среды как протекание через щель между волнистыми поверхностями и просачивание через фрактальный пористый слой.

8. Реализацию методов моделирования трёхмерных поверхностей, оценке контактного взаимодействия и триботехнических параметров, а также герметичности, в виде компьютерных программ для ЭВМ, позволяющих автоматизировать и визуализировать процесс проектирования трибосопряжений.

Личный вклад соискателя. Автор внес существенный вклад в формулировании задач для решения проблемы обеспечения требуемых триботехнических показателей, контактной жесткости и степени герметичности, в обсуждении результатов исследований, разработке алгоритмов и проведении машинных экспериментов, а также им получены все результаты, составляющие научную новизну и практическую значимость работы и положения, выносимые на защиту.

Реализация результатов работы. Отдельные теоретические результаты работы были использованы на Муниципальном унитарном предприятии «Брянское городское пассажирское автотранспортное предприятие» в 2020 г. с экономическим эффектом за год 1192201 руб., используются в образовательном процессе при проведении занятий по дисциплинам кафедры «Трубопроводные транспортные системы» и «Подвижной состав железных дорог» ФГБОУ ВО «БГТУ», имеется 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ по моделированию поверхностей и оценке герметичности стыка.

Апробация работы. Основные положения и наиболее важные научные результаты диссертационной работы, а также разработанные автором программы были представлены на 29 международных и всероссийских конференциях:

1. I-я и II-я Всероссийская научно - методическая конференция «Основы проектирования и детали машин – XXI век», г. Орёл, 2007 и 2010 г.
2. Международная научно - практическая конференция «Наука и производство 2009», г. Брянск, 2009 г.
3. Научно-техническая конференция, посвящённая 120-летию М.М. ХРУЩОВА, Москва, 2010 г.
4. XIII-я Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении», г. Брянск, 2011 г.
5. Международная научно - техническая конференция «Энергетика, информатика, инновации 2011», г. Смоленск, 2011 г.
6. Международная конференция «Актуальные проблемы трибологии», г. Самара, 2011 г.
7. 11-я, 12-я, 13-я и 14-я Международная конференция "Трибология и надёжность", г. С.-Петербург, 2011, 2012, 2013 и 2014 годы.
8. V-я Международная научно - практическая конференция «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике,

- науке, образовании», г. Брянск, 2013 г.
9. IX Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения СПМ-2015», г. Томск, 2015 г.
 10. IV и VIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, 2010 и 2015 г.
 11. 7-я Международная научно - техническая конференция «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015)», г. Брянск, 2015г.
 12. Международная научно – практическая конференция «Альтернативные источники энергии в транспортно–технологическом комплексе», г. Воронеж, 2016 г.
 13. XI, XII, XIII и XIV Международные научно - технические конференции «Трибология – машиностроению» ИМАШ РАН г. Москва, 2016, 2018, 2020 и 2022 г.
 14. Сборник научных трудов «Совершенствование энергетических машин», г. Брянск, 2017 г.
 15. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015.
 16. Materials Science and Engineering 11. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017.
 17. International conference on Avia mechanical engineering and transport (AviaENT 2019): Advances in engineering research.
 18. Международная научно-техническая конференция «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники», БГТУ, г. Брянск, 2020 г.
 19. Международная конференция «Проблемы прикладной механики», БГТУ, г. Брянск, 2020 г.
 20. AIP Conference Proceedings: Proceedings International Conference “Problems of Applied Mechanics”, 2021.
 21. 14-я МНТК «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли», БГТУ, г. Брянск, 2022 г.

Научные отчеты по материалам диссертационной работы являются лауреатами открытого конкурса на лучшую научную работу ученых Брянской области по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Современные научные достижения Брянск - 2009» и «Наука области - Брянщине» в 2016 г., имеется почётная грамота главы г. Брянска от 2015 г. и благодарственное письмо губернатора Брянской области от 2020 г.

Публикации. Всего опубликовано 72 работы, по теме диссертации - 65 работ, из них 5 монографий, 4 учебных пособия (одно переизданное), 27 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в индексируемых международных базах Scopus/WoS. Основные тезисы работы были представлены на 29 международных и всероссийских конференциях, о чём свидетельствуют изданные тезисы докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных результатов и выводов, а также списка использованной литературы, содержащего 234 источников. Работа изложена на 333 страницах, содержит 149 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, представлены данные о потерях при проведении режима приработки, масштабах эксплуатации малонагруженных трибосопряжений и уплотнительных устройств, а также приведены данные экологических и экономических последствий их отказов.

В главе 1 дан обзор опубликованных работ по проблеме оценки износа трибосопряжений, обеспечения триботехнических показателей инженерных поверхностей, контактной жесткости и герметичности на этапе проектирования, поставлены цели и задачи работы.

Микрогеометрия поверхности. Интенсивность изнашивания значительно зависит от качества микрогеометрии поверхностей, а для её количественного определения до сих пор используют профильные оценки шероховатой и волнистой поверхности. Большой вклад в изучение инженерных поверхностей на микроуровне и анализ контактного взаимодействия внесли Н.Б. Демкин, И.В. Крагельский, Н.М. Михин, Э.В. Рыжов, И.Г. Горячева, А.Г. Суслов, Рудзит Я.А. Тихомиров В.П., Албагачиев А.Ю., Воронин Н.А., Огар П.М., Белкин Е.А. и др. Трёхмерная топография несёт значительно больше информации о геометрии инженерной поверхности, и для её описания М. Лонге–Хиггинс, Д. Картрайт, П. Найак и др. использовали элементы теории случайного поля. Кроме того, информация о поверхности после профилографирования отличается от реальной поверхности из-за определённого радиуса кривизны щупа и не может точно описать всю особенность микрогеометрии. Анализ микрорельефа инженерных поверхностей говорит о его самоподобии на разных уровнях, которое достигается путем повторения механизма предыдущего технологического воздействия на поверхность, но в другом «масштабе». Самоподобие однозначно говорит о проявлении фрактальных свойств, что позволяет использовать фрактальную геометрию в моделировании реальных инженерных поверхностей.

Контактное взаимодействие твердых тел. Оценка износа невозможна без решения контактных задач и требует применения моделей реальных поверхностей и их контактного взаимодействия. К таким моделям можно отнести модель Гринвуда – Вильямсона, модель Н.Б. Демкина, модель Буша, Гибсона, Томаса, а также упрощенную многоуровневую модель Арчарда. Анализ экспериментальных данных показал, что модель Гринвуда – Вильямсона в виде набора сферических сегментов с ее допущениями о постоянстве радиуса верхней части всех выступов применима при повышенных контактных давлениях в режиме нормального изнашивания, а многоуровневая модель Арчарда не соответствует реальным инженерным

поверхностям, и ее применение приводит к значительным ошибкам при оценке параметров контактного взаимодействия.

Герметичность соединений. Модели протекания (просачивания) предложены Дарси, Пуазейлем, Козени, Карманом и др. Работы, выполненные Г.В. Божко, Д.Ф. Гуревичем, А.Г. Суловым, В.В. Порошиным, Л.А. Кондаковым, В.Т. Бабкиным, В.Д. Проданом и др. посвящены рассмотрению процессов фильтрационного течения жидкой уплотняемой среды через межконтактный зазор. В настоящее время существуют в основном два направления при анализе режимов течения рабочей среды между поверхностями. Первое - характеризуется дифференцированным изучением влияния отдельных факторов, условий и параметров на герметичность соединений, и не ставит своей целью нормирование точности параметров с учётом их конструкторско - технологической взаимосвязи. Второе - связано с изучением физической сущности процесса герметизации, с установлением научно - обоснованных норм герметичности, и позволяет решить задачу управления процессом герметизации на основе учёта взаимосвязи отдельных факторов, условий и параметров при изготовлении, сборке и ремонте. В качестве объекта утечки рабочей среды принимают идеальную или фиктивную пористую среду (Слихтер, Козени, Карман и другие). Существует много работ, посвященных моделированию процесса герметизации в уплотнительных соединениях, но проведенный анализ показывает, что единой научно-обоснованной методики для определения герметичности пока нет.

Трение и износ поверхностей. Трибология фрактальных поверхностей по мнению зарубежных исследователей все еще находится в состоянии, когда малочисленные экспериментальные данные не совсем четко интерпретированы, а природа трения на этом уровне не раскрыта. Предлагаемые теоретические модели для прогнозирования поведения трибоэлементов нуждаются в широком проведении соответствующих экспериментов, подтверждающих или отвергающих ту или иную модель.

Фрактальная характеристика топографии поверхности дополняет и улучшает традиционные статистические методы описания поверхностей, особенно при изучении контактной механики и процессов износа. Критический анализ существующих моделей упругопластического контакта поверхностей с фрактальной топографией поверхности, сгенерированной с помощью функции Вейерштрасса-Мандельброта ($W-M$), представлен в работе С. Ji, W. Jiang в 2016 г. Маджумдар и Бхушан разработали первую модель фрактального контакта ($M-B$), которая имеет два расхождения с классическими контактными моделями, основанными на теории Герца: соотношение между реальной площадью контакта A_r и нагрузкой F в модели $M-B$ имеет вид $A_r \sim F^{(3-D)/2}$, ($1 < D < 2$), а в модели Герца - $A_r \sim F^{3/2}$, и в модели $M-B$, когда площадь пятна контакта $a < a_c$ (a_c - критическая площадь контакта), режим контакта является пластичным и переходит в упругий, когда $a > a_c$, тогда как обратное верно для ситуации в классических контактных моделях.

На основании проведённого обзора литературы в качестве цели работы

была поставлена задача разработки новой методологии расчёта узлов трения, работающих при малых нагрузках или в режиме приработки, которая основана на решении комплекса задач по созданию адекватной трёхмерной модели инженерных поверхностей с учётом всех видов микронеровностей, оценке контактного взаимодействия микровыступов с учётом распределения фактических пятен контакта и их упруго-пластического состояния, расчёта коэффициента трения и интенсивности изнашивания и оценки герметичности уплотнительных устройств.

В главе 2 представлена многоуровневая модель строения инженерной поверхности, одновременно включающая в себя волнистость, макро- и микроотклонения профиля, которая максимально точно на сегодняшний день отражает особенности геометрического строения реальных поверхностей, с обоснованием адекватности модели. В зависимости от необходимой степени точности при решении конкретной задачи модель предусматривает соответствующее число уровней: макроотклонения, волнистость, шероховатость, субмикрощероховатость.

Макроотклонения реализуются искажением расположения исходной 3D карты волнистой поверхности в пространстве (перекос, вогнутость, выпуклость и их комбинация).

Волнистость реализуется с помощью сплайнов, построенных таким образом, что начало последующего участка сплайна является конечной точкой предыдущего. Сплайн строится по косинусоидальному закону по заданным параметрам: вид волнистости – ортогональная или полярная; размер участка; число волн в соответствующих направлениях по осям или шаг волны; амплитуда волны в соответствующих направлениях (рис. 1).

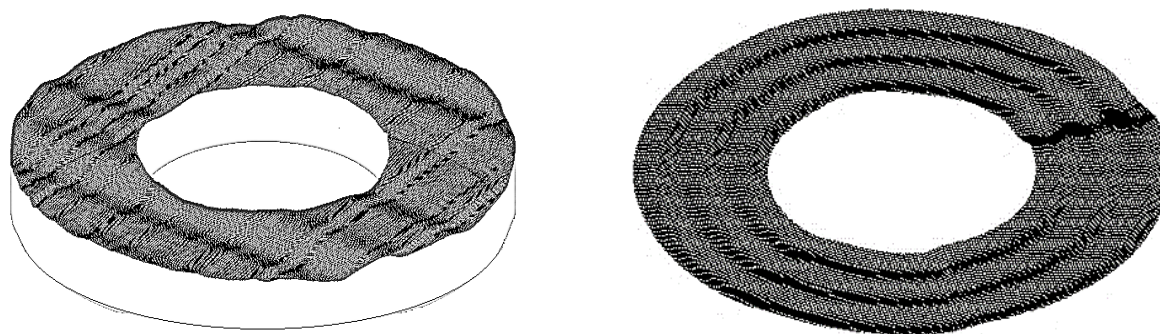


Рис. 1. Моделирование волнистости

Возрастающие и убывающие участки сплайнов соединяются таким образом, чтобы обеспечить заданные условия по числу волн и их высоте, а для полярных координат ещё нужно, чтобы начало самого первого участка было концом последнего, чтобы поверхность замкнулась в кольцо.

Моделирование шероховатости, которая накладывается на волнистость, предлагается выполнять с помощью фрактальных моделей, которые имеют максимальное сходство, устраняют ограничения по радиусу скругления шупа при их сканировании и имеют минимальную погрешность при оценке эксплуатационных свойств. При этом используются трёхмерные стандарты,

описывающие параметры поверхности, например, ГОСТ Р ИСО 25178.

Из множества методов моделирования фрактальных рядов и поверхностей можно выделить метод преобразования (фильтрации) Фурье, метод серединного смещения (случайного сложения) и метод моделирования поверхности по двухпараметрической функции Вейерштрасса-Мандельброта:

$$Z(x, y) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D_s - 2} \sqrt{\frac{\ln \gamma}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^N \gamma^{(D_s - 3)n} \left[\cos \phi_{n,m} - \cos \left\{ \frac{2\pi \gamma^n \sqrt{x^2 + y^2}}{L} \cos \left(\arctg \frac{y}{x} - \frac{\pi m}{M} \right) + \phi_{n,m} \right\} \right]}$$

Здесь M и N – количество гребней (одинаковое для изотропного профиля и разное ($M \neq N$) для анизотропного); L – длина моделируемой кривой; частотный параметр γ определяет плотность частотных составляющих ($\gamma = 1.5$); D_s – фрактальная размерность поверхности, $2 < D_s < 3$; $\phi_{n,m}$ – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале $[-\pi, +\pi]$, x и y – координаты моделируемой точки в плоскости XoY ; G – фрактальный параметр (рис. 2).

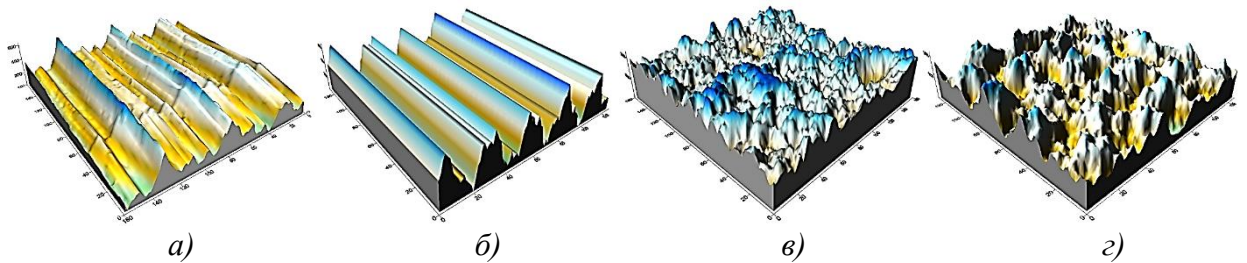


Рис. 2. Пример карт реальных поверхностей (а, в) и их моделей (б, з).

Оценка адекватности моделей реальным инженерным поверхностям проводилась по нескольким критериям: сравнение спектральной плотности реальной поверхности и модели, применение безразмерного критерия π на основе анализа размерностей, и сравнение опорных кривых (рис. 3):

$$\pi = \frac{2Ra[(2 - D_f) \ln \gamma]^{1/2}}{G^{(D_f - 1)} \sqrt{\omega_{max}^{-2(2 - D_f)} - \omega_{min}^{-2(2 - D_f)}}}$$

Здесь Ra – среднеарифметическое отклонение; D_f – фрактальная размерность профиля ($1 < D_f < 2$); ω – частота. Все критерии дают хорошую сходимость результатов (не хуже 15%), говоря о том, что модель поверхности идентична оригиналу (данные 3D профилометра *TauSurf*, МГИУ, г. Москва).

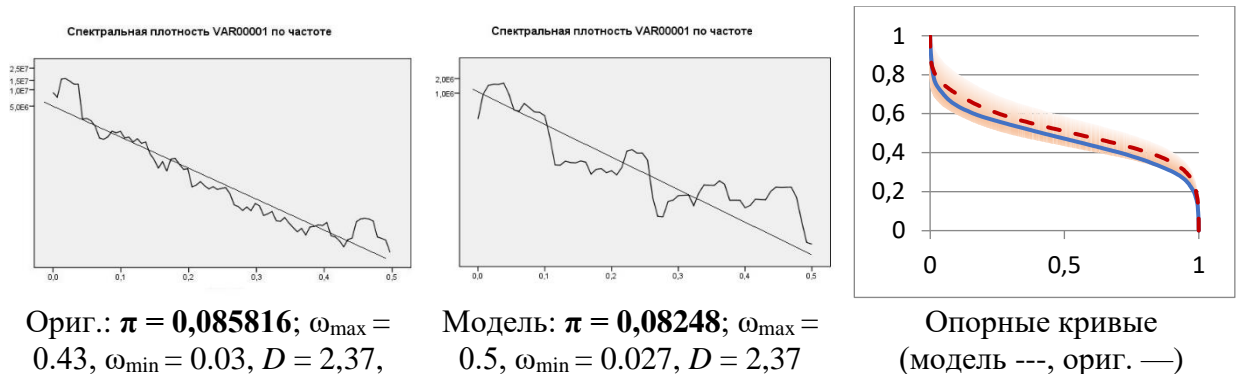


Рис. 3. Обоснование адекватности фрактальной модели.

В итоге была решена задача 2 и создана база данных поверхностей и их адекватных моделей, которая позволяет без дополнительных исследований и затрат выбирать из базы данных наиболее подходящее сочетание поверхностей, максимально удовлетворяющих заданным условиям. Все представленные процедуры реализованы автором в среде программирования C++ с использованием графической библиотеки OpenGL в рабочих модулях программы по анализу и моделированию трёхмерных поверхностей, а также разработан модуль хранения базы данных на основе технологии MySQL.

В главе 3 представлена методология оценки контактного взаимодействия волнистых и шероховатых поверхностей на основе представленной в главе 2 многоуровневой модели: контакт шероховатых поверхностей происходит на контурных пятнах контакта, образованных волнистостью с учётом макроотклонений.

Контакт волнистых поверхностей. При приложении к стыку инженерных поверхностей сжимающей силы, волны упруго деформируются. Определение контактного взаимодействия волнистых поверхностей требует разработку модели поверхности с учетом распределения пиков волн, физико-механических характеристик сопряженных материалов и таких симплексов, как отношение радиуса волн к высоте и контактного давления к модулю упругости. Соотношение между нагрузкой на отдельную волну и ее деформацией определяется в соответствии с теорией Герца с помощью имитационного моделирования, суть которого состоит в следующем.

- 1). Формируется набор волн (в виде сферических сегментов или цилиндров) с β - распределением вершин по высоте (рис. 4).
- 2). Задается сближение и определяется нагрузка, воспринимаемая каждым выступом волны (например, для сферической волны на рис. 4):

$$\delta_i = \frac{F_i}{L_i} (\lambda_1 + \lambda_2) \left\{ \ln \left[\frac{L_i^3}{4(\lambda_1 + \lambda_2) F_i \cdot r_{wi}} \right] + 2,38629 \right\}$$

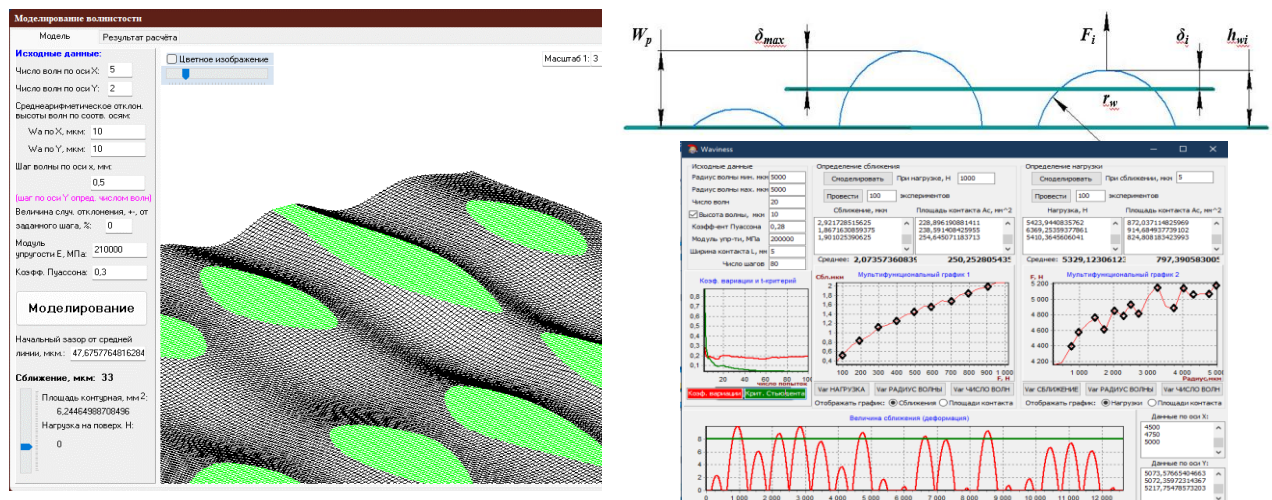


Рис. 4. Моделирование волнистости и оценка параметров контакта волнистой поверхности с плоскостью (сферическая модель)

3). Сравнивается сумма нагрузок, воспринимаемых волнами, с заданной нагрузкой на контакт: если относительная погрешность превышает допускаемое значение, то изменяют сближение (пункт 2). Методом дихотомии находят сближение, при котором погрешность не превышает заданную.

В результате находят параметры контактного взаимодействия (контурную площадь, сближение, контактное давление), соответствующее исходным данным.

Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей моделируется фрактальными поверхностями, что учитывает структурные особенности первичной поверхности без применения фильтрации. При приложении сжимающей нагрузки F_N в начале происходит пластическое смятие субмикронеровностей, которые есть, но не фиксируются при фильтрации профиля (за счет конечной величины радиуса щупа). При достижении определенного уровня контакт переходит в упругое состояние.

В соответствии с Маджумдаром, для фрактальных кривых связь радиуса кривизны микровыступа с его фрактальными параметрами такая (рис. 5):

$$R = \frac{1}{\left| \frac{d^2 z(x=0)}{dx^2} \right|} = \frac{l^{D_p}}{\pi^2 G^{(D_p-1)}} = \frac{a^{D_p/2}}{\pi^2 G^{(D_p-1)}}$$

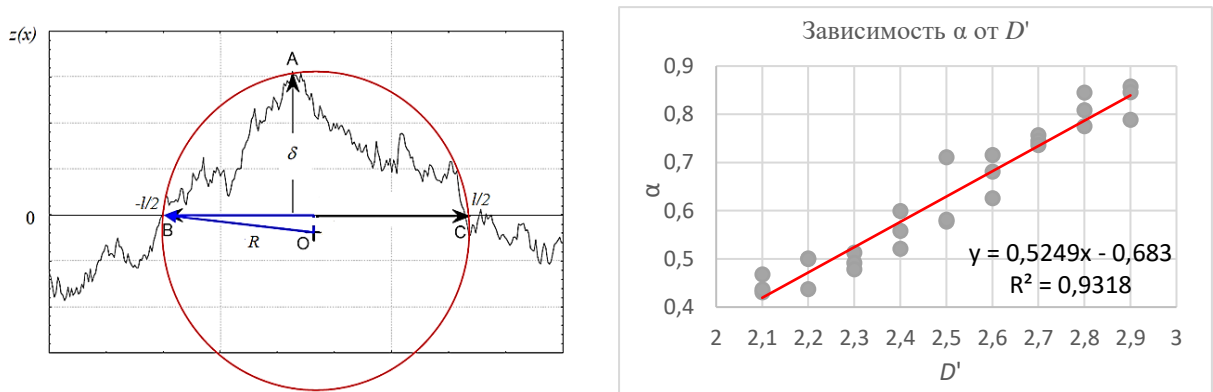


Рис. 5. Радиус кривизны микровыступа и показатель степени функции распределения пятен контакта

Здесь $a = \pi \cdot l^2$ – площадь сечения выступа, G – фрактальный параметр.

Критическую деформацию микровыступа δ_c , соответствующую переходу из пластического состояния в упругое, найдём при совместном решении задачи для фрактального выступа и сферы по Герцу (H – твёрдость):

$$\delta_c = 2,4(H/E^*)^2 R, \quad \delta_c = \frac{a_c}{\pi R},$$

Тогда критическая площадь пятна контакта (с учётом R) равна:

$$a_c = \left[\frac{\pi^3}{2,4(H/E^*)^2} \right]^{\frac{1}{D_p-1}} G^2$$

Для пластического состояния нагрузка на единичное пятно контакта

$$F_p^0 = Ha, \quad a \leq a_c$$

Для упругого состояния (с учётом R) можно записать:

$$F_e^0 = \frac{16}{3} E \pi^{(1/2)} G^{(D-2)} (\ln \gamma)^{1/2} a^{(4-D)/2}$$

Здесь $a > a_c$, γ – величина, равная (по Маджумдару) $\gamma = 1,5$.

Размерное распределение пятен контакта позволит установить связь нагрузки на трибосопряжение со сближением. Приняв размерное распределение площадей пятен контакта в виде степенной зависимости, с учётом анализа реального распределения пятен поверхности, получим

$$f(a^*) = (a^*)^{1-\alpha}$$

Для каждой поверхности (или их сопряжения) имеем свой показатель степени α . В общем случае зависимость показателя α от фрактальной размерности поверхности представлена на рис. 5 справа.

Тогда представляется возможность найти полную нагрузку на пятна контакта, находящиеся в пластическом и упругом состоянии, через их площадь (p – обозначение пластического состояния, e – упругого):

$$A_{rp} = \int_0^{a_c} a n(a) da = \frac{D_p}{2} a_L^{D_p/2} \int_0^{a_c} a^{-D_p/2} da = \frac{D_p}{2 - D_p} a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2}$$

$$a < a_c, \quad 0 \leq a_L \leq a_c$$

$$A_{re} = \int_{a_c}^{a_L} a n(a) da = \frac{D_p}{2 - D_p} (a_L - a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2})$$

$$a > a_c, \quad a_L > a_c$$

Оценка отношения контактной жёсткости к нагрузке (относительно приведенного модуля упругости) для одного микровыступа при решении задачи для фрактальной модели и модели Герца по предложенным зависимостям, представлена на рис. 6.

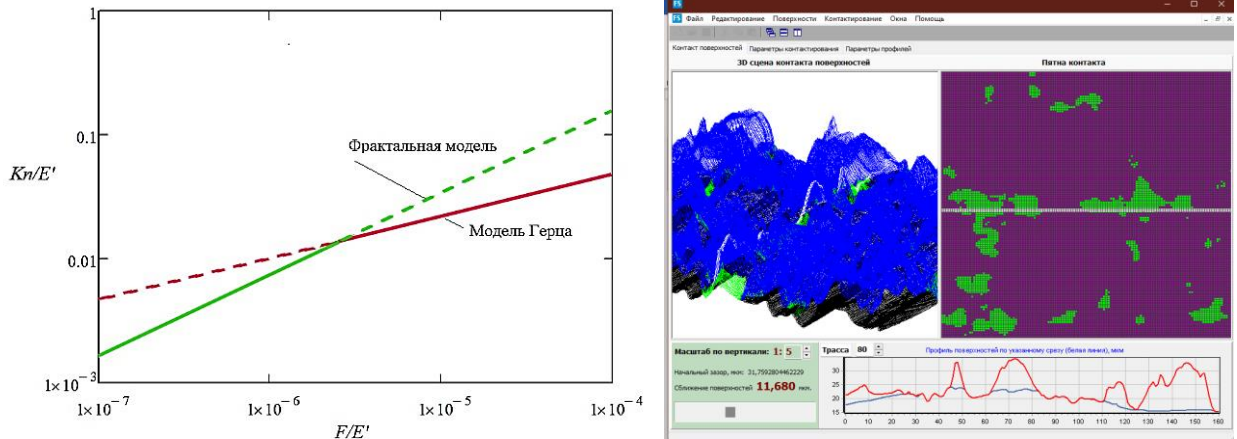


Рис. 6. Зависимость контактной жёсткости от нагрузки для разных моделей контакта, и моделирование контактного взаимодействия фрактальных поверхностей

Расчётные формулы (с учётом изложенных выше выражений) для представленных моделей следующие.

Фрактальная модель:
$$\frac{K_n}{E'} = \frac{2\sqrt{E'}}{\sqrt{10,188}} \left[\frac{1}{1,182 G^{D-1} (\ln \gamma)^{3/4} E'} F \right]^{1/(3-D)}$$

Модель Герца:
$$\frac{K_n}{E'} = \frac{1}{E'} \frac{dF}{d\delta} = \left(6r' \frac{F}{E'} \right)^{1/3}$$

Фрактальная модель правильно описывает поведение контактного

взаимодействия в области малых давлений, начинаясь с нулевой точки, а после перехода в точке пересечения моделей следует применять модель Герца.

Эксперимент по сближению (БГТУ, г. Брянск) на прессе плоских шайб диаметром 20 мм. из стали 40Х, улучшенные до 250НВ, показал, что при первом нагружении зависимость сближения от контактного давления в области малых значений не может быть линейной (иначе линия пересечёт ось у не в нуле при нулевом давлении), а повторное сближение этого не подразумевает. Это объясняется тем, что при первом сближении вершины микронеровностей относительно острые, имеют малую фактическую площадь контакта и деформируются пластически, а при повторном нагружении из-за пластического расплющивания ранее микронеровности сразу находились преимущественно в упругом состоянии (рис. 7).

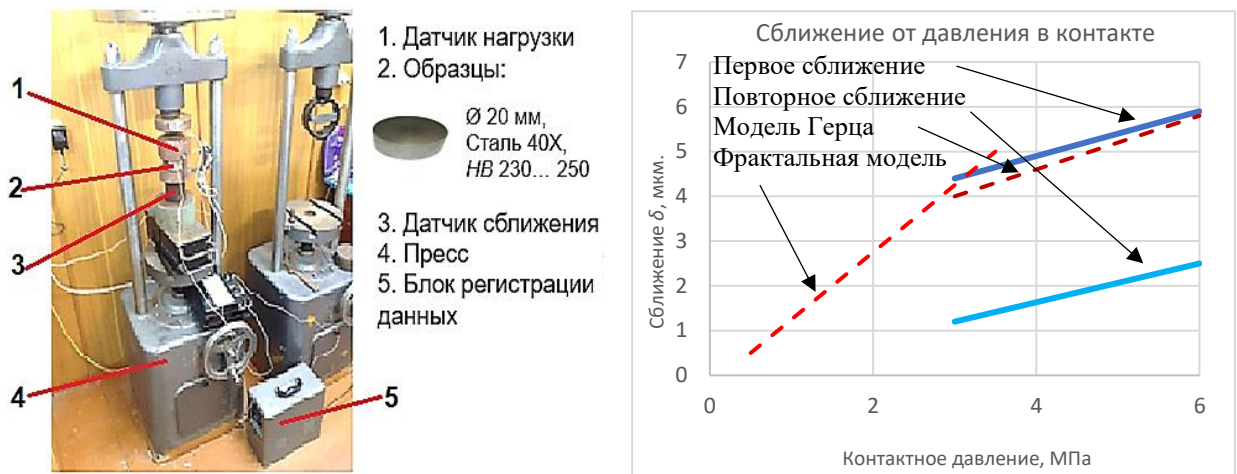


Рис. 7. Зависимость сближения от контактного давления: данные модели и эксперимента

Для сравнения моделей расчётные данные были сопоставлены с экспериментом исследователей Сианьского технологического университета (Китай), рис. 8. Их замеры сближения от контактного давления были проведены на прессе на плоских образцах с параметрами $R_a = 0.403$ мкм., $R_q = 0.417$ мкм, $D_1 = 2.6045$, $G_1 = 2.65 \cdot 10^{-9}$ м. и $R_a = 1.194$ мкм., $R_q = 1.315$ мкм, $D_2 = 2.5307$, $G_2 = 9.76 \cdot 10^{-9}$ м. (по данным 3D-профилометра *Leica DCM*).

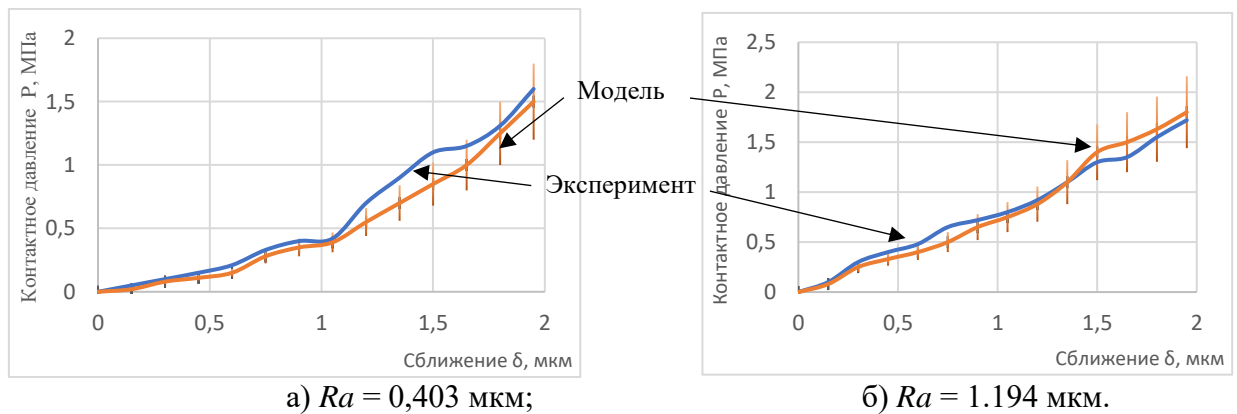


Рис. 8. Зависимость контактного давления от сближения

Наблюдается почти полное совпадение данных эксперимента и модели (нелинейность обусловлена постоянным изменением фактической площади

контакта и упруго-пластическим состоянием имеющихся пятен). Таким образом, представленная деформационная модель контакта фрактальных поверхностей является адекватной в области малых нагрузок, и задача 3 решена.

Глава 4 посвящена методике определения полного коэффициента трения сопряжённых поверхностей при малых нагрузках. Классические законы трения отличаются от законов на микро- и нано уровне.

Структура и взаимодействие фрактальных поверхностей на уровне взаимодействия шероховатостей представлены на рис. 9.

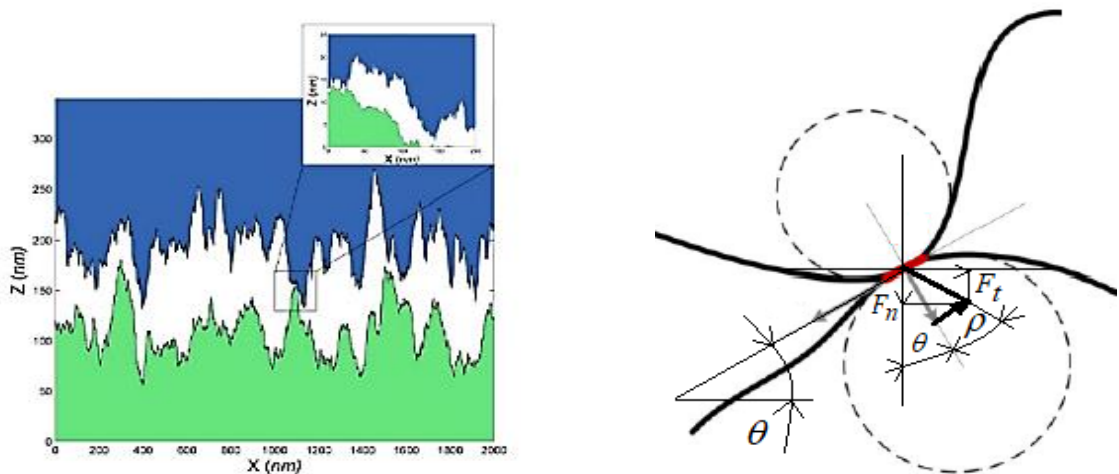


Рис.9. Взаимодействие фрактальных поверхностей

В соответствии с рис. 9 для одного микроконтакта коэффициент трения

$$\frac{F_t}{F_n} = f_i = \frac{tg\theta + tg\rho}{1 - tg\theta \cdot tg\rho}$$

где θ – угол наклона неровностей, ρ – угол трения (молекулярная составляющая трения). По всем пятнам контакта будет

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ni} \frac{tg\theta_i + tg\rho}{1 - tg\theta_i \cdot tg\rho}}{\sum_{i=1}^n F_{ni}} = \frac{tg\theta_i + tg\rho}{1 - tg\theta_i \cdot tg\rho} = \frac{tg[\theta] + f_a}{1 - tg[\theta] \cdot f_a}$$

Оценка молекулярной составляющей коэффициента трения фрактальных поверхностей проводилась при следующих допущениях:

- для всех структурных составляющих модуль упругости один и тот же;
- при оценке фактической площади не учитывается площадь пластически деформируемых пятен.

Коэффициент адгезионного трения имеет вид

$$f_a = \frac{A_r \tau}{F_N}$$

В соответствии с моделью Маджумдара-Бхушана

$$A_r = \frac{D}{2 - D} a_L,$$

где A_r - фактическая площадь контакта; D - фрактальная размерность; a_L - площадь максимального пятна контакта, τ - удельное сопротивление срезам.

С учётом критической площади пятна контакта ($a_L = a_c$) получим

предельную нагрузку, при которой фрактальная модель является корректной:

$$F_{tr} = E \left[\frac{0,886}{(6r')^{1/3}} \right]^{-3(3-D)/D} \left[\frac{1}{1,182G^{D-1}(\ln \gamma)^{3/4}} \right]^{-3/D}.$$

Тогда молекулярная составляющая коэффициента трения

$$f_a = \left(\frac{3}{4E\sqrt{\pi}G^{D-1}} \right)^{2/(3-D)} F_{tr}^{(D-1)/(3-D)} \tau.$$

В настоящей работе был применён оригинальный метод определения молекулярной составляющей коэффициента трения на атомно-силовом микроскопе AFM «FemtoScan» (БГУ, г. Брянск). Образец помещается в микроскоп на подвижный стол и подводится к игле кантилевера из нитрида кремния с радиусом закругления $r_{tip} = 20$ нм. При заданной нагрузке на кантилевер (например, в 1 нН), происходило сканирование поверхности образца и запись его трёхмерной топографии на уровне субмикрощероховатости на участке $9,5 \times 9,5$ мкм. с шагом в 20 нм с оценкой силы трения в виде отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном проходе. При этом адгезионная составляющая коэффициента трения будет равна отношению средней силы трения к нагрузке на кантилевер (рис. 10).

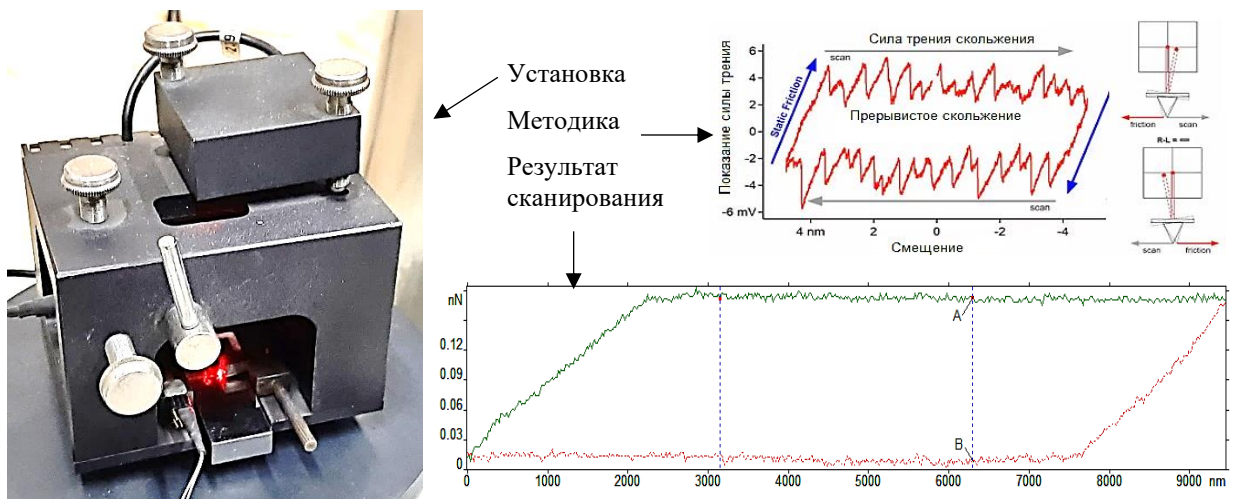


Рис. 10. Определение молекулярной составляющей коэффициента трения

Угол наклона микронеровностей был проанализирован в зависимости от фрактальной размерности на моделях. Зависимость среднего угла наклона микронеровностей от фрактальной размерности, представлена на рис. 11 слева. Анализ угла наклона показал, что для фрактальной размерности $D < 1,5$ угол наклона θ остаётся почти постоянным, т.е. $tg(\theta) = const$, тогда

$$f_a = \left(\frac{3}{4E\sqrt{\pi}G^{D-1}} \right)^{\frac{2}{3-D}} F_N^{\frac{D-1}{3-D}} \tau_0^{-1}$$

Для фрактальной размерности $D > 1,5$ молекулярная составляющая коэффициента трения остаётся почти постоянной ($f_a = const$), а угол наклона резко возрастает и аппроксимируется степенной зависимостью, например, для стали 45 с обработкой шлифованием с $R_a = 0,4$ мкм., твёрдостью $280HB$ ($\sigma_B = 850$ МПа) и фрактальными параметрами $D = 1,4$; $G^* = 10^{-7}$ (рис. 11) как

$$\operatorname{tg}(\theta) = 0,0105D^{5,0278}$$

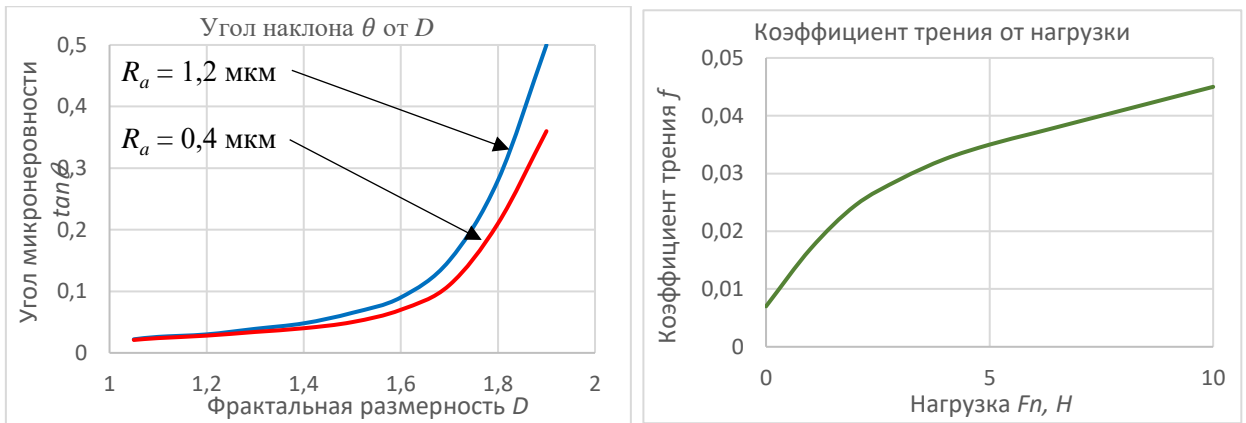


Рис. 11. Зависимость угла наклона θ от фрактальной размерности D и коэффициента трения f от нормальной нагрузки F_n

Сравнение результатов модели и экспериментов при оценке коэффициента трения представлено на рис. 12.

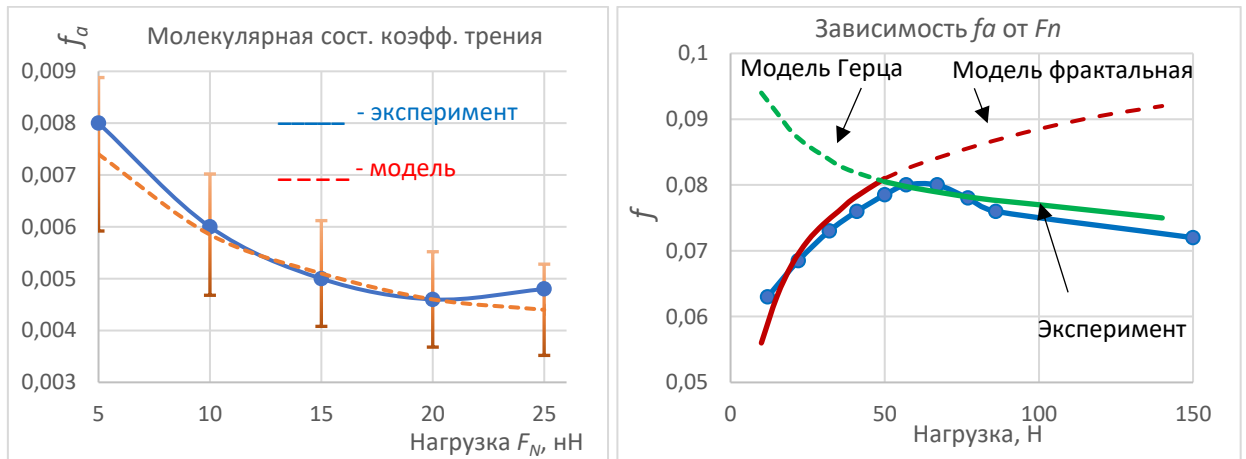


Рис. 12. Сравнение данных модели и эксперимента при оценке молекулярной составляющей коэфф. трения и полного коэфф. трения по литературным данным

Расчёт силы и коэффициента молекулярного трения для левого графика проводилось по выражениям

$$F_f = \tau \left(\frac{3\pi^{3/2} r_{tip}}{4E'} \right)^{2/3} F_N^{2/3}, \quad f = \tau \left(\frac{3\pi^{3/2} r_{tip}}{4E'} \right)^{2/3} F_N^{-1/3}.$$

Результаты эксперимента на атомно-силовом микроскопе AFM «FemtoScan» показывают хорошую сходимость с моделью (рис. 12 слева).

На рис. 12 справа представлено сравнение данных фрактальной модели и модели Герца по оценке полного коэффициента трения в зависимости от нагрузки, с данными эксперимента, взятого из литературных источников (А.Н. Шелковой, Сучасні технології в машинобудуванні. 2013), который проводился на машине трения на зубчатом зацеплении. До нагрузки в 50 Н для указанных образцов адекватное поведение показывает фрактальная модель, а после – модель Герца. Отсекая участки данных, где модели не работают (показаны штриховыми линиями), можно сделать вывод, что представленная модель

трения даёт удовлетворительное сходство с экспериментом и задача 4 решена.

В главе 5 решается задача оценки интенсивности изнашивания шероховатого слоя и прогнозирования ресурса трибосопряжения при малых нагрузках на основе оценки деформационного состояния контакта фрактальных поверхностей, адекватных реальным.

Оценим линейную интенсивность изнашивания I_h по И.В. Крагельскому и Н.М. Михину для *пластического* состояния контакта на вершинах микронеровностей первичной (фрактальной) поверхности, как

$$I_h = i_h A_r / A_a,$$

где i_h – удельная интенсивность изнашивания, равная

$$i_h = \frac{2V_p \pi R}{A_{rp} n_p \langle a \rangle}.$$

Здесь V_p – деформированный объем неровностей; n_p – число циклов нагружения при пластическом контакте, приводящих к износу неровностей; R – радиус закругления верхней части фрактальной неровности, A_{rp} – фактическая площадь контакта, $\langle a \rangle$ – средняя площадь пятен контакта.

Число циклов нагружения найдем (по И.В. Крагельскому и Н.М. Михину) из выражения

$$n_p = (2\varepsilon_p / \varepsilon_t)^{t_p},$$

где ε_p – относительное удлинение образца из рассматриваемого материала, приводящее к разрыву; ε_t – относительная деформация, связанная с трением и оцениваемая следующей зависимостью: $\varepsilon_t = c \cdot f \cdot tg\theta$, где c – коэффициент ($c = 0,01 \dots 0,05$), f – коэффициент трения; θ – угол наклона неровностей; t_p – показатель степени в уравнении кривой выносливости.

Объем отдельной деформированной неровности, моделируемой в первом приближении в виде сферического сегмента, равен

$$dV_p = \frac{\pi}{6} \delta \left[3 \left(\frac{l}{2} \right)^2 + \delta^2 \right],$$

где δ – величина сближения поверхностей при контактном взаимодействии, l – диаметр основания шарового сегмента для сферической модели.

Преобразуем это выражение, принимая во внимание контакт первичной фрактальной поверхности, введя в него площадь контакта для фрактального выступа эквивалентной поверхности с размерностью D_p :

$$dV_p = \frac{\pi}{6} A \left[\frac{3}{\pi} (a')^{(4-D_p)/2} + B (a')^{3(2-D_p)/2} \right],$$

где в качестве замены введены

$$A = 2G^{(D_p-1)} (\ln \gamma)^{1/2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{(2-D_p)/2}; \quad B = 4G^{2(D_p-1)} (\ln \gamma) \left(\frac{4}{\pi} \right)^{(2-D_p)}.$$

С учетом множественности пятен контакта запишем их сумму:

$$V_p = \int_{a_s}^{a_c} dV_p(a') n(a') da'.$$

После интегрирования получим для пластического контакта ($0 < a_s < a_c$)

$$V_p = \frac{\pi}{12} D_p A a_c^{D_p/2} \left[\frac{3 \left(a_c^{2-D_p} - a_s^{2-D_p} \right)}{\pi(2-D_p)} + \frac{B \left(a_c^{3-2D_p} - a_s^{3-2D_p} \right)}{3-2D_p} \right].$$

Таким образом, в известной формуле оценке коэффициента интенсивности изнашивания параметры, входящие в неё (V_p , R , A_r , a) определяются с учётом фрактальных представлений о природе контакта, и ещё точнее - при моделировании 3D контактного взаимодействия поверхностей.

Для упругого состояния контакта его фактическая площадь равна

$$A_{re} = \frac{D_p}{2-D_p} a_L \left[1 - \left(\frac{a_c}{a_L} \right)^{(2-D_p)/2} \right].$$

Здесь a_L – площадь максимального пятна (стремится к номинальной).

Объем отдельной деформированной неровности с площадью пятна a :

$$dV_e = \frac{a^2}{2\pi R} + \frac{\pi a^3}{6(\pi R)^3}.$$

Для множественного контакта объем изношенного материала будет

$$V_e = \int_{a_c}^{a_L} dV_e(a') n(a') da' = \frac{D_p}{2\pi R_e(4-D_p)} \left(a_L^2 - a_L^{D_p/2} a_c^{(4-D_p)/2} \right) + \frac{D_p}{6\pi^2 R_e^3(6-D_p)} \left(a_L^3 - a_L^{D_p/2} a_c^{(6-D_p)/2} \right).$$

Число циклов нагружения, приводящих к отделению материала от поверхности и образованию частиц износа для упругого контакта найдём как

$$n_e = \left(\frac{\sigma_B}{k' f_{min} p_r} \right)^{t_e}.$$

Здесь σ_B - временное сопротивление разрыву; k' - коэффициент, принимаемый для высокоэластичных материалов равным 3, для хрупких 5; f_{min} - коэффициент трения, соответствующий принимаемому давлению; p_r - фактическое давление, равное $p_r = F_N/A_r$; t_e - показатель степени в уравнении Веллера (для сталей $t_e = 10 \dots 14$). Число циклов оценивается величиной $n_e = 0,46 \cdot 10^6$.

Представим на графиках зависимости коэффициента интенсивности изнашивания от микрогеометрии поверхности (рис. 13). Для пятен, находящихся в упругом состоянии (справа), зависимость представлена в виде отношения $n \cdot a_c$, где n - число пятен контакта. Исходные данные следующие: фрактальная размерность поверхности $D_p = 1.629$, параметр фрактальной шероховатости $G = 3,5 \cdot 10^{-3}$ мкм; среднее квадратичное отклонение $R_q = 0,29$ мкм; твердость изнашиваемой стальной детали $H = 2000$ Н; модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; число циклов нагружения (по И.В. Крагельскому и Н.М. Михину при $c = 0,03$; $f = 0,15$; $\theta = 6^0$; $\varepsilon_p = 0,2$; $t_p = 1,3$) $n_p = 6,4 \cdot 10^3$, расчетные параметры: критическая площадь пятна контакта из условия перехода от пластической деформации к упругой $a_c = 38,66$ мкм²; средняя

площадь пятна $\langle a \rangle = 14,49$ мкм; коэффициент интенсивности изнашивания $I_h = 5.88 \cdot 10^{-4}$.

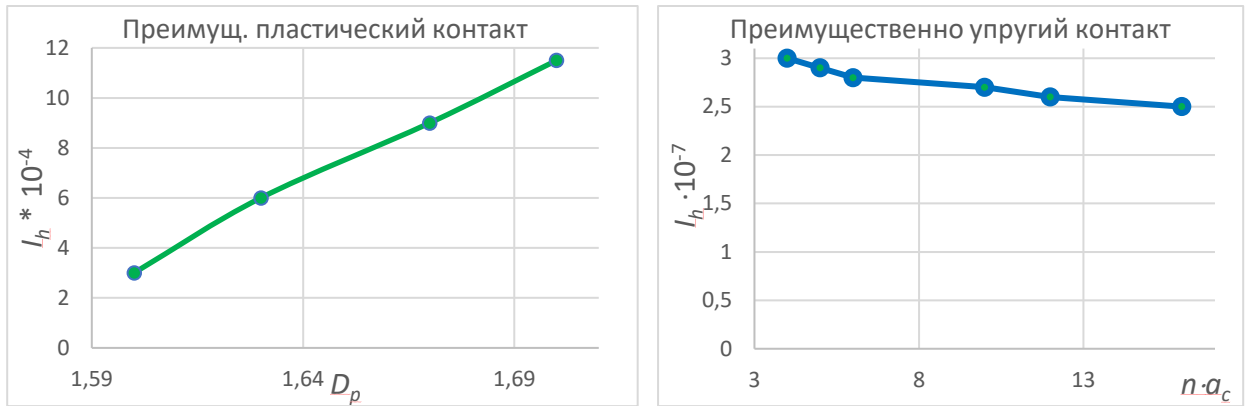


Рис. 13. Зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от микрогеометрии поверхности: для пластического и упругого контакта

Как видно из рис. 13 (слева), зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от фрактальной размерности при пластическом контакте в рассматриваемом диапазоне носит практически линейный характер. Следует отметить, что рост изрезанности (фрактальной размерности) приводит к росту износа. На начальном этапе изнашивания (приработке) происходит снижение фрактальной размерности (сглаживание), и темп изнашивания снижается, что свидетельствует о приближении к моменту окончания этапа приработки и косвенному подтверждению представленной модели изнашивания.

Коэффициент износа при упругом контакте (рис. 13 справа) имеет практически постоянное значение при рассматриваемом изменении площади пятна контакта. Это означает, что в процессе нормального изнашивания коэффициент износа практически постоянен, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Данная модель изнашивания не учитывает тот факт, что площадь среза неровностей на определенной высоте и площадь после износа не совсем совпадают из-за скалывания, деформирования и т.д., что даёт некоторые погрешности.

Предложенный подход позволяет прогнозировать продолжительность этапа приработки. Используя уравнение Арчарда при $I_h = k_{wпр}$, получим

$$V_d = k_w \frac{F_N L}{H}$$

Учитывая, что для сферы $h_0 = k_{wпр} \frac{F_N L}{A_a H} = \frac{a_c}{\pi R}$, запишем путь трения, соответствующий окончанию приработки, в виде (рис. 14)

$$L = \frac{H a_c A_a}{\pi k_{wпр} F_N R}$$

После приработки пятна контакта будут находиться в преимущественно упругом состоянии, для которого объёмный износ будет равен (рис. 14 слева)

$$V = A_r \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wп}) \cdot \left(\frac{2 - D_p}{D_p} A_r \right)^{\frac{D_p - 2}{2}} \cdot \left(\left[\frac{\pi^3}{2,4(H/E^*)^2} \right]^{\frac{1}{D_p - 1}} G^2 \right)^{\frac{2 - D_p}{2}} \right] L$$

Для обоснования выбора показателей качества поверхностного слоя введем следующие безразмерные обозначения:

$$V^* = \frac{V}{LA_a}; \quad A_r^* = \frac{A_r}{A_a}; \quad G^* = \frac{G}{\sqrt{A_a}}; \quad \psi = \frac{H}{2E}.$$

Здесь V - износ; L - путь трения, A_a - номинальная площадь, A_r - фактическая площадь; H - твердость; E - модуль упругости.

Тогда зависимость износа от фрактальной размерности (рис. 14 справа):

$$V^* = \sqrt{1 + 3f^2 A_r^*} \cdot \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wp}) \left(\frac{D}{(2-D)A_r^* \psi^{2/(D-1)}} \right)^{(2-D)/2} \right].$$

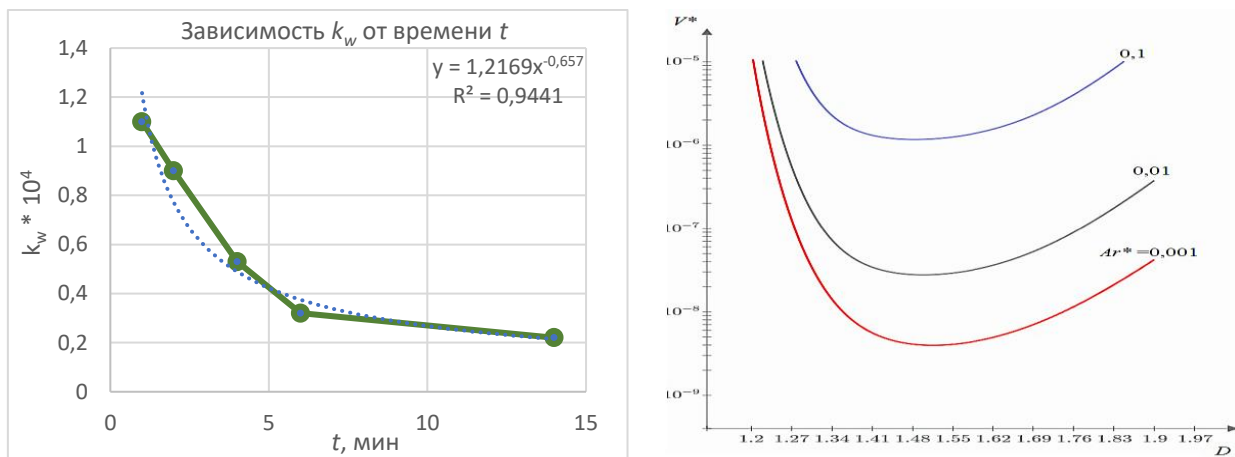


Рис. 14. Оценка коэффициента износа (слева) и безразмерного объема изношенного материала от фрактальной размерности (справа)

Анализ показывает, что для выбранных условий изнашивания существует некоторый минимум объёмного износа, соответствующей определённой микрогеометрии - аналогу равновесной шероховатости. Таким образом, решена задача 5 по оценке интенсивности изнашивания и найден способ управлять износом путём подбора оптимальной микрогеометрии.

Применим полученные в работе результаты для оценки параметров предохранительной муфты стрелочного перевода как слабонагруженного узла трения. Конструкция предохранительной муфты стрелочного перевода представлена на рис. 14, где в ступицу 1 установлены фрикционные диски 2 и 3, прижимающиеся друг к другу винтовыми пружинами 4 через нажимной диск 5.

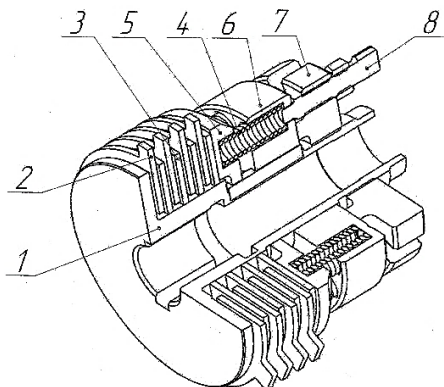


Рис. 15. Конструкция предохранительной муфты

Усилие прижатия дисков регулируется с помощью прижимной гайки 7 через нажимной корпус 6. Стопорный винт 8 блокирует отвинчивание гайки 7 для обеспечения постоянного усилия прижатия, рассчитанного на определенный крутящий момент для работы муфты без проскальзывания фрикционных дисков.

Номинальная площадь контакта при среднем радиусе кольцевой поверхности трения $R_{cp} = 58$ мм. и ширине дорожки трения 11 мм будет $S \approx 1200$ мм². Передаваемый крутящий момент на муфте $T_H = 14,76$ Н·м, и с учётом коэффициента запаса $\beta = 1.2$ он увеличивается до $T_M^* = 17,71$ Н·м. Усилие прижатия дисков регулируется гайкой в диапазоне $F = 1000 \dots 4000$ Н, и номинальные контактные давления, например, при $F = 2000$ Н, будут равны $P = F / S = 2000 \text{ Н} / 1200 \text{ мм}^2 = 1,66$ МПа.

Рассмотрим процесс трения фрикционных дисков. Модель трения состоит из шероховатой стальной поверхности и гладкой металло-керамической (фрактальная размерность будет относиться к стальной поверхности). Для стального диска имеем $R_a = 0.68$ мкм, и, проведя моделирование контактного взаимодействия указанных моделей с заданными параметрами, получили среднюю площадь единичного пятна контакта $a_i = 100$ мкм² при параметре фрактальной шероховатости $G = 10^{-3}$ мкм, что при молекулярной составляющей коэффициента трения $f_a = 0.1$ дало полный коэффициент трения $f = 0,153$.

На основании рабочих характеристик муфты были получены следующие параметры: угловая скорость ведущего диска $\omega_l = 35,9$ с⁻¹, время одного включения муфты $t_{вкл1} = 0,018$ с, предел прочности при сжатии металлокерамического диска $\sigma_B = 1916$ МПа. При этом расчётное число циклов нагружения составило $n_e = 8,215 \cdot 10^8$ циклов, для которого коэффициент износа пластически деформируемых пятен композиционного материала составил $k_{впр} = 4,379 \cdot 10^{-5}$, а коэффициент изнашивания при упругом взаимодействии $k_{ве} = 1,217 \cdot 10^{-9}$. Суммарная интенсивность изнашивания модели составила $I_h = 1,74 \cdot 10^{-8}$.

В таблице 1 представлены данные, полученные в результате расчёта по традиционной методике, а также предлагаемой новой в этой работе и данные эксперимента для пары трения сталь ($Ra=1,25$ мкм) с металлокерамикой.

Таблица 1

Сравнение триботехнических показателей и ресурса

Методика расчета	Коэффициент трения f	Интенсивность изнашивания I_h	Ресурс
Традиционная методика	0,147	$0,886 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^6$
Предлагаемая методика	0,153	$0,1747 \cdot 10^{-7}$	$6,09 \cdot 10^6$
Эксперимент	-	$0,140 \cdot 10^{-7}$	-

Предлагаемая в настоящей работе методика даёт гораздо более точные результаты расчёта, близкие к экспериментальным значениям.

В главе 6 представлена методика оценки протекания уплотняемой среды через стык инженерных поверхностей с оценкой параметров структуры зазора как подтверждение адекватности предлагаемых ранее моделей и методов расчёта.

Полагаем, что при наличии волнистости и шероховатости утечка жидкости определяется выражением

$$Q = \alpha Q_F + (1 - \alpha) Q^*,$$

где $\alpha = A_c/A_a$, A_c – контурная площадь, определяемая волнистостью; A_a – номинальная (геометрическая) площадь поверхности уплотняющего кольца, Q^* – утечка через зазор, образованный контактом волнистых поверхностей, Q_F – просачивание через пористый слой, образованный шероховатостью на контурных пятнах контакта (рис. 15).

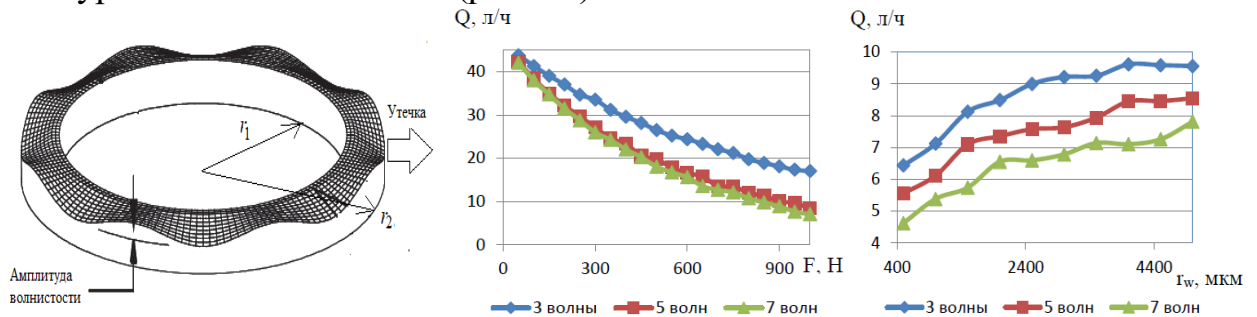


Рис. 15. Модель уплотнения и зависимость утечки через щель от параметров волнистости

Утечку среды с динамической вязкостью η через щель волнистых поверхностей размером δ и перепаде давления Δp найдём по Рейнольдсу как

$$Q = \frac{4\pi\delta^3\Delta p}{3\eta \ln(r_2/r_1)}$$

Модель позволяет проанализировать влияние геометрии волнистой поверхности (радиуса r_w и числа волн) на величину утечки (рис. 15) с параметрами $W_p = 10$ мкм, $\Delta p = 0,9$ МПа, $r_2 - r_1 = 5$ мм, $\eta = 0,01$ Па·с (вода).

Оценка протекания через пористую среду. Расход жидкости с динамической вязкостью η через прямолинейный цилиндрический канал радиусом r по Пуазейлю и утечка жидкости через пористую среду имеет вид

$$q^*(r) = -\frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dL_T}; \quad Q_F = -\int_{r_{min}}^{r_{max}} q^*(r) dN(r)$$

Здесь $N(r)$ – число пор, чей радиус находится в диапазоне от r до $r+dr$.

Средний диаметр пор и гидравлический радиус равен соответственно

$$d_K = 2r = \frac{\lambda^{\frac{1}{1-D_T}} \cdot \delta}{A_c^{D_T/(2[1-D_T])}}; \quad r = \frac{\lambda^{\frac{1}{1-D_T}} \cdot \delta}{2 \cdot A_c^{D_T/(2[1-D_T])}}$$

Здесь L_T – длина извилистого канала протекания, λ – параметр, определяемый экспериментально, δ – масштаб измерения (раствор циркуля при измерении длины кривой), $D_T = 1 - \ln \frac{L_T}{L} / \ln \frac{2r}{L}$ – фрактальная размерность кривой (цепочки пор на основе выражения длины извилистого канала).

С учётом свойства самоподобия фрактальных кривых можно найти

коэффициент извилистости для размера участка протекания $L = \sqrt{A_c}$ как

$$K_{изв} = \frac{L_T}{\sqrt{A_c}} = \lambda \left(\frac{\delta^{1-D_T}}{L} \right)^{1-D_T}$$

Приняв градиент давления $dP/dL_0 = \Delta P/L_0$ и учтя размерное распределение пятен контакта, после преобразования можно получить

$$Q_F = - \frac{\pi \cdot r_{max}^4}{8\eta(4 - D_f)} \frac{\Delta P \cdot D_f}{(D_T - 1)\lambda \cdot A_c^{0.5(1-D_T)} \delta^{1-D_T} \cdot L_0^{D_T-1}}$$

Фрактальная размерность пористости D_f можно найти как

$$D_f = D_E + \frac{\ln m}{\ln \frac{r_{max}}{r_{min}}} - 1 = 3 + \frac{\ln m}{4,605} - 1 \approx 2 + 0,215 \cdot \ln m.$$

Здесь D_E – Евклидова размерность; m – пористость; $r_{min} / r_{max} = 10^{-2}$.

Сложная форма каналов (рис. 16) не позволяет составить и решить уравнения движения уплотняемой среды, поэтому решением такой задачи является моделирование пористого слоя контактом реальных поверхностей или их фрактальных моделей в анализируемом масштабе размеров, для чего была разработана компьютерная программа, позволяющая определить извилистость каналов протекания, т.е. найти самый кратчайший путь, а также определить нагрузку на стык или величину сближения поверхностей, при котором наступает полная герметичность соединения.

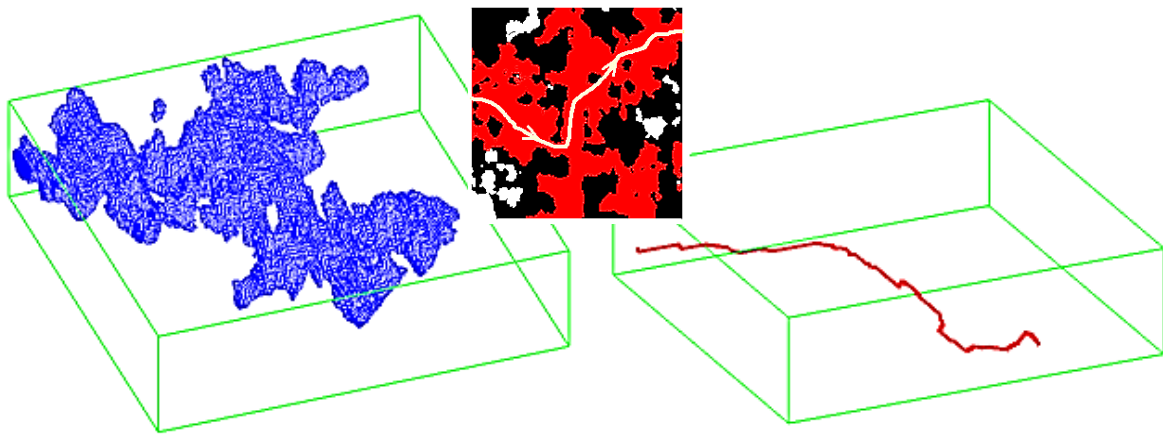


Рис. 16. Визуализация процесса протекания жидкости в межконтактном зазоре.

Результат моделирования протекания трансформаторного масла ($\eta = 0,0316$ Па·с) и нефти ($\eta = 0,2$ Па·с) при перепаде давления в $\Delta p = 10^6$ Па через осесимметричное уплотнение с параметрами $L_0 = 0,8$ мм, $A_c = 10$ мм², $\delta = 2$ мкм, $D_f = 1,5$, $D_T = 1,5$ представлены на рис. 17 при влиянии на величину утечки максимального радиуса пор r_{max} , фрактальной размерности извилистости D_T и пористости D_f . В области $D_T = 1,5$ наблюдается минимум утечки среды.

Сравнение экспериментальных данных (БГТУ, г. Брянск) с моделью протекания керосина через стык поверхностей из стали 45 для гладких образцов с $Ra = 0,12$ мкм. при давлении в 20 МПа и грубых образцов с $Ra = 2,2$ мкм. при давлении в 5 МПа представлено на рис. 18. Погрешность данных эксперимента и расчёта не превышает 35%.

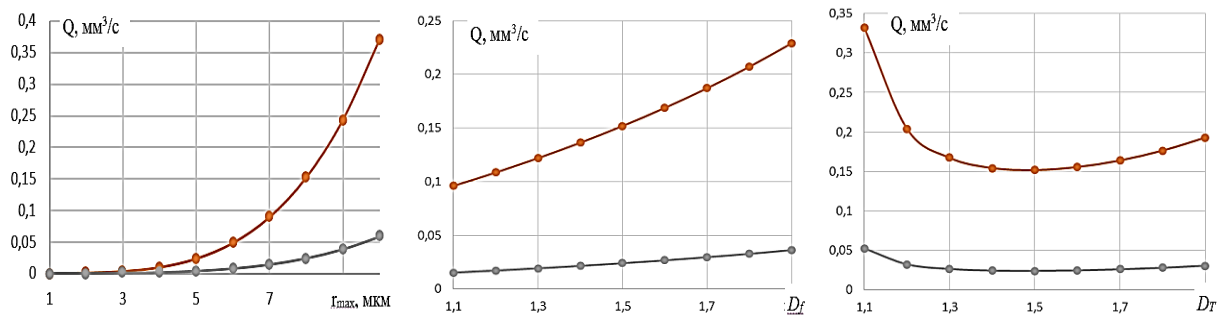


Рис. 17. Зависимость утечки от параметров пористой среды.

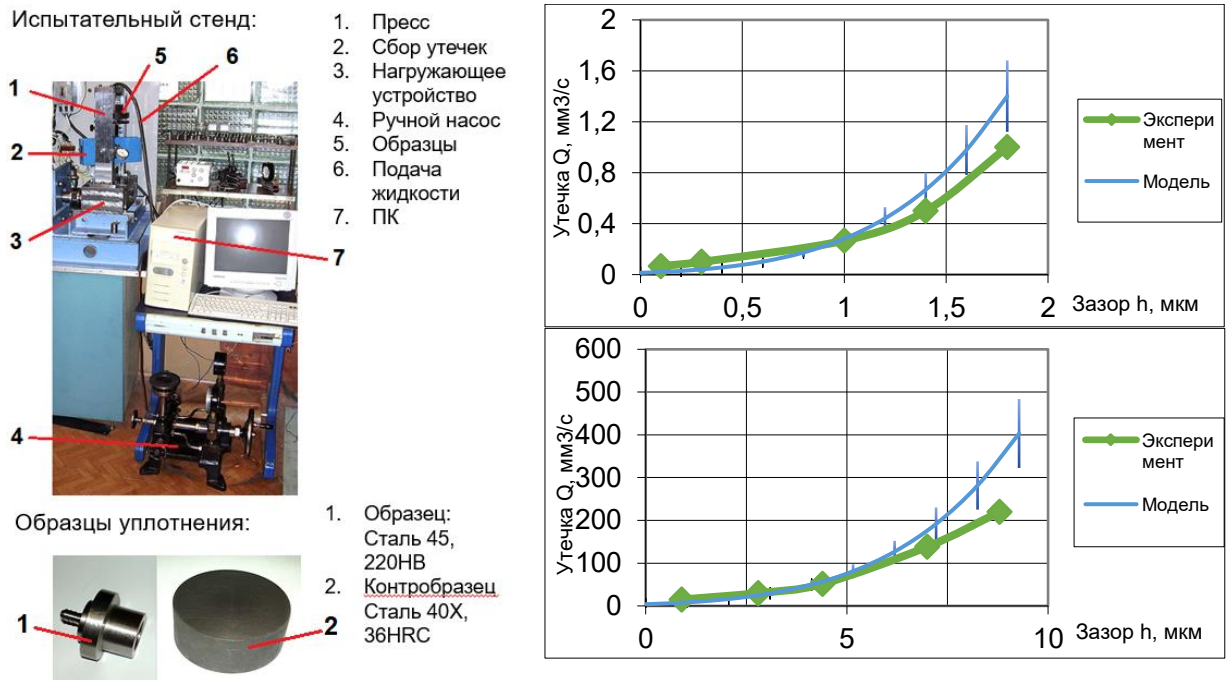


Рис. 18. Зависимость утечки керосина от сближения поверхностей неподвижного торцевого уплотнения: $Ra = 0.12$ мкм. и $p = 20$ МПа; $Ra = 2,2$ мкм. и $p = 5$ МПа;

Таким образом, решена задача б по оценке протекания уплотняемой среды через стык инженерных поверхностей на основе предложенных ранее многоуровневой модели поверхности и деформационной модели контактирования.

В главе 7 оценивается экономическая эффективность применения представленной выше комплексной технологии проектирования узлов при малых нагрузках на основе моделирования контактного взаимодействия адекватных многоуровневых моделей сопряжённых поверхностей, позволяющих оценить износостойкость и долговечность трибосопряжения и герметичность. Преимущество перед существующими методами расчёта состоит в том, что в данном случае используются реальные данные, которые определяются в процессе компьютерного моделирования контакта сопряжённых поверхностей на разных уровнях взаимодействия, избегая поисков различных коэффициентов по эмпирическим зависимостям, которые могут и не соответствовать конкретному случаю.

Области потенциального эффекта от применения представленной методологии проектирования могут быть следующие:

- Ускорение проектирования трибосопряжений и получение надёжных данных при подборе оптимального сочетания поверхностей трения, работающих при малых нагрузках, при использовании разработанного прикладного программного обеспечения на основе предлагаемой многоуровневой модели поверхностей и модели их контактирования.
- Расчёт оптимального режима нагружения F_N для режима приработки или оптимального контактного давления P_r для слабонагруженного узла трения с подбором оптимальной микрогеометрии поверхностей (R_a , D_s , G^*) для выбранного материала (H , E), для обеспечения минимального износа.
- Более точная оценка состояния работающего трибосопряжения после воссоздания его при моделировании в рабочих условиях в предложенных программах и оценка его остаточного ресурса.
- Повышение безопасности и экологичности эксплуатации трубопроводных систем за счёт повышения надёжности работы уплотнений методом расчёта их герметичности и интервалов обслуживания.

Актом муниципального унитарного предприятия «Брянское городское пассажирское предприятие» о реализации на нём исследований автора за 2020 год отмечено, что расчёт времени ремонта уплотнительных устройств подвижного состава по разработанным моделям позволил за счёт уменьшения времени простоя и экономии материалов и запчастей уменьшить годовые издержки предприятия на 1 192 201 руб. Кроме этого, предприятие улучшило экологичность и безопасность производства, уменьшило расходы на поддержку санитарии на предприятии и транспорте, снизило затраты на минимизацию последствий загрязнения и улучшило условия труда персонала, что в целом позволило повысить качество предоставляемых услуг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научно-квалификационной работе решена научная проблема обеспечения износостойкости кинематических пар трения на этапе проектирования, имеющая важное хозяйственное значение, заключающееся в снижении затрат при проектировании на основе моделирования поведения трибосистем при трении, а также в ускорении процесса приработки за счёт подбора оптимальной исходной микрогеометрии поверхностей и в научном обосновании интервалов техобслуживания.

Основные выводы и результаты работы.

1. Проведённый анализ существующих моделей контактного взаимодействия и расчётов пар трения при малых нагрузках выявил значительное расхождение экспериментальных и расчётных данных в этих условиях, а отсутствие аналитического подхода к оценке триботехнических параметров процесса трения подтвердило актуальность исследований.
2. Установлено, что предложенная трёхмерная многоуровневая модель инженерных поверхностей позволяет одновременно учесть основные особенности геометрического строения поверхностного слоя (макроотклонения, волнистость, шероховатость) и является основой для

- создания базы данных 3D карт шероховатых поверхностей, а отличие модели от реальной поверхности по стандартным высотным параметрам шероховатости не превышает 15%.
3. Выявлена новая механика деформации микровыступов шероховатых поверхностей на микроуровне и на её основе разработана методология расчёта параметров контакта узлов, работающих при малых нагрузках, в согласии с которой первоначальный контакт возникает на вершинах микронеровностей в пластическом состоянии и адекватно описывается фрактальной моделью, а при увеличении нагрузки и росте площади пятен контакта происходит переход их в упругое состояние, где применяется модель Герца. Полученный критерий перехода из пластического состояния в упругое в виде критической площади пятна контакта a_c разграничивает области применения этих моделей и зависит от фрактальной микрогеометрии поверхностей (фрактальной шероховатости G и размерности D_S), а также физико-механических параметров материала.
 4. Разработанная методика оценки полного коэффициента трения сопряжённых поверхностей при малых нагрузках и хорошая корреляция фрактальной размерности D_S с углом наклона микронеровностей позволила выявить новую закономерность влияния микрогеометрии на коэффициент трения: при $D_S < 2,5$ коэффициент трения в основном определяется адгезионными свойствами материала, т.к. угол наклона микронеровностей мал и деформационная составляющая практически не влияет на трение. Для $D_S > 2,5$ угол наклона микронеровностей начинает расти, и коэффициент трения в основном определяется деформационной составляющей при почти неизменной адгезионной из-за малой фактической площади пятен контакта. Таким образом установлена возможность управления коэффициентом трения: в начальный момент работы (или приработки) коэффициент трения будет тем меньше, чем ближе фрактальная размерность исходной поверхности к $D_S = 2,5$, а по мере изнашивания микронеровностей (или приближении к установившемуся режиму) коэффициент трения станет минимальным для поверхностей, микрогеометрия которых обеспечит наименьшую фактическую площадь контакта и минимальный её рост в процессе изнашивания.
 5. Предложенная методика оценки удельного коэффициента сопротивления сдвигу фрикционных связей (адгезионной составляющей коэффициента трения) с помощью анализа величины отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном сканировании гладких образцов поверхности ($Ra \leq 0,2$) является эффективной и точной, т.к. влияние деформационной составляющей при этом крайне мало.
 6. Разработанная методика и алгоритм оценки интенсивности изнашивания шероховатого слоя сопряжённых поверхностей позволила установить, что исходная микрогеометрия при малых нагрузках оказывает значительное влияние на процесс трения, а фрактальная размерность поверхности D_S является надёжной характеристикой микрогеометрии поверхности и

определяющим фактором при оценке триботехнических параметров. Установлено, что фрактальная размерность в процессе изнашивания при малых нагрузках меняется незначительно в сравнении с исходной: изменение среднего квадратического отклонения Rq от 1,6 до 6,3 мкм (почти в 4 раза) привело к изменению фрактальной размерности от D_s от 2,424 до 2,356, т.е. всего на 2,8 %. Увеличение высоты выступов или изрезанности неровностей (D_s) в сравнении с оптимальным значением $D_s = 2,4 \dots 2,5$ резко увеличивает износ из-за перехода пятен контакта в пластическое состояние и ускоряет их разрушение, а сглаживание поверхности больше этого значения приводит к росту сопротивления при трении и увеличению износа за счёт адгезии.

7. Предложен алгоритм прогнозирования поведения узлов трения на этапе проектирования, работающих при малых нагрузках, или работающих в режиме приработки, который заключается в применении разработанных программ компьютерного моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей для оценки времени изнашивания микронеровностей под действием заданной нагрузки и величины износа. Выбор разного сочетания 3D карт поверхностей из созданной базы данных даёт разную величину интенсивности изнашивания и разное время приработки, соответствующее достижению максимального числа пятен контакта, находящихся в упругом состоянии. При переборе разных сочетаний карт поверхностей можно найти такое их сочетание, при котором при заданной нагрузке будет минимальная интенсивность изнашивания или время приработки, и тогда для данного трибоузла следует назначить микрогеометрию, соответствующую выбранным поверхностям.
8. Разработанный алгоритм моделирования протекания уплотняемой среды через уплотнительное устройство позволил оценить параметры структуры зазора и величину утечек, а разработанная по этому алгоритму компьютерная программа, на которую получено свидетельство о её регистрации, дала экономию 1 192 201 руб. за 2020 год. на одном МУП «Брянское городское пассажирское предприятие» за счёт своевременного обслуживания уплотнений.
9. Все модели и методы расчётов, представленные в работе, реализованы в виде рабочих программ для ЭВМ, получены свидетельства о регистрации программ. Проведённые эксперименты показали расхождение данных с результатами моделирования не более 40%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Измеров М.А. Инженерия фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров // Монография, М.- Машиностроение, 2011. – С. 184. (10,93 / 3,64 п.л.)
2. Измеров М.А. Герметичность разъемных неподвижных соединений / В.П. Тихомиров,

- В.В. Порошин, О.А. Горленко, М.А. Измеров // Монография, М. - МИИР. - 2014. – С. 276. (16,04 / 4,01 п.л.)
3. Измеров М.А. Анализ трибосистем / В.П. Тихомиров, В.В. Порошин, О.А. Горленко, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров // Монография, М.: МИИР. - 2016. - С. 315. (18,3 / 3,66 п.л.)
 4. Измеров М.А. Синтез триботехнических систем // В.П. Тихомиров, В.В. Порошин, О.А. Горленко, М.А. Измеров // Монография, М.: Купер Бук. – 2019. – С. 245. (14,24 / 3,56 п.л.)
 5. Измеров М.А. Контактная жесткость и герметичность плоского стыка деталей машин // В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, С.С. Сеницын, П.В. Тихомиров // Монография, Брянск: ООО «Новый проект», 2021. – 218 с. (12,7 / 3,2 п.л.)

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

6. Измеров М.А. Модель инженерной поверхности / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2010. - № 4. - С. 24 - 29. (0,34 / 0,17 п.л.)
7. Измеров М.А. Фрактальный метод оценки качества поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. - № 8. - С. 10 - 15. (0,34 / 0,17 п.л.)
8. Измеров М.А. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2011. - № 4. - С. 12 - 23. (0,7 / 0,18 п.л.)
9. Измеров М.А. Протекание через фрактальную пористую среду / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2011. - Т. 13. - № 4-3. - С. 879 - 883. (0,29 / 0,1 п.л.)
10. Измеров М.А. Герметичность металл - металлических соединений как порог протекания через фрактальную пористую среду // М.А. Измеров, В.П. Тихомиров, И.М. Лавит // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2012. - № 2. - С. 9 - 17. (0,52 / 0,18 п.л.)
11. Измеров М.А. Адекватность модели и реальной поверхности // М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2012. - № 3. - С. 64 - 71. (0,46 / 0,23 п.л.)
12. Измеров М.А. Механика контактного взаимодействия плоских волнистых поверхностей / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров, А.Н. Прокофьев // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2013. - № 4 (40). - С. 87 - 94. (0,46 / 0,12 п.л.)
13. Измеров М.А. Закон распределения пятен в задачах механики дискретного контакта / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров, В.И. Воробьёв, С.Г. Волохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2014. - № 6 (308). - С. 21 - 27. (0,4 / 0,1 п.л.)
14. Измеров М.А. Фильтрационная модель протекания через фрактальную пористую среду / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. -2014. -№ 3 (305).- С. 7-14. (0,46 / 0,23п.л.)
15. Измеров М.А. Фрактальные модели инженерных поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров / Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - № 3. - С. 72 - 80. (0,52 / 0,18 п.л.)
16. Измеров М.А. Контактная механика фрактальных поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2015. - № 1 (45). - С. 60 - 66. (0,4 / 0,2 п.л.)
17. Измеров М.А. Протекание через торцовое уплотнение с учетом волнистости и шероховатости / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 4 (52). - С. 83 - 93.

(0,63 / 0,32 п.л.)

18. Измеров М.А. Герметичность металл - металлических уплотнительных устройств. / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 1. - С. 89 - 99. (0,63 / 0,32 п.л.)
19. Измеров М.А. Контактная жесткость плоского стыка. / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, Д.Я. Антипин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2016. - Т. 18. - № 1-2. - С. 327 - 331. (0,29 / 0,1 п.л.)
20. Измеров М.А. Нормальная контактная жёсткость фрактальных поверхностей стыкового соединения // В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров // Качество и жизнь. – 2018. - №4 (20). – С. 429 – 433. (0,29 / 0,1 п.л.)
21. Измеров М.А. Влияние волнистости и шероховатости поверхности на нормальную контактную жесткость плоского стыка // В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Вестник Брянского государственного технического университета, 2019. - № 12 (85). - С. 4 - 12. (0,52 / 0,26 п.л.)
22. Измеров М.А. Определение закономерности изнашивания сферического подшипника скольжения // В.П. Тихомиров, А.О. Горленко, М.А. Измеров, О.В. Дорофеев, С.Н. Злобин, А.Н. Ерохин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - Орёл, Госуниверситет – УНПК, 2020. - № 1 (339). - С. 8 - 16. (0,52 / 0,09 п.л.)
23. Измеров М.А. Трение металл-металлических поверхностей // В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, С.В. Кузнецов, А.Г. Горностаева // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 3 (129). С. 40-48. (0,52 / 0,13 п.л.)
24. Измеров М.А. Трение фрактальных поверхностей // М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // Вестник Брянского государственного технического университета, 2022. - № 1-2. - С. 20 - 28. (0,52 / 0,26 п.л.)
25. Измеров М.А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения // В.П. Тихомиров, М.Г. Шальгин, М.А. Измеров // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6 (144). С. 20-27. (0,46 / 0,16 п.л.)

Издания, цитируемые в международной базе Scopus.

26. Tikhomirov V.P. Distribution of contact spots sizes on rough surfaces / V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015. - 2015. - С. 7414926. (0,23 / 0,12 п.л.)
27. Tikhomirov V.P. Simulation of leakage through the mechanical sealing device // V.P. Tikhomirov, O.A. Gorlenko, M.A. Izmerov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 - Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment", 2018. – Volume 327(4). - P. 042047 (408 – 413). (0,34 / 0,12 п.л.)
28. Izmerov M.A. Fractal model of elastoplastic contact of nominally flat rough surfaces // M.A. Izmerov V.P. Tikhomirov // International conference on AviaMechanical engineering and transport (AviaENT 2019): Advances in engineering research (AER), 2019. - Volume 188. - P. 344 – 350. (0,4 / 0,14 п.л.)
29. Tikhomirov V.P. Simulation of contact interaction of rough surfaces // V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering - TriboMash 2020 (IOP Publishing), 2020. – Volume 996(1). - P. 012026 (1 – 8). (0,46 / 0,23 п.л.)
30. Fractal model of contact interaction of nominally flat surfaces // V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov // AIP Conference Proceedings: Proceedings International Conference “Problems of Applied Mechanics”, 2021. – Volume 2340. - P. 060004 (1 - 6). (0,34 / 0,17 п.л.)

Статьи и материалы конференций.

31. Измеров М.А. Моделирование контактного взаимодействия деталей машин / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, М.В. Виговский, Д.В. Воробьёв, Г.В. Багров // «Основы проектирования и детали машин - XXI век»: материалы всероссийской научно -

- методической конференции, ОрёлГТУ. - 2007. - С. 255 – 262. (0,46 / 0,1 п.л.)
32. Измеров М.А. Инженерные поверхности: карты и база данных / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, Г.В. Багров, Д.А. Хохлов, М.В. Виговский, И.А. Бутрин, М.И. Борзенков // «Основы проектирования и детали машин - XXI век»: материалы всероссийской научно - методической конференции, ОрёлГТУ. - 2007. - С. 311 - 317. (0,40 / 0,06 п.л.)
 33. Измеров М.А. Моделирование трёхмерных поверхностей с учётом волнистости и шероховатости / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // «Наука и производство 2009» - Материалы Международной научно-практической конференции. Часть I – Брянск. – 2009. - С. 144 - 145. (0,12 / 0,06 п.л.)
 34. Измеров М.А. Топография поверхности деталей машин / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // «Основы проектирования и детали машин - XXI век»: материалы II всероссийской научно - методической конференции, ОрёлГТУ. - 2010. - С. 144 – 153. (0,58 / 0,29 п.л.)
 35. Измеров М.А. Фрактальный метод оценки качества поверхностей / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров // Научно - техническая конференция, посвящённая 120-летию М.М. Хрущёва – Москва. - 2010. - С. 176 – 177. (0,12 / 0,06 п.л.)
 36. Измеров М.А. Фрактальная размерность инженерной поверхности и профиля / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров // 11 международная конференция "Трибология и надёжность" – С.-Петербург. - 2011 г. - С. 64 - 71. (0,23 / 0,12 п.л.)
 37. Измеров М.А. Фрактальная размерность инженерных поверхностей / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // «Энергетика, информатика, инновации 2011» - международная научно - техническая конференция ГОУ ВПО «МЭИ (ТУ)». - Смоленск. - 2011 г. - Том 2. - С. 92 - 97. (0,34 / 0,17 п.л.)
 38. Измеров М.А. Фрактальная размерность инженерных поверхностей и профиля / М.А. Измеров, П.В. Тихомиров // Новые материалы и технологии в машиностроении. - Брянск. - 2011. - № 13. - С. 39 - 42. (0,46 / 0,16 п.л.)
 39. Измеров М.А. Фрактальная размерность инженерной поверхности и распределение пятен контакта / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров // 12 международная конференция "Трибология и надёжность" – С.-Петербург. - 2012 г. - С. 48 - 57. (0,58 / 0,2 п.л.)
 40. Измеров М.А. Двухуровневая модель инженерной поверхности / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании: Материалы V Международной научно-практической конференции. – Брянск. - 2013 г. - С. 121 - 123. (0,17 п.л.)
 41. Измеров М.А. Фрактальная модель протекания через межконтактный зазор плоского стыка / В.П. Тихомиров, О.А. Горленко, М.А. Измеров // 14 международная конференция "Трибология и надёжность" – С.-Петербург. - 2014 г. - С. 154 - 165. (0,7 / 0,24 п.л.)
 42. Измеров М.А. Контактная жесткость шероховатых поверхностей на основе 3d-моделирования / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // «Будущее машиностроения России» - сб. докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, Москва. - 2015. - С. 1017 - 1021. (0,29 / 0,15 п.л.)
 43. Измеров М.А. Имитационное моделирование контактного взаимодействия волнистых поверхностей / М.А. Измеров, Е.В. Лемешева, П.В. Тихомиров / «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения (ТМ-2015)» - материалы 7-й международной научно - технической конференции, Брянск. - 2015. - С. 66 - 67. (0,12 / 0,04 п.л.)
 44. Измеров М.А. Модель протекания через торцовое уплотнение / М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // «Трибология – Машиностроению» - труды XI Международной научно - технической конференции. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Москва. - 2016. - С. 102 - 104. (0,17 / 0,09 п.л.)

45. Измеров М.А. Контактная жесткость плоского стыка / Е.В. Лемешева, П.В. Тихомиров, М.А. Измеров // Альтернативные источники энергии в транспортно - технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования, Воронеж. - 2016. - Т. 3. - № 2. - С. 45-51. (0,4 / 0,14 п.л.)
46. Измеров М.А. Модель изнашивания торцовых уплотнений // М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // «Трибология – Машиностроению» - труды XII Международной научно - технической конференции, посвящённой 80-летию ИМАШ РАН – М. – Ижевск, 2018. - С. 214 - 217. (0,23 / 0,12 п.л.)
47. Измеров М.А. Имитационное моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей // «Трибология – Машиностроению» - труды XIII Международной научно – технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2020. – С. 295 – 300. (0,34 / 0,17 п.л.)
48. Измеров М.А. Податливость плоского стыка фрактальных поверхностей // В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, П.В. Тихомиров // Транспортное машиностроение. 2022. № 3 (3). С. 16-21. (0,34 / 0,12 п.л.)
49. Измеров М.А. Трение фрактальных поверхностей // М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // Транспортное машиностроение. 2022. № 1-2 (1-2). С. 20-28. (0,52 / 0,26 п.л.)

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

50. Измеров М.А. Моделирование шероховатых поверхностей на основе теории фракталов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021619563, 15.06.2021. Заявка № 2021615709 от 19.04.2021.
51. Измеров М.А., Шальгин М.Г. Моделирование волнистой поверхности // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022681677, 16.11.2022. Заявка № 2022680928 от 03.11.2022.
52. Измеров М.А., Тихомиров В.П. Моделирование перколяции через объёмный пористый слой // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022681720, 16.11.2022. Заявка № 2022680866 от 03.11.2022.
53. Измеров М.А. Моделирование метода Ренорм-групп // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023688939, 25.12.2023. Заявка № 2023685592 от 22.11.2023.
54. Измеров М.А. Определение фрактальной размерности // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023688938, 25.12.2023. Заявка № 2023685590 от 22.11.2023.

Подписано в печать 29 февраля 2024 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Печ. л. 2,0. Усл. изд. л. 2,0.
Тираж 130 экз. Заказ _____. Бесплатно.

Издательство Брянского государственного технического университета
241035, г. Брянск, бульвар 50лет Октября, 7.
Подразделение оперативной полиграфии БГТУ, ул. Харьковская, 9