

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

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

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

Доктор технических наук, профессор

Тихомиров Виктор Петрович

Брянск 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ТРЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЯ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ	16
1.1. ОПИСАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	21
1.2. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	40
1.3. ТРЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	47
1.4. ИЗНАШИВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	52
1.5. ГЕРМЕТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ.....	56
1.6. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ	65
ГЛАВА 2. МНОГОУРОВНЕВАЯ ТРЁХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	70
2.1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	72
2.2. МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	75
2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКРООТКЛОНЕНИЙ И ВОЛНИСТОСТИ.....	80
2.3.1. <i>Моделирование макро-отклонений</i>	83
2.3.2. <i>Моделирование волнистости</i>	85
2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	88
2.4.1. <i>Моделирование фрактальных поверхностей</i>	92
2.5. АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	102
2.6. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.	107
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	110
ГЛАВА 3. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	112
3.1. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.	116
3.2. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	135
3.2.1. <i>Связь фрактальных параметров с параметрами шероховатости</i>	135
3.2.2. <i>Распределение пятен контакта</i>	139
3.2.3. <i>Параметры контактного взаимодействия поверхностей</i>	150
3.2.4. <i>Условие перехода от модели Герца к фрактальным моделям</i>	156
3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	160
3.4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ	166
3.5. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ	175
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	179
ГЛАВА 4. ТРЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	181
4.1. ТРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МАКРОУРОВНЕ	183
4.2. ТРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МИКРОУРОВНЕ	185
4.3. ТРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА НАНО-УРОВНЕ	199
4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ.....	209
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	217

ГЛАВА 5. ИЗНАШИВАНИЕ СЛАБОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ... 219	
5.1. Модель изнашивания фрактальных поверхностей.....	221
5.2. Изнашивание при пластическом контакте поверхностей.....	226
5.3. Изнашивание при упругом деформировании неровностей.....	233
5.4. Прогнозирование работоспособного состояния узла трения.....	237
5.5. Оценка ресурса предохранительной муфты стрелочного перевода	244
Выводы по главе 5	257
ГЛАВА 6. ГЕРМЕТИЧНОСТЬ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ. 259	
6.1. Щелевая модель оценки утечки жидкости	261
6.2. Фильтрационная модель протекания жидкости.....	265
6.3. Протекание в зазоре инженерных поверхностей	277
6.4. Экспериментальное исследование герметичности.....	289
Выводы по главе 6.....	295
ГЛАВА 7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ..... 297	
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ..... 310	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	314
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	327

ВВЕДЕНИЕ

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 или в режиме приработки. В настоящей работе апробация предлагаемой методики была выполнена для предохранительной муфты стрелочного перевода типа ВСП-220Н, расчёт которой представлен в главе 5. Кроме того, представленная в настоящей работе методология моделировании контактного взаимодействия поверхностей на уровне шероховатости и субшероховатости, позволяет решать ряд схожих задач, например оценку герметичности металл-металлических уплотнительных устройств на этапе проектирования.

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, например, 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 слабонагруженных трибосистем или узлов, работающих в режиме приработки, 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, трения и изнашивания 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 деформаций 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, на примере предохранительной муфты стрелочного перевода типа ВСП-220Н, 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 деталей. В работе использованы основные положения теории строения поверхностных слоёв деталей машин, 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 изнашивания.

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 Aviaemechanical 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.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ТРЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЯ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Решение проблемы обеспечения требуемых триботехнических показателей проектируемых изделий при наличии узлов трения связано с выбором износостойких материалов пары трения, назначением необходимого качества поверхностного слоя при соблюдении условия совместимости сопряженных элементов и др. Эффективная работа узлов трения определяется на этапе проектирования и назначения таких параметров качества инженерной поверхности, которые можно технологически реализовать и метрологически обеспечить. Существенная роль при этом отводится теоретическим знаниям в области трения и изнашивания и практическому приложению этих знаний. В работе рассматриваются сравнительно малоизученные процессы трения и изнашивания слабонагруженных узлов трения. В отечественной и зарубежной литературе отмечается отсутствие надежных данных о поведении узлов трения при малых нагрузках. Идентификация трения в этих условиях позволит повысить эффективность технологии проектирования узлов трения в микроэлектронных системах, робототехнике и других слабонагруженных соединениях. Широкое применение в народном хозяйстве подобных устройств и повышение надежности их работы за счет разработки новых теоретических подходов, имеющих практическую значимость, определяет актуальность исследований в этом направлении. В настоящей работе приведен пример расчета предохранительной муфты стрелочного перевода типа ВСП-220Н (рис. 1.1), где контактное взаимодействие протекает на микроуровне при малых нагрузках. Фрикционная муфта стрелочного перевода обеспечивает передачу крутящего момента с электродвигателя на шибер, который посредством тяг осуществляет перевод стрелок железнодорожных путей, а также служит предохранительным устройством при возможном заклинивании рельс при переводе, например, при попадании туда посторонних предметов.

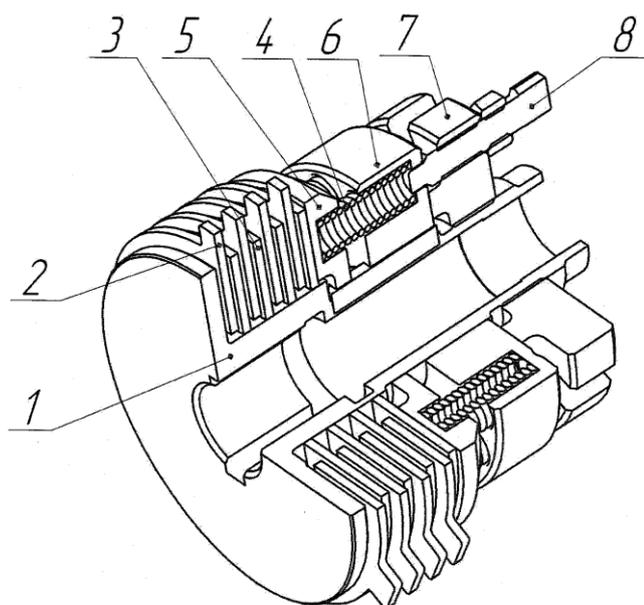


Рис. 1.1. Фрикционная муфта стрелочного перевода

Предохранительная муфта состоит из ступицы 1, в которую установлены фрикционные диски 2 и 3, прижимающиеся друг к другу винтовыми пружинами 4 через нажимной диск 5. 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.

Параметры работы фрикционной предохранительной муфты следующие: передаваемый крутящий момент на муфте $T_H = 14,76$ Н·м, и с учётом коэффициента запаса $\beta = 1,2$, который учитывает инерционность ведомой части, динамичность нагрузки и колебания коэффициента трения, получим расчетный момент муфты $T_M^* = \beta \cdot T_H = 1,2 \cdot 14,76 = 17,71$ Н·м. Усилие прижатия дисков $F = 1000 \dots 4000$ Н (при определённых условиях до 7000 Н), средний радиус кольцевой поверхности трения $R_{cp} = 58$ мм. при ширине дорожки трения 11 мм. Тогда номинальная площадь контакта будет

$$S = \pi \cdot (R^2 - r^2) = 3,14 \cdot (63,5^2 - 52,5^2) = 1276 \text{ мм}^2.$$

Номинальные контактные давления, например, при $F = 3000$ Н будут

$$P = F / S = 3000 / 1276 = 2,35 \text{ МПа.}$$

Процессы трения и изнашивания протекают на поверхности, поэтому структурные особенности приповерхностного слоя лежат в основе моделирования поведения трибосистемы. Задача описания поверхности связана с задачей выбора такой обработки, которая обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики. Большое количество пространственных параметров шероховатой поверхности не используются при описании топографии поверхности и являются бесполезными. Таким образом, при моделировании поверхности многие параметры не учитываются. Вот почему, современные упрощенные представления о шероховатой поверхности выражаются в виде модели, состоящей, как правило, из набора сферических сегментов, высоты которых имеют то или иное вероятностное распределение. При этом предполагается, что радиус верхней части выступов в виде сферического сегмента принимается постоянным. Такая модель не является строгой при решении задач контактного взаимодействия при малых нагрузках и оценке степени герметичности. Так, в отличие от моделей, предложенных И.В. Крагельским, Н.Б. Демкиным, Н.М. Михиным (1960-е годы), Гринвудом и Вильямсоном (1960 г.) и др., фрактальная модель (Маджумдар и др., 1990 г.) рассматривает процесс нагружения контакта, который начинается с пластического деформирования неровностей, а при увеличении нагрузки формируются пятна контакта, способные упруго воспринимать нагрузку. Фрактальные показатели в неявном виде выражают связь между параметрами поверхности и эксплуатационными свойствами. Использование принципов фрактальной геометрии к описанию и визуализации поверхности дает конструктору максимум информации при проектировании узлов трения. В настоящее время фрактальные параметры не отражаются в рабочей документации (чертежах деталей), и технолог использует стандартные параметры шероховатости, аналогичные для подобных изделий, удовлетворительно показавших себя в практике эксплуатации. Использование компьютерного моделирования контактного взаимодействия позволяет конструктору обеспечить надежную работу проектируемого узла трения, а

установление зависимостей между фрактальными показателями и стандартными параметрами шероховатости дает возможность технологу разработать производственные процессы изготовления инженерной поверхности с требуемыми функциональными свойствами.

Современные методы расчёта узлов трения учитывают информацию о микрогеометрии поверхностей в виде среднестатистических 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 и обеспечение необходимых триботехнических показателей требует идентификации процессов трения и критически отнестись к использованию существующих знаний о природе сил трения. Справочные данные о коэффициентах трения не могут быть использованы в расчетах узлов трения при проектировании прецизионных устройств. Так, коэффициент трения сталь по стали изменяется (по литературным данным) от 0,08 (для соединений с натягом) до 0,5 и выше при трении без смазочного материала.

С целью точного определения коэффициента трения, улучшения характеристик кинематических пар мехатронных систем и решения проблемы обеспечения износостойкости слабонагруженных трибосистем или узлов, работающих в режиме приработки, требуется разработать теоретические модели и провести экспериментальные исследования для того, чтобы выявить закономерности трения и изнашивания путем разработки соответствующих имитационных моделей и разработки соответствующего программного

обеспечения. Анализ существующих теоретических и экспериментальных исследований контактного взаимодействия и изнашивания слабонагруженных (кинематических) пар трения показал, что трибологические 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 субмикровыступов) 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. Субмикрошероховатость, которую делает невидимой конечный радиус скругления щупа (5 мкм) при стандартном методе профилометрии, вносит свой вклад в картину напряжённого состояния и распределения пятен контакта. Влияние субмикрошероховатости, которая не выявляется при анализе шероховатости стандартными методами за счет фильтрации, становится тем существеннее, чем меньше контактное давление. В зависимости от упругопластического 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 субмикровыступов исходных поверхностей, поэтому решение проблемы обеспечения износостойкости кинематических пар и обеспечения требуемых триботехнических показателей 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.

В 1 главе представим анализ существующих на сегодняшнее время знаний по вопросам моделирования адекватных трёхмерных инженерных поверхностей, их контактного взаимодействия с учётом упруго-пластического состояния пятен контакта, а также моделирование процессов трения и изнашивания и герметичности.

1.1. ОПИСАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Геометрия инженерной поверхности является само по себе сложным объектом, имеющим многоуровневую структуру [192, 195]. Это объясняется многочисленными погрешностями и отклонениями от идеального, указанного инженером – конструктором, состояния при изготовлении детали. Готовая деталь в общем виде будет иметь следующие погрешности геометрии поверхности (рис. 1.2):

- макро-отклонения;
- волнистость поверхности;
- шероховатость поверхности;
- субмикршероховатость поверхности;

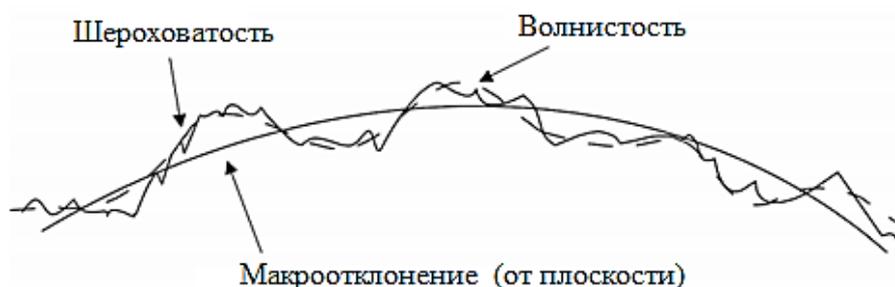


Рис. 1.2. Геометрическое строение инженерной поверхности.

Макро-отклонения обусловлены не идеально точными движениями режущих инструментов, которые определяются погрешностями их кинематических пар и направляющих. К ним относятся линейные погрешности, угловые, погрешности шага, и т.д. Всё это приводит к тому, что

изначально размеры готового изделия по различным направлениям несколько отличаются от заданных, например, для цилиндрических поверхностей различают отклонения от цилиндричности, от круглости, овальность, огранка, конусообразность, бочкообразность, седлообразность, изогнутость и т.д. Величина макро- отклонений определяется требуемой точностью изготовления и устанавливается инженером – конструктором на чертеже в виде допусков по различным видам отклонений и может иметь величину от нескольких миллиметров до 10^{-2} мм. Согласно принятой классификации, макро-отклонением называют погрешности формы деталей, у которых отношение регулярного шага S микро-отклонений к их высоте R составляет

$$\frac{S}{R} > 1000.$$

Волнистость поверхности определяется жёсткостью подвижных и неподвижных звеньев системы «приспособление – инструмент - деталь», недостаточность которой приводит к появлению регулярных волн на поверхности изготавливаемой детали с отношением длины волны S к её высоте R в пределах

$$\frac{S}{R} = 50 \dots 1000.$$

Волнистость приводит к уменьшению номинальной площади контакта до контурной площади, которая значительно меньше номинальной. При этом с уменьшением площади контакта возрастают контактные давления, что приводит к увеличению деформации поверхностных слоёв детали и снижению долговечности готового изделия. Чем меньше величина волнистости, тем больше контурная площадь контакта и меньше контактные давления, а значит, и выше качество готовой продукции.

Параметры волнистости представлены в ГОСТ Р ИСО 4287 – 2014, которые условно можно поделить на две категории: высотные и шаговые: W_a – среднеарифметическое отклонение профиля от средней линии; W_q – среднее квадратическое отклонение профиля; W_{max} – наибольшая высота неровностей

волнистого профиля; W_v – максимальная глубина сглаживания волнистого слоя под средней линией; W_p – максимальная глубина сглаживания волнистого слоя над средней линией; S – средний шаг волнистого профиля по вершинам; S_m – средний шаг волнистого профиля по средней линии; r_w – радиус закругления волн.

В настоящее время макро- отклонения и волнистость при изготовлении деталей небольшого размера очень мала, и по высоте сопоставима с шероховатостью. При изготовлении деталей большого размера макро-отклонения и волнистость оказывают существенное влияние на контактный зазор сопряжённых поверхностей и их следует учитывать.

Шероховатость поверхности обусловлена не идеальной геометрией режущей кромки инструмента (например, лезвия) на микроуровне при изготовлении детали и рассматривается при отношении шага микронеровностей S к их высоте R в пределах

$$\frac{S}{R} < 50.$$

Шероховатость поверхности представляется в виде неровного (изрезанного) профиля поверхности (рис. 1.3) и оценивается на базовых длинах $L = 500, 800$ или 2500 мкм. (чаще всего на длине 800 мкм.).

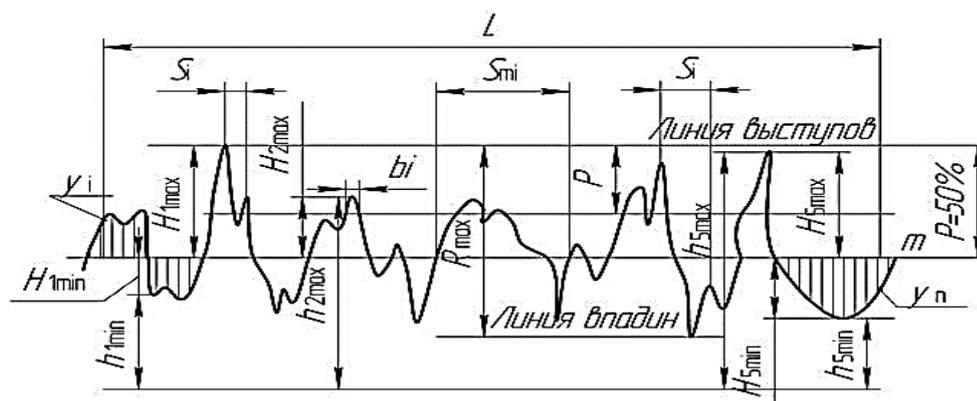


Рис. 1.3. Параметры шероховатости поверхности

К параметрам шероховатости относится: R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; R_{max} – наибольшая высота профиля; R_z – высота

неровностей профиля по десяти точкам; R_p – высота выступа (высота «сглаживания»); R_v – глубина впадины; R_q – выборочное значение среднего квадратического отклонения профиля; S_m – шаг неровностей по средней линии; S – средний шаг местных выступов профиля; D_a , D_q – среднее арифметическое и квадратическое значения наклона профиля к средней линии; L_a , L_q – среднее арифметическое и квадратическое значения длины волны; t_p – относительная опорная длина профиля на уровне p (от 0 до 100%); R_{sk} , R_{ku} – показатели асимметрии и эксцесса. Коэффициент асимметрии R_{sk} показывает, расположена ли большая часть материала микронеровностей над средним уровнем или под ним, а показатель эксцесса R_{ku} количественно характеризует степень близости профиля к чисто случайному, для которого он равен 3.

Субмикрощероховатость является ещё более мелкой геометрической неравномерностью поверхности и выражается нерегулярными геометрическими структурами на шероховатых выступах профиля поверхности, которые измеряются в нано-диапазоне шкалы измерения и являются физическими образованиями материала, например, зёрнами металла. Субмикрощероховатость также важна при изучении влияния качества поверхности деталей машин на потребительские свойства готовой продукции, но её влияние на такие свойства, как герметичность, не высока.

Следует отметить, что профильная оценка параметров микрогеометрии даёт слабую характеристику о реальной поверхности, особенно если это анизотропная поверхность. Гораздо больше информации о поверхности несёт трёхмерная оценка, характеризуемая двумя измерениями. Получение информации о 3D топографии на основе трехмерной обработки измерений стало приоритетным уже во второй половине 80-ых годов 20-го века. В первой половине 90-ых годов прошлого века соответствующее программное обеспечение и скорость обработки данных сделали доступными получение необходимой информации о строении и особенностях трехмерной

инженерной поверхности [141, 197], поэтому в дальнейшем будем основываться на анализе трёхмерных поверхностей.

В процессе трения и изнашивания поверхностей их трёхмерная микротопография играет двойную роль. С одной стороны, поверхность определяет условия контактного взаимодействия и температурный режим работы, а с другой стороны она подвергается существенным изменениям в соответствии с механизмами трения и изнашивания. Поэтому трёхмерный анализ микротопографии обеспечивает возможности для идентификации и более глубокого понимания механизма изнашивания. На рис. 1.4 даны обозначения факторов, используемых при оценке параметров поверхности (шаг точек в плоскости xOy , по оси Z , функция распределения вершин микронеровностей и т.д.).

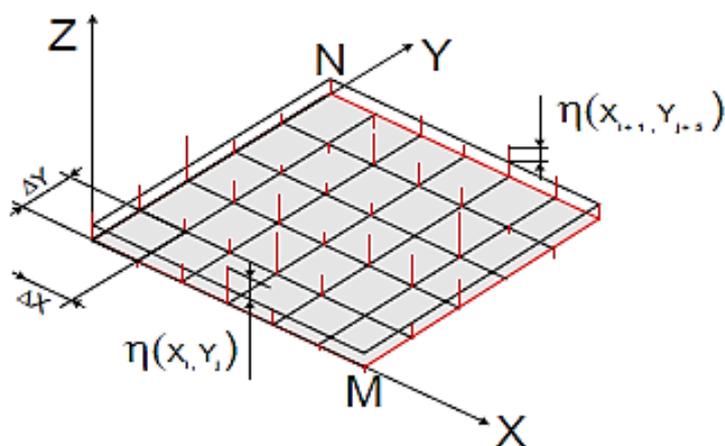


Рис. 1.4. Факторы поверхности

Трёхмерная микрогеометрия описывается ГОСТ Р ИСО 25178 от 2014 года и имеет следующие обозначения в сравнении с двумерными параметрами:

- амплитудные (или высотные) параметры: среднее арифметическое отклонение S_a (аналог R_a); среднее квадратическое отклонение S_q (аналог R_q); асимметрия распределения высот S_{sk} (аналог R_{sk}); эксцесс S_{ku} (аналог R_{ku});
- пространственные параметры: плотность пиков неровностей на единицу площади S_{ds} ; средний шаг локальных выступов S_x ; S_y (аналог S); шаг

- неровностей по средней линии S_{mx} ; S_{my} (аналог S_m);
- гибридные параметры: среднее квадратическое отклонение наклона неровностей $S_{\Delta q}$ (аналог Δ_q); среднее арифметическое значение кривизны верхней части неровности S_{sc} ; среднее арифметическое значение радиуса закругления верхней части неровности S_{sr} ;
 - функциональные параметры: относительная опорная площадь S_{fp} (аналог t_p); материальный объем поверхности, %; маслосъемкость поверхности, %.

В расчетах параметра трехмерного аналога одиночные интегралы и суммы заменяются двойными по двум координатным осям.

Разработкой трёхмерных моделей шероховатых поверхностей занимались многие учёные, и самые ранние модели представляли собой совокупность микровыступов правильной геометрической формы, например конусы, сферы, усечённые пирамиды и т.д. Результаты моделирования показали, что самой удобной формой моделирования микровыступа является сфера, к которой применялась модель контактного взаимодействия по Герцу. Кроме того, на основании сферической модели микронеровностей были разработаны методики оценки контактного взаимодействия, трения и изнашивания, представленные в трудах таких учёных, как Крагельский И.В. [62-65], Демкин Н.Б. [34-37], Чичинадзе А.В.[212], Михин Н.М.[84, 85], Добычин М.Н.[213, 215], Комбалов В.С.[58, 65], Громаковский Д.Г., Свириденко А.И.[12], Петроковец М.И.[12] и многие другие. *Данная модель очень посредственно описывает структуру реальной поверхности и требует ввода в уравнения поправочных коэффициентов.*

Уточнение сферической модели было выполнено путём различного расположения по высоте сферических микровыступов одинакового или различного радиуса, что позволило гораздо лучше описать геометрические характеристики реальных поверхностей. Впервые такой подход представили Greenwood J.A. и Williamson J.B.P.[171], а позднее данная модель применялась

с различными модификациями в работах Chang W.R.[161], Bogy D.B.[161], Jeng Y.R., Etsion I.[161], Peng S.R., Polycarrou A.A. и другие. Данная модель применяется в настоящее время для решения типовых задач оценки контактного давления, моделирования трения и изнашивания. Но решение контактных задач при малых нагрузках требует большей «схожести» формы микронеровностей с реальной шероховатостью, чем данная модель не обладает, из-за чего её применение даёт большую погрешность в этих условиях.

Одним из альтернативных эффективных инструментов моделирования шероховатой поверхности является теория случайного поля, где поверхности моделируются случайными двумерными функциями. Впервые элементы теории случайного поля были использованы М. Лонге–Хиггинсом (M. Lonquet – Higgins) для описания поверхности моря, а затем П. Найаком (P.R. Nayak [182]) – для шероховатых поверхностей. Предполагается, что поверхность является изотропной, т.е. ее свойства не зависят от направления. Тогда случайная функция, описывающая ординаты шероховатой поверхности, будет

$$z(x, y) = \sum_n c_n \cos(xk_{xn} + y_{yn} + \varepsilon_n), \quad 1 < n < \infty$$

Здесь k_n – волновые числа, ε_n – случайная фаза, c_n – константа, характеризующая общую высоту профиля поверхности.

Плотность вероятности ординат шероховатой поверхности, как правило, подчиняется нормальному (гауссовскому) закону (как наиболее приемлемый вариант, дающий адекватные результаты). Плотность распределения высот вершин неровностей часто не является гауссовой и описывается (по П. Найаку) следующим выражением:

$$p(\bar{z}) = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ e^{-c_1 \bar{z}^2} \left[\frac{3(2\delta - 3)}{\delta^2} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\delta} e^{-\frac{\bar{z}^2}{2}} (1 + \operatorname{erf}\beta)(\bar{z}^2 - 1) + \right. \\ \left. + \sqrt{2\pi} \left[\frac{\delta}{3(\delta - 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{\delta \bar{z}^2}{2(\delta - 1)} \right] (1 + \operatorname{erf}\gamma) \right\}$$

Здесь $\bar{z} = z/\sigma$ – относительная высота вершин неровностей, $\delta = m_0 m_4 / m_2^2$, $erf(\dots)$ – функция ошибок, m_0, m_2, m_4 – моменты спектральной плотности, $\beta = \left[\frac{3}{2(2\delta-3)} \right]^{1/2} \bar{z}$, $C_1 = \frac{\delta}{2\delta-3}$, $\gamma = \left[\frac{\delta}{2(\delta-1)(2\delta-3)} \right]^{1/2} z$.

Д. Картрайтом (D. Cartwright), М. Лонге – Хиггинсом (M. Lonquet – Higgins) и Я.А. Рудзитом [112] показано, что величина δ может быть определена, если при анализе профилограммы найдены число нулей (N_0) и число максимумов (N_{ext}), приходящихся на единицу длины профиля. Тогда

$$\delta = \left(\frac{N_{ext}}{N_0} \right)^2.$$

Таким образом, статистические характеристики шероховатой поверхности могут быть найдены по экспериментальным данным, полученным из анализа профилограмм. *Однако приведенные зависимости пригодны для изотропных поверхностей, к которым можно отнести поверхности после отделочных операций, для которых $\delta \rightarrow \infty$.*

П. Найак [182] показал, что теорию спектральных моментов можно распространить на анизотропные поверхности. Оказалось возможным использовать соотношения для изотропных поверхностей путем введения эквивалентных моментов соответственно второго, четвертого и нулевого порядков:

$$m_{2e} = \sqrt{m_{2x} m_{2y}}, \quad m_{4e} = \sqrt{m_{4x} m_{4y}}, \quad m_{00} = m_0$$

Для повышения точности определения среднего квадратического отклонения $\sigma = \sqrt{m_0}$ необходимо либо удлинить профилограмму, либо провести анализ нескольких профилограмм, снятых с одной и той же поверхности в произвольных направлениях. Направления OX и OY должны быть взаимно перпендикулярными. Теория случайного поля и применение случайных двумерных функций представлено в работах Линника Ю.В., Хусу А.П., Рудзита Я.А. [112], Горячевой И.Г. [29], Воронина Н.А. [24], Виттенберга Ю.Р., Сиренко Г.А., Семенюка Н.Ф. и т.д.

Существующие современные методы моделирования шероховатых

поверхностей имеют неплохую схожесть с реальными поверхностями, но не имеют инструментов регулировки масштаба и самоподобия (для выявления более мелких составляющих профиля), что очень важно при решении контактных задач при малых нагрузках, где субмикровыступы оказывают влияние на несущую способность шероховатого слоя.

Фрактальная геометрия. Одним из новых и эффективных подходов к моделированию шероховатых поверхностей является использование теории фракталов, основоположником которой является Б. Мандельброт [80] и популяризировал которую Федер Е. [136]. Применение теории фракталов позволяет рассмотреть более детально структуру поверхностного слоя на разных уровнях детализации, что необходимо для достоверной оценки эксплуатационных свойств изделий. Кроме того, формирование поверхности в целом, и микрогеометрии в частности, является результатом действия совокупности процессов, а не только чисто геометрических «откликов» действия инструмента, как, например, отмечается в работах [6, 101]. Представление шероховатой поверхности в виде фракталов представлено в работах В. Bhushan [157, 169], А. Majumdar [178, 221], С.Л. Tien [179], Zhou, G [231], Liu Y [229], Xu Kuo [220], 211. Yu B.M. [210 – 211], Wang, S.A. [204], Xie H. [207], Pavelescu D. [188], Cox B.L. [164], Buczkowski R.A. [159], Barman T.K. [151], а также в работах Огара П.М. [90], Потапова А.А. [99-100], Божокина С.В. [17], Ивановой В.С., [47], Лабутина И.С. [67] и др. *Такое большое количество публикаций на эту тему говорит о большом интересе современных учёных к применению фрактальной геометрии для исследования микрогеометрии поверхностей и о большом потенциале самой модели. Поэтому в качестве основной модели шероховатой поверхности в настоящей работе выберем фрактальную геометрию.*

В общем, фрактал – геометрический объект (линия, поверхность, пространственное тело) характеризующийся нерегулярностью (структуры, геометрии и т.п.), но самоподобием (или симметрией) [17, 47, 67, 80, 136].

Самоподобие означает, что объект более или менее повторяет свою структуру на различных масштабах его рассмотрения. Конечно, существуют границы этих масштабов, связанные с понятием конечной «массы» объекта. Нерегулярность объекта, в общем, означает некоторую его дробную (фрактальную) размерность, отличающую его от размерности линии, поверхности или пространства. Поэтому в теории фракталов используют понятия топологической размерности Хаусдорфа - Безиковича, которая и характеризует «отклонения» фрактала (объекта) от идеальной топологии.

Фрактальная размерность является одной из основных характеристик фрактала. Центральное место в определении фрактальной размерности D (размерность Хаусдорфа - Безиковича) занимает понятие расстояния между точками в пространстве. Следовательно, для определения D необходимо измерить «величину» множества точек в пространстве. Простой способ измерить длину кривых, площадь поверхностей или объем тела состоит в том, чтобы разделить тело на небольшие отрезки, прямоугольники, кубы или сферы. Подсчитывая число этих элементов, необходимых для покрытия интересующего множества точек, получаем меру величины множества.

Фрактальная геометрия основывается на экспериментальном факте, что в общем случае длина L произвольной кривой (которая может быть изломана в любой точке) степенным образом зависит от масштаба измерения δ :

$$L = C\delta^{1-D},$$

где C - размерный множитель, свой для каждой кривой, D - фрактальная размерность; $1 < D < 2$.

Проявление фрактальных свойств микрорельефа поверхности говорит о его самоподобии. Причем самоподобие проявляется не только относительно геометрического масштабирования, но и относительно режимов обработки. Очевидно, наблюдаемое самоподобие достигается путем повторения механизма предыдущего технологического воздействия на поверхность, но в другом «масштабе» [28, 47, 99, 100, 138]. *Выявление такого рода механизма позволит прогнозировать и управлять качеством поверхностного слоя*

деталей машин [169].

Несмотря на большой интерес к фрактальной геометрии, есть проблема по её определению для профиля и поверхности. Для определения фрактальной размерности предлагаются различные аналитические и расчётные методы, но, во-первых, исследователи разнятся в рекомендациях, какой метод оценки фрактальной размерности лучше, удобнее и точнее, а во-вторых, практически отсутствуют алгоритмы и программы, позволяющие оценить фрактальную размерность профиля или поверхности в автоматическом режиме. В настоящей работе были проведены объёмные исследования по решению этих вопросов, но, поскольку это является подготовительным этапом для решения основной задачи, то было принято решение данный вопрос осветить в первой главе (обзорной), т.к. из новизны тут есть только разработка ряда программ по определению фрактальной размерности профиля и самой поверхности по уже известным методикам. Данные программы можно использовать для практического применения, и кроме того, они дают приемлемые результаты. Рассмотрим основные алгоритмы определения фрактальной размерности профиля и поверхности в виде доказательства о возможности применения фрактальной геометрии к оценке микрогеометрии инженерных поверхностей.

Для профильной оценки можно использовать следующие методы:

1. Метод измерения длины фрактальной кривой.
2. Метод нормированного размаха.
3. Метод спектральной мощности.

Метод измерения длины фрактальной кривой имеет разную реализацию. Например, будем измерять длину линии от точки A до точки B отрезками длиной δ (рис. 1.5 слева) или квадратами (справа). Подсчитав число отрезков, найдем длину $L(\delta) \cong N(\delta) \cdot \delta$. С уменьшением длины отрезка δ их число $N(\delta)$ растёт. Рост длины измеряемой кривой с уменьшением длины отрезка δ объясняется тем, что с каждым разом мы учитываем новые, более мелкие изгибы и неровности профиля.

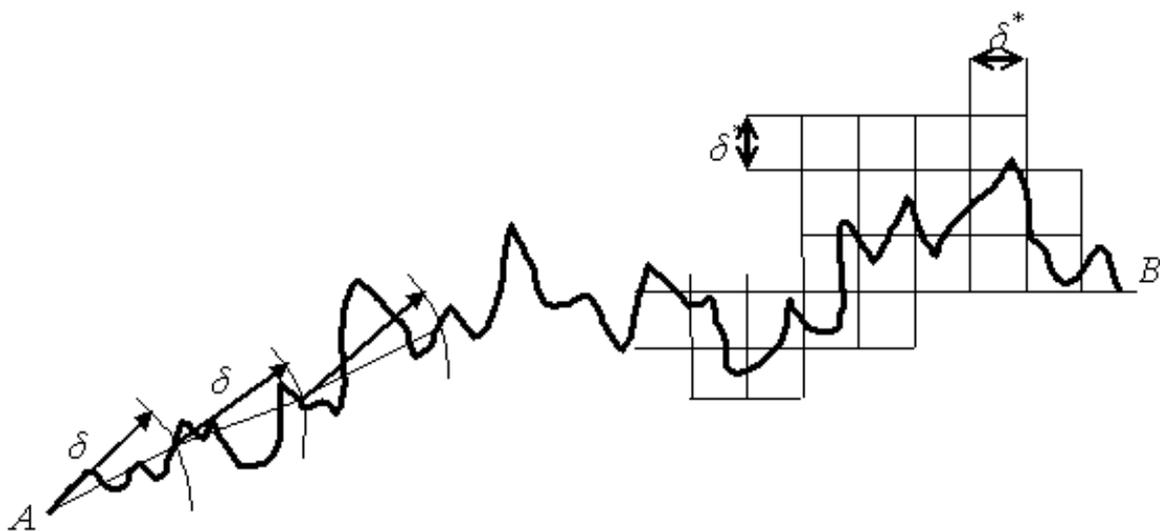


Рис. 1.5. Измерение длины линии раствором циркуля и с помощью сетки

Если бесконечно уменьшать длину отрезков, то измеренная длина профиля не будет стремиться к какому-то определённом значению, а будет бесконечно увеличиваться, т.к. мы будем охватывать всё больше и больше деталей (подразумевается, что мы будем охватывать шероховатость, потом – субмикрощероховатость, потом – зёрна кристаллической решётки, молекулы, атомы и т.д.). Число отрезков N , необходимых для измерения длины исследуемой кривой, нелинейно растёт с уменьшением длины отрезка δ . При этом график, отражающий зависимость числа отрезков N от их длины δ и построенный в двойных логарифмических координатах, представляет собой практически прямую линию.

Длину кривой, зависящую от длины используемого для измерений отрезка δ_i и от их числа, можно записать в виде

$$L(\delta) = L_0 \delta^{1-D},$$

где D – фрактальная размерность кривой; $\delta = \delta_i / \delta_0$ – безразмерная длина отрезка: δ_i – размер отрезка при i -м измерении длины, δ_0 – номинальная длина отрезка, равное L_0 .

При уменьшении δ_i число $N(\delta)$ отрезков, концы которых лежат на кривой, нелинейно растёт. Прологарифмировав выше представленное выражение, получим

$$\lg L(\delta) = \lg L_0 + (1 - \delta) \lg \delta.$$

Считая, что $L(\delta) = \delta \cdot N(\delta)$, перепишем полученное выражение как

$$\lg \delta + \lg N(\delta) = \lg L_0 + \lg \delta - D \lg \delta.$$

Произведя несложные преобразование, найдем

$$\lg N(\delta) = \lg L_0 - D \lg \delta.$$

Откуда

$$D = \frac{\lg L_0}{\lg \delta} - \frac{\lg N(\delta)}{\lg \delta}.$$

Учитывая условие, что $\delta_0 = L_0$, окончательно получим

$$D = 1 - \beta,$$

где $\beta = \lg N(\delta) / \lg \delta$ – наклон (угловой коэффициент – отрицательная величина) прямой, представляющей зависимость числа отрезков от их размера и построенную в двойных логарифмических координатах; $1 < D < 2$. График зависимости $N(\delta)$ от δ в логарифмических координатах имеет два кроссовера (переход от номинально гладкой поверхности к шероховатой и от шероховатости к субшероховатости). В этих пределах (между двумя переходами) необходимо определить уравнение линии тренда линейной зависимости. Угловой коэффициент K линии тренда будет связан с фрактальной размерностью профиля как $D = 2 - K$, $1 < D < 2$.

Для примера на рис. 1.6 представлена реализация двух алгоритмов по оценке фрактальной размерности D профиля.

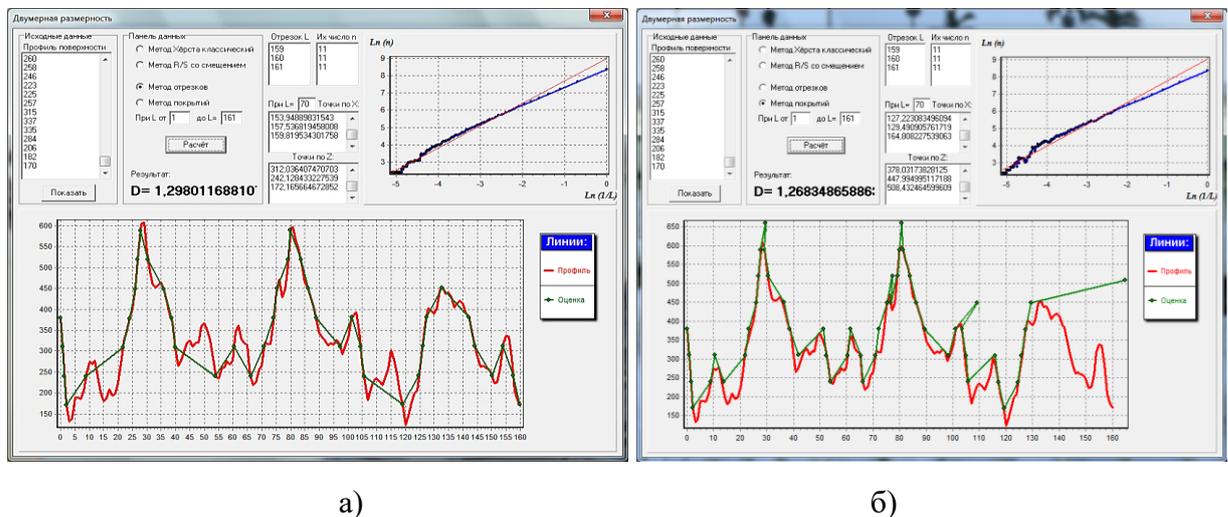


Рис. 1.6. Определение D по методу отрезков (а) и покрытий (б)

Все программы были разработаны автором в среде программирования C++ Builder в рамках представленной работы.

Метод нормированного размаха позволяет найти так называемый показатель Хёрста [136]. Этот показатель имеет широкое применение в анализе временных рядов благодаря своей устойчивости. Он содержит минимальные предположения об изучаемой системе и может классифицировать временные ряды, отличить случайный ряд от неслучайного, даже если случайный ряд не гауссовский.

Для сравнения различных типов временных рядов Херст ввел следующее соотношение

$$\frac{R}{S} = (a \cdot N)^H,$$

где R/S – нормированный размах от накопленного среднего, N – число наблюдений, a – некоторая константа, H – показатель Херста.

Имеются три различных классификации для показателя Херста:

1) $H = 0.5$. Указывает на случайный ряд. События случайны и некоррелированы. Настоящее не влияет на будущее. Функция плотности вероятности может быть нормальной кривой, однако, это не обязательное условие. R/S -анализ может классифицировать произвольный ряд, безотносительно к тому, какой вид распределения ему соответствует.

2) $0 \leq H < 0.5$. Данный диапазон соответствует антиперсистентным, или эргодическим рядам. Такой тип системы часто называют – «возврат к среднему». Если система демонстрирует «рост» в предыдущий период, то, скорее всего, в следующем периоде начнется спад. И наоборот, если шло снижение, то вероятен близкий подъем. Устойчивость такого антиперсистентного поведения зависит от того, насколько H близко к нулю. Такой ряд более изменчив, чем ряд случайный, так как состоит из частых реверсов спад-подъем.

3) $0.5 < H < 1.0$. Имеем персистентные, или трендоустойчивые ряды. Если ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то, вероятно, что он

будет сохранять эту тенденцию какое-то время в будущем. Чем ближе H к 0.5, тем более зашумлен ряд и тем менее выражен его тренд. Персистентный ряд – это обобщенное броуновское движение, или смещенные случайные блуждания. Сила этого смещения зависит от того, насколько H больше 0.5.

Если в двойных логарифмических координатах найти наклон R/S как функцию от N , то тем самым получим оценку H . Эта оценка не связана с какими-либо предположениями относительно лежащего в основе распределения, хотя предпринимаются некоторые попытки классификации случайных распределений на основе фрактальной шкалы [55].

Показатель Херста может быть преобразован во фрактальную размерность D с помощью следующей формулы [17, 55, 136]:

$$D = 2 - H.$$

Метод спектральной мощности основывается на выражении

$$P(\omega) = C_p \frac{1}{\omega^S}$$

где $P(\omega)$ – функция спектра мощности, ω – частота, C_p – некоторая константа, S – наклон средней линии функции спектра мощности.

Фрактальную размерность D находят из наклона средней линии функции спектра мощности, которая в двойных логарифмических координатах становится линейной (рис. 1.7). В данном примере D найдём как

$$D = E + \frac{3 - \beta}{2}$$

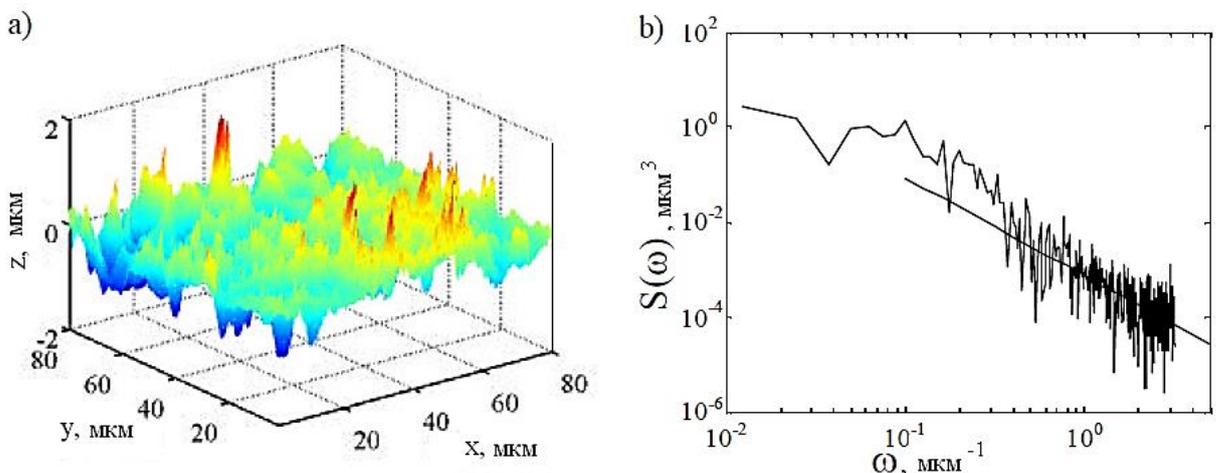


Рис. 1.7. Шероховатая поверхность (a) и ее спектральная плотность (b)

Здесь $E = 1$ – эвклидова размерность линии; β – угловой коэффициент (наклон) прямой (рис. 1.7, б), построенной в двойных логарифмических координатах (в данном примере $\beta = -2,06$). Тогда можно записать

$$D = \frac{1}{2}(5 - \beta).$$

Результаты сравнительных исследований, проведенных в рамках настоящей работы, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Сравнение методов определения фрактальной размерности

№	Тип обработки	D заданная	Оценка отрезками	Метод Хёрста	Метод Хёрста со смещением	Спектральная плотность
1	Фрезерование	1,3	1,295	1,279	1,2498	1,289
2	Электро- эрозионная	1,25	1,262	1,285	1,254	1,262
3	Точение чистовое	1,2	1,232	1,34	1,401	1,22

Установлено, что оценка фрактальной размерности для профиля поверхности, обработанной разными методами, более удобна и корректна на основе анализа спектральной плотности профиля.

Оценка фрактальной размерности инженерной поверхности. Оперирование профилями шероховатых поверхностей и их моделями обусловлено имеющейся на сегодняшний день технической и технологической базой, а также стандартами, предусматривающими работу именно с двумерной системой кривых. Но очевидно, что трёхмерная топография поверхности несёт значительно больше информации, чем её профиль, и к тому же существуют способы и средства её получения, поэтому необходимы и способы их инженерного анализа.

Для определения фрактальной размерности поверхности можно использовать способы, используемые для профиля и рассмотренные ранее (для поверхности нужен профильный анализ во взаимно-перпендикулярных

направлениях и расчёт среднего значения), но более точными методами являются:

1. Метод покрытия поверхности.
2. Метод «Периметр - площадь».

Метод покрытия поверхности основан на покрытии поверхности одинаковыми элементами, например, треугольниками. Площадь покрытия, равную произведению площади одного элемента на их число, делят на номинальную площадь. При уменьшении площади элемента покрытия их число растёт, и отношение площади покрытия к номинальной площади также увеличивается. Пример метода покрытия представлен на рис. 1.8.

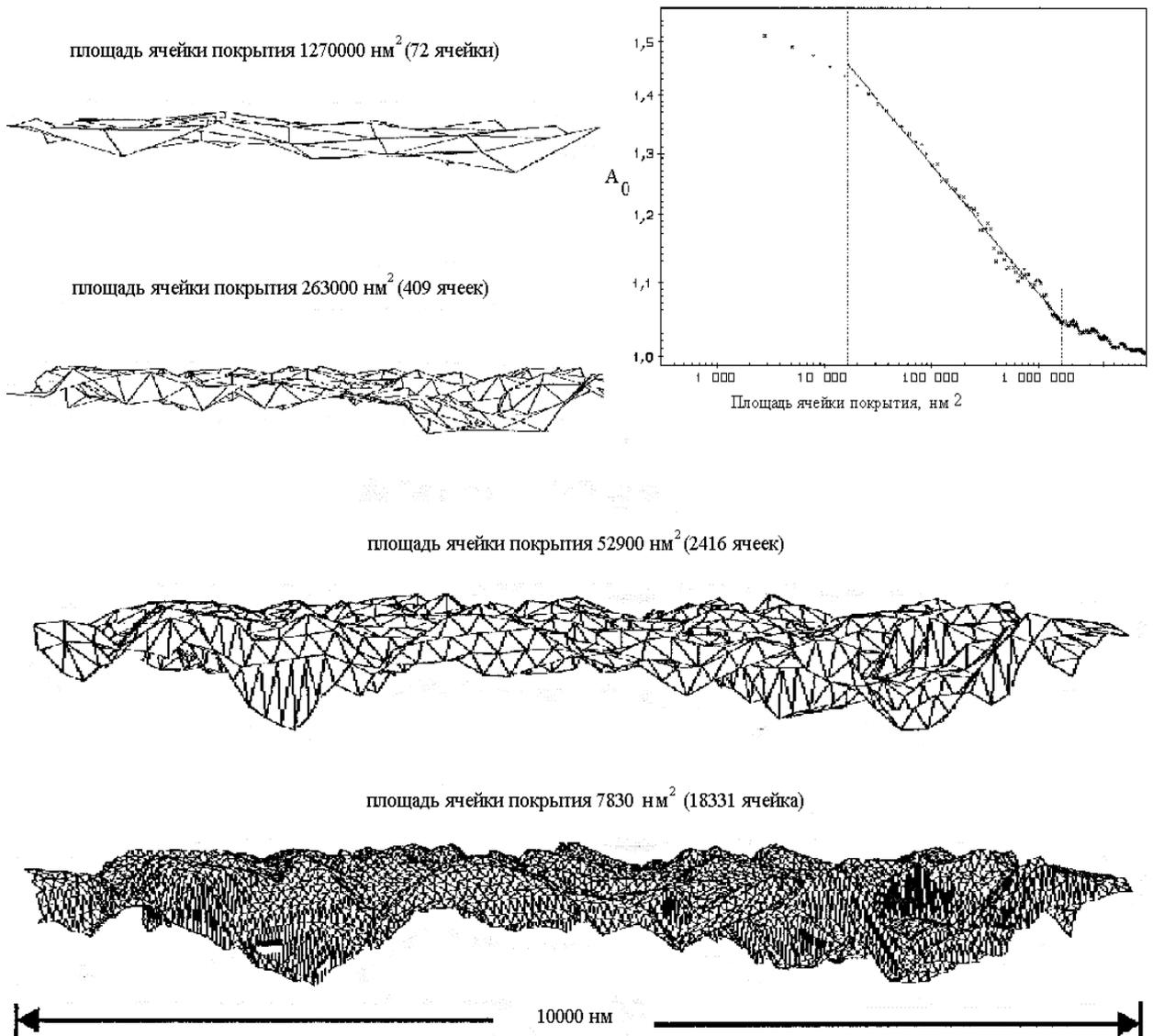


Рис. 1.8. Покрытие поверхности треугольными ячейками (проф. К. Браун)

Построив в двойных логарифмических координатах зависимость относительной площади от масштаба измерения (площади элемента), можно обнаружить первый и второй кроссоверы и найти угловой коэффициент k , а значит и фрактальную размерность исследуемой поверхности.

Схожий алгоритм при измерении поверхности кубами с размером ячейки δ . Для этого весь объём, который занимает фрактальная поверхность, заполняется кубами (рис. 1.8).

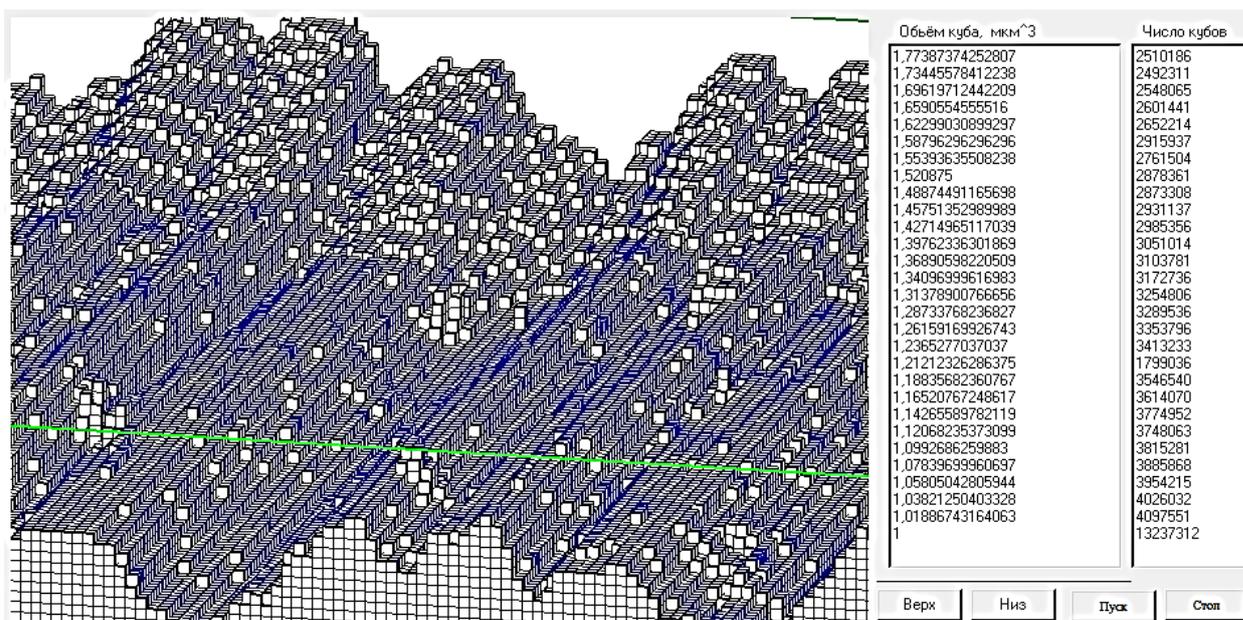


Рис. 1.9. Измерение фрактальной размерности с помощью кубов

При этом в расчёт берутся только те кубы, в которые попала поверхность. Тогда объём поверхности V_S будет равен

$$V_S = N \cdot \delta^3$$

При уменьшении размера куба δ их число растёт. Тогда, аналогично предыдущему методу, построив в двойных логарифмических координатах зависимость относительного объёма поверхности от объёма кубов, которыми измеряли поверхность, можно определить угловой коэффициент графика, которой даст фрактальную размерность исследуемой поверхности. При площади ячейки свыше 10^6 нм^2 фрактальности не наблюдается. При уменьшении площади ячейки имеет место переход через кроссовер, и степенная зависимость на участке между кроссоверами (более 2^4 до 10^6 нм^2)

указывает наличие фрактальной структуры, отражающей особенности шероховатого слоя. При размерах ячейки менее 2^4 нм^2 наклон прямой в двойных логарифмических координатах отличается от наклона между двумя кроссоверами и характеризует субшероховатость. На этом участке известные параметры шероховатости не дают необходимую информацию для решения инженерных задач.

Метод «периметр-площадь» эффективно используется в работах, в которых дается характеристика поверхностей излома стали и методика для определения конкретных поверхностей изломов. Применительно к инженерным поверхностям это соотношение используется редко - в основном применяют метод покрытия. В настоящей работе метод «периметр -площадь» предлагается использовать при оценке фрактальной размерности эквивалентной поверхности для определения пятен контакта исходных поверхностей. С помощью метода покрытия пятна контакта квадратной сеткой с размером ячейки δ найдём его периметр $P = N_p \cdot \delta$ и площадь $A^{1/2} = N_A \cdot \delta$, где N_p и N_A – соответственно число ячеек, покрывающих периметр P и площадь A . Пример определения ячеек, входящих в «периметр», а также всех ячеек, входящих в «площадь», представлено на рис. 1.10.

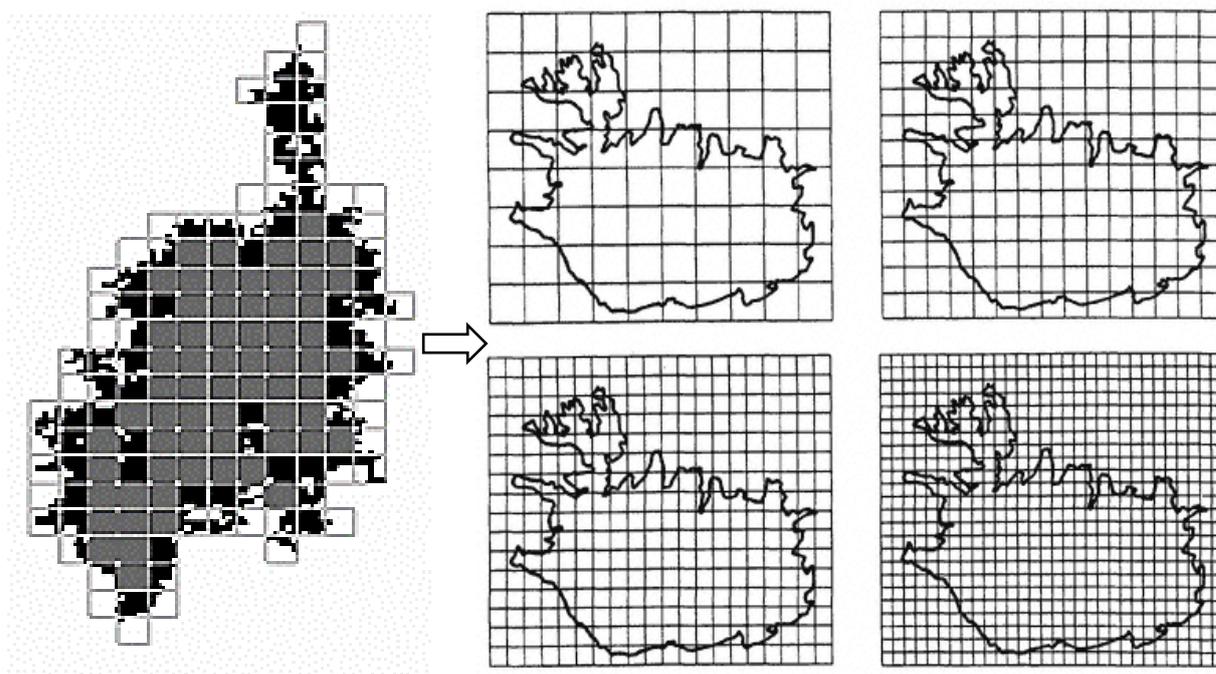


Рис. 1.10. Определение периметра и площади «острова»: $N_p = 92$, $N_A = 157$

Очевидно, что ячейки, входящие в «периметр», будут входить и в «площадь», при этом для маленьких пятен контакта значение «периметра» и «площади» одинаково. При уменьшении размера ячейки периметр и площадь растут. Тогда наклон прямой $\ln(A) - \ln(P)$, построенной в двойных логарифмических координатах, соответствует отношению $2/D$, и фрактальная размерность, определяемая по соотношению «периметр-площадь», вычисляется по уравнению

$$D = \frac{2 \cdot \ln(P_1/P_2)}{\ln(A_1/A_2)}.$$

Фрактальная размерность поверхности по Б. Мандельброту равна:

$$D_S = D + 1.$$

Таким образом, из всех существующих моделей шероховатых поверхностей самым большим потенциалом обладают фрактальные модели, которые кроме высокой схожести с реальными поверхностями, обладают свойством самоподобия и масштабируемости и позволяют учесть даже самые мелкие неровности, а существующие методы оценки и разработанные в этой работе программы, позволяющие определять фрактальную размерность профиля и поверхности в автоматическом режиме, дают основание выбрать фрактальную геометрию в качестве главной модели шероховатой поверхности (макроотклонения и волнистость будут моделироваться стандартными методами, описанными в главе 2).

1.2. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При решении трибологических задач представляется важным определить параметры контактного взаимодействия с учетом наличия макроотклонений, волнистости и шероховатости. Решение подобных задач требует разработки моделей реальной поверхности и их контактного взаимодействия. При этом принимаются допущения, которые снижают ценность моделей. Критерием адекватности моделей реальной поверхности служит либо одинаковость распределения материала в шероховатом слое (Н.Б. Дёмкин [34,

37, 83]), либо плотность вершин выступов (А.П. Котельников [61, 78]). В ряде случаев при разработке моделей поверхности полагают постоянство радиусов закругления верхней части выступов, при этом законы распределения вершин выступов могут быть разными. Обзор моделей контактного взаимодействия шероховатых поверхностей представлен в работах В.Л. Попова [96], Я.А. Рудзита [112], А.Г. Сулова [125], Э.В. Рыжова [115] и др.

Молекулярно-механическая теория трения *И.В. Крагельского*, полученная при объединении механической теории трения Ш.О. Кулона и молекулярной теории трения Ф. Боудена и Д. Тейбора, позволила достигнуть достаточную для инженерных расчетов точность при упругом, упруго–пластическом и пластическом состояниях контакта при взаимодействии шероховатых поверхностей. Зависимости, полученные Н.Б. Демкиным, И.В. Крагельским, Н.М. Михиным, Э.В. Рыжовым, Горячевой И.Г. и др. [1, 12, 19, 29, 33 – 37, 46, 62 – 65, 84, 85, 115 - 117], базируются на степенной аппроксимации одного из основных функционалов на случайном процессе (относительной опорной длины η) с использованием двух аппроксимирующих коэффициентов b и ν , которым удалось придать определенный физический смысл:

$$\eta = b\varepsilon^\nu.$$

Здесь ε – относительное сближение, отсчитываемое от линии максимумов.

Обращает на себя внимание тот факт, что для нормального профиля опорная линия связана с уровнем деформации h (в некотором смысле “родственная” сближению величина) посредством шероховатости σ . Однако наличие двух параметров (b и ν) совместно с простым (алгебраическим) соотношением придало модели Н.Б. Демкина достаточные гибкость и простоту, которые обусловили ее широкое распространение.

Следует отметить, что в рамках этого подхода отпадает необходимость исследовать или постулировать характер шероховатой поверхности: основные параметры (b и ν) определяются экспериментально и фактически аккумулируют обширную информацию о поверхности, и как показывают

исследования Н.Б. Демкина и др., достаточную для решения весьма широкого класса инженерных задач по механике фрикционного контакта.

Следует отметить, что применение методики И.В. Крагельского для «тонкого» анализа состояния контакта при малых нагрузках, даёт значительные погрешности из-за невозможности оценки размеров и упруго-пластического состояния фактических пятен контакта в отдельности, а также их распределения при контактном взаимодействии сопряжённых поверхностей, а значит и невозможно адекватно проследить развитие повреждений при трении и изнашивании.

Модель Гринвуда - Вильямсона [171], умеющая в отличие от модели И.В. Крагельского частично учитывать форму и распределение сферических микронеровностей, ограничивается рассмотрением упругого контакта шероховатых поверхностей. В дальнейших работах R.A. Buczkowski [159], W. Chang [161], R.L. Jackson [175], L. Kogut [176] учитывали наличие контактов с пластическим состоянием, Ю.Р. Витенберг [21], П.Е. Дьяченко [42], А.Ф. Жирнов [44], Н.А. Воронин [24], В.П. Тихомиров [128], Г.М. Харач [137] учитывали анизотропию поверхности и другие особенности контактного взаимодействия поверхностей. В большинстве работ, например Дж. Маккул [77], J.A. Greenwood [171], рассматривают контакт шероховатой поверхности с идеально гладкой. Считается, что вблизи вершины неровности имеют форму сферического сегмента с радиусом кривизны β , одинаковым для всех неровностей. При упругом контакте поведение микронеровности описывается теорией Герца, а основные характеристики контакта (радиус пятна контакта a_i , его площадь A_i и нагрузка на контакт P_i) могут быть выражены через сближение δ_i :

$$a_i = \beta^{1/2} \delta_i^{1/2}, \quad A_i = \pi \beta \delta_i, \quad P_i = \frac{4}{3} E \beta^{1/2} \delta_i^{3/2},$$

где $\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$; E_1, ν_1 ; E_2, ν_2 - модуль упругости и коэффициент Пуассона шероховатого и гладкого тел соответственно.

Также постулируется закон распределения высот неровностей.

Измерения профиля шероховатой поверхности, показали, что нормальный закон не противоречит экспериментальным данным:

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\frac{z^2}{\sigma^2}\right).$$

Тогда среднее число неровностей n , вступивших в контакт найдём как

$$n = N \int_d^\infty p(z) dz.$$

Здесь N – общее число неровностей.

Средние значения площадки контакта и нагрузки, воспринимаемой этой площадкой, находят по формулам:

$$\bar{A}_i = \pi\beta \frac{\int_d^\infty (z-d)p(z) dz}{\int_d^\infty p(z) dz}, \quad \bar{P}_i = \frac{4}{3} E\beta^{1/2} \frac{\int_d^\infty (z-d)^{3/2} p(z) dz}{\int_d^\infty p(z) dz}.$$

Общую площадь всех единичных пятен касания (фактическую площадь касания) и общую нагрузку находят в виде

$$A_r = n\bar{A}_i = \pi\beta N \int_d^\infty (z-d)p(z) dz$$

$$P = n\bar{P}_i = \frac{4}{3} E\beta^{1/2} N \int_d^\infty (z-d)^{3/2} p(z) dz$$

Переходя к относительным величинам $\zeta = \frac{z}{\sigma}$, $h = d/\sigma$, и используя плотность неровностей $D = N/A_a$ (A_a – номинальная площадь контакта), получаем

$$\eta = \frac{A_r}{A_a} = \pi\beta D\sigma \int_h^\infty (\zeta-h)p^*(\zeta) d\zeta$$

$$q = \frac{P}{A_a E} = \frac{4}{3} \pi\beta^{1/2} \sigma^{3/2} D \int_h^\infty (\zeta-h)^{3/2} p^*(\zeta) d\zeta$$

Здесь η – относительная фактическая площадь касания; q – среднее давление на контакте; $p^*(\zeta)$ – плотность вероятности в нормализованной форме.

Таким образом, модель Гринвуда - Вильямсона рассматривает, как правило, случаи контактирования гладкой поверхности с шероховатой, имеющей эквивалентные параметры, характеризующие особенности

структуры поверхностного слоя. Физико- механические свойства относят, как правило, к гладкой поверхности как упругопластического полупространства, а эквивалентная шероховатость и ее параметры свойственны сопряженному контртелу.

Расчеты показали, что величина деформации слабо зависит от нагрузки (увеличение нагрузки на порядок приводит к изменению деформации менее чем на 50%), а соотношение между A_r и P характеризуются почти линейной зависимостью. Кроме того, точность моделирования взаимодействия шероховатых поверхностей трудно оценить из-за принятых тех или иных допущений о форме неровностей, законе распределения высот выступов и других факторов, которые строго зависят от масштаба и возможностей измерительных устройств, поэтому применение данной модели для сопряжений при малых нагрузках даёт значительные ошибки.

Модель Буша, Гибсона, Томаса [155, 156] является развитием модели Гринвуда - Вильямсона и реализована также в виде набора сферических сегментов, расположенных на средней плоскости, контактное взаимодействие которых следует теории Герца. Полагая, что кривизна неровности имеет разные значения для анизотропной поверхности в направлении x и y , Буш и др. привели эту неровность к сферической. Тогда кривизна верхней части неровностей шероховатой поверхности принимается равной

$$k_m = \left(-\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) / 2$$

Относительная площадь контакта определяется следующей зависимостью:

$$\frac{A_r}{A_a} = \sqrt{\frac{\pi}{m_2} \frac{F}{E^* A_a}}$$

Здесь m_2 - второй момент, определяющий наклон неровностей; F - нагрузка; $1/E^* = (1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2$, где μ_i , E_i - коэффициент Пуассона и модуль упругости; A_r и A_a - фактическая и номинальная площадь контакта.

Кроме того, использование модели Герца в области малых контактных давлений приводит к значительным ошибкам в расчётах. Как показали

экспериментальные исследования, в области малых нагрузок (до 2 МПа), где внешнюю нагрузку воспринимают относительно острые вершины суб-микровыступов, данная модель (при интерполяции) даёт неприемлемые результаты, показывая наличие сближения поверхностей даже в области нулевого давления (рис. 1.11).

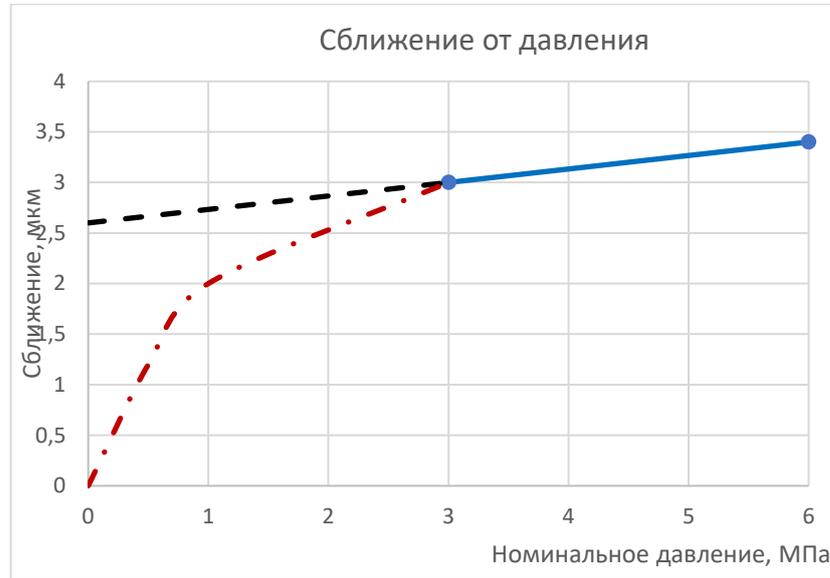


Рис. 1.11. Сравнение модели Герца (штриховая линия) с данными эксперимента (штрихпунктирная) в области малых давлений

Таки образом, данная модель, учитывая разный радиус скругления микро-неровностей, всё также использует сферические микровыступы, не позволяет учесть более мелкие структуры геометрии (субшероховатость) и рассматривает упругий контакт по Герцу, что является ошибочным при малых нагрузках.

Упрощенную многоуровневую модель предложил Арчард [63, 65] для учёта мульти-масштабной структуры шероховатой поверхности (рис. 1.12). Модель описывается как «выступы на выступах», где каждый выступ имеет полусферический форму, а более мелкие выступы равномерно распределены на его поверхности.

Эксперименты показывают, что некоторые статистические параметры поверхности, например, спектральные моменты m_0 ; m_2 и m_4 ,

зависят от масштаба измерения и соответствующей выборки исходных данных, и, следовательно, будут отличаться друг от друга, если параметры шероховатой поверхности измеряются с разным увеличением.

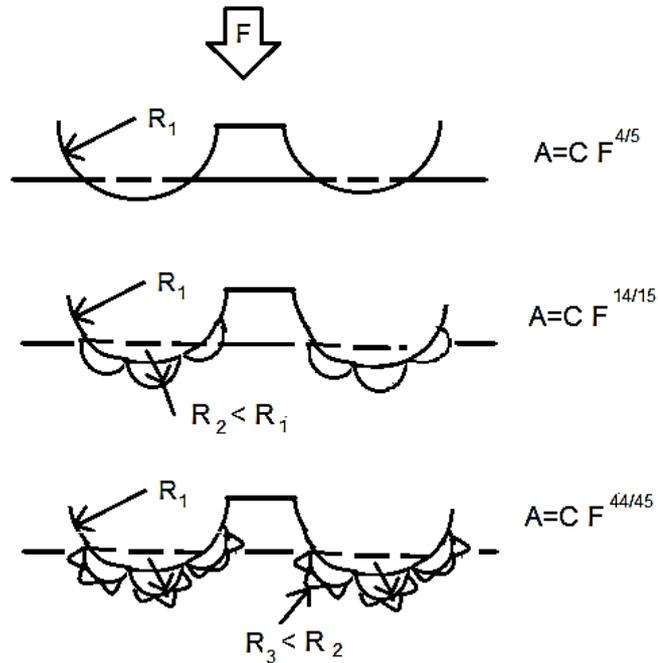


Рис. 1.12. Модель шероховатой поверхности Арчарда

Кроме того, при преимущественно упругом контакте связь между площадью контакта A и нагрузкой F в модели Арчарда практически линейна, из-за чего она также не соответствует реальным инженерным поверхностям, и ее применение приводит к значительным ошибкам при оценке параметров контактного взаимодействия при малых нагрузках.

Фрактальный подход. Особенности фрактального подхода, представленные в работах Д.Б. Горохова [28], И.С. Лабутина [67], А. Маджумдара [75], А.А. Потапова [99, 100] и др., позволяют исключить некоторые недостаточно обоснованные допущения при разработке деформационной модели, а именно постоянство радиуса закругления верхней части неровностей и его независимость от величины сближения, а также учёт масштаба введением в модель контактного взаимодействия таких факторов, не зависящих от масштаба (скейлинга), как фрактальная размерность и фрактальный параметр шероховатости.

Обзор литературы показал существование корреляционной связи между фрактальными параметрами и стандартными показателями шероховатости, однако вид и обоснование этой связи для инженерных поверхностей отсутствуют, что требует дополнительного исследования.

Таким образом можно сделать вывод о том, что применение фрактальных моделей для оценки контактного взаимодействия при малых нагрузках позволит исключить ряд необоснованных допущений, правильно идентифицировать упруго-пластическое состояние контакта и тем самым повысить точность расчёта параметров контакта в указанных условиях.

1.3. ТРЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В более ранних подходах к проблеме трения учёные полагали, что оно возникло за счет механических взаимодействий шероховатых поверхностей на уровне микромасштаба (С.Б. Айнбиндер [1]). Линейная зависимость силы трения от нормальной нагрузки в теории Кулона-Амонтона определялась наклоном неровностей. При этом коэффициент статического трения оказывался пропорциональным тангенсу угла наклона $f_S = \tan \theta$ [2]. Линейное соотношение между фактической площадью контакта и нормальной силой, наблюдаемое часто в экспериментальных исследованиях, используется для оценки адекватности предлагаемой модели механики контакта. Боуден и Тейбор [3] отмечали влияние на сопротивление относительно сдвигу твердых тел молекулярного взаимодействия на физическом контакте твердых тел.

В настоящее время полагают, что трение и сопутствующие процессы, определяющие поведение пары трения, зависят не столько от свойств элементов пары, сколько от структуры всей трибологической системы, включающей промежуточную и окружающую среду, а также разного рода воздействия на систему. Это имеет особое значение в трибосистемах в условиях низкой нагрузки, где сопротивление относительно сдвигу

элементов пары трения не показывает линейную зависимость от нормальных сил (Н.М. Алексеев [5]). Кроме того, рядом авторов (например, А.Г. Андреев [6]) установлена зависимость фрикционных явлений от параметров шероховатости, таких как, например, арифметическое среднее отклонение ординат неровностей R_a и др., а для оценки статического трения используют физико-механические свойства материала, соотношение твердостей элементов пары, распределение высот шероховатой поверхности и форму неровностей. *Но все эти исследования обычно строятся на основе определенного распределения высот шероховатости с принятыми неровностями в виде сферических сегментов, что, как было показано ранее, неприемлемо для решения «тонких» задач.*

В настоящее время в разной интерпретации широко применяется молекулярно-механическая теория трения, разработанная И.В. Крагельским и его сотрудниками. Приведём зависимости, позволяющие рассчитать величину коэффициента трения:

- при преимущественно упругом контакте:
$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + k_1 \sqrt{\frac{h}{r}}$$

- при преимущественно пластическом контакте:
$$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + k_2 \sqrt{\frac{h}{r}}$$

Здесь τ_0 - напряжения среза фрикционной связи при нулевом контактном давлении; p_r - фактическое давление; HB - твердость по Бринеллю; β - фактор упрочнения фрикционной связи (в расчетах принимают $\tau_0 = 100$ МПа, $\beta = 0,07$); $k_{1,2}$ - коэффициенты; h - глубина внедрения неровности в полупространство; r - радиус закругления верхней части неровности.

Фактическое давление определяется по формуле

$$p_r = \frac{4F_{3/2}(d^*)}{3\pi F_1(d^*)} E' \sqrt{\frac{R_q}{r}}$$

Нагрузку в безразмерном виде представим как

$$\frac{F}{A_a E'} = \frac{p_r A_r}{E' A_a}$$

Здесь отношение фактической площади контакта к номинальной выражается зависимостью

$$\frac{A_r}{A_a} = D_{SUM} \pi r R_q F_1(d^*).$$

Приведенные зависимости соответствуют модели взаимодействия жесткой шероховатой поверхности с гладким деформируемым полупространством, когда высотные параметры жесткой шероховатой поверхности на порядок выше, чем параметры шероховатости для более мягкой деформируемой поверхности. При этом параметры шероховатой поверхности относят к жесткому телу, а физико-химические показатели – к деформируемому полупространству. В случае, когда высотные параметры сопряженных поверхностей одинаковы, то задача определения параметров контактного взаимодействия решается путем замены контакта двух шероховатых поверхностей на контакт гладкой поверхности с поверхностью, имеющую эквивалентную шероховатость. Параметры эквивалентной шероховатости и гладкого деформируемого тела определяются так:

- модуль упругости: $E^{-1} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$
- твердость: $HB = \min (HB_1, HB_2)$
- радиус верхней части неровности: $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$
- среднее квадратическое отклонение ординат профиля: $R_q = \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}$

Для единичной фрикционной связи упругое и пластическое состояния характеризуются отношением h/r (h – величина внедрения жесткого сферического индентора в упругопластическое полупространство). На основании молекулярно-механической теории И.В. Крагельского представим для упругого состояния фрикционной связи следующие выражения:

- фактическое давление: $p_{ri} = \frac{4}{3\pi} \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{h}{r}\right)^{1/2}$
- молекулярная составляющая силы трения: $F_{\text{мол}i}^0 = \pi r_i h_i \tau_0 + \beta p_{ri}$

- механическая составляющая по Д. Тейбору [6]: $F_{\text{мех}}^0 = \frac{0,25\alpha_{\text{эф}}Er^2}{1-\mu^2} \left(\frac{h}{r}\right)^2$

Здесь $\alpha_{\text{эф}}$ – коэффициент, учитывающий гистерезисные потери (для закаленной стали и сферического индентора $\alpha_{\text{эф}} = 3 \cdot 0,02 = 0,06$).

Для пластического контакта запишем следующие выражения:

- фактическое давление: $p_r = H$
- молекулярная составляющая силы трения: $F_{\text{моли}}^0 = \tau_0 \frac{F_{Nk}^0}{H} + \beta H$
- механическая составляющая силы трения определяется по формуле, аналогично упругому контакту.

Зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения от безразмерной нагрузки показана на рис. 1.13, а на рис. 1.14 показана зависимость механической составляющей силы трения на отдельном пятне контакта от отношения глубины внедрения выступа в полупространство к радиусу верхней части выступа h/r .

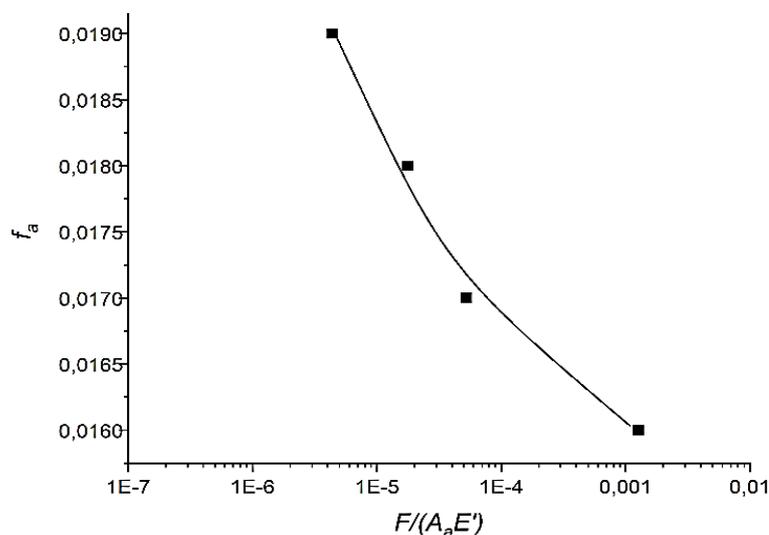


Рис. 1.13. Зависимость молекулярного коэффициента трения от нагрузки

Оценка коэффициента трения по приведенным выше соотношениям связана со следующими трудностями:

1. *Отсутствует методика определения радиуса закругления верхней части неровности при многовершинности выступа, которая всегда присутствует при анализе первичной нефильтрованной поверхности.*

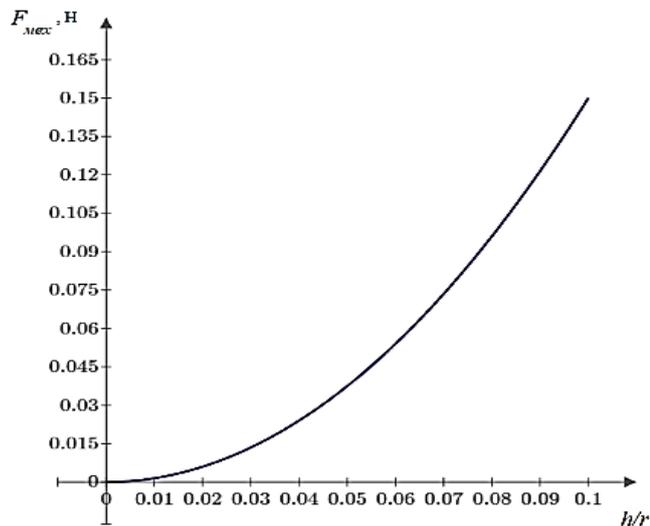


Рис. 1.14. Зависимость механической составляющей силы трения от h/r

2. Глубина внедрения h зависит от радиуса закругления вершин неровностей.
3. Требуется знать, какая часть неровностей подвержена упругой деформации, а какая – пластической, так как при росте нагрузки для упругого контакта коэффициент трения падает (давление стоит в знаменателе первого слагаемого), а для пластического контакта с увеличением нагрузки коэффициент трения растет пропорционально внедрению микронеровностей (третье слагаемое).
4. Приведенные соотношения для оценки коэффициента трения основаны на физическом представлении о внедрении отдельного жесткого сферического выступа с упругопластическим полупространством. Если твердости поверхности сопряжения имеют примерно одинаковую величину, приведенные зависимости не могут адекватно описывать процесс контактного взаимодействия.

Общее число пятен контакта зависит от структурных особенностей сопряженных поверхностей, физико-химических свойств деформируемой поверхности и условий нагружения. Например, в работе В.С. Комбалова [58] приведена зависимость, оценивающая общее число пятен контакта как

$$n_r = \frac{3,1A_a}{krR_a} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{0,66}$$

Средняя площадь пятна контакта равна

$$\langle a \rangle = 0,33krR_a \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{0,33}$$

Здесь коэффициент $k = 11$ для упругого контакта и $k = 21$ для пластического.

Формулы являются аппроксимацией определённого случая и не содержат какой-либо связи с реальными размерами пятен контакта и их упруго-пластическим состоянием при сопряжении конкретных поверхностей.

Таким образом, сложность решения задачи оценки силы трения реальных инженерных поверхностей заключается в том, что реальные пики неровностей находятся на разной высоте, определяемой плотностью их распределения, а каждая неровность имеет свой радиус скругления верхней части и воспринимает нагрузку, определяемую её упруго-пластическим состоянием контакта и величиной деформации. Принятие тех или иных допущений для упрощения расчетных процедур приводит к ошибкам конечного результата.

Использование имитационного моделирования контактного взаимодействия фрактальных поверхностей и проведение вычислительного эксперимента позволит повысить точность расчета.

1.4. ИЗНАШИВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Множество работ было посвящено изучению зависимости изнашивания от различных факторов, таких как нагрузка, скорость скольжения, межфазовые условия, молекулярное трение и свойства материалов (Lisowski and Stolarski, 1981; Finkin, 1972; Paretkar и др., 1996; Yang, 2003). Однако большинство соотношений между адгезионным изнашиванием и скоростью скольжения получены в ранних исследованиях на основе полуэмпирических подходов и параметров статистической топографии (например, арифметическое среднее значение высот неровностей, наклонов и кривизны верхней части неровностей), которые не учитывают зависимость указанных параметров от масштаба измерения поверхностей. Многие результаты

исследований, учитывающие шероховатость или коэффициент трения, основываются на экспериментальных данных, при этом до сих пор используется закон Кулона.

Статистическая модель, предложенная Гринвудом и Вильямсоном [171] в 1966 г., и использование представления профиля поверхности как случайного процесса (Nayak, [182], 1973) применяются в механике контакта, при этом параметры поверхности оказываются зависимыми от масштаба измерения. С развитием техники и технологии появляется необходимость более полного описания микрогеометрии поверхности. Шесть показателей качества, нормируемые ГОСТ 2789-73, уже не могут описать все особенности микрогеометрии поверхности и, следовательно, её функциональные свойства.

Механизм изнашивания, пригодный для многих случаев, предложил И.В. Крагельский. Линейная интенсивность изнашивания i_h по И.В. Крагельскому и Н.М. Михину [62] определяется зависимостью

$$i_h = \frac{V_{dp}}{A_r n_p d_n}.$$

где i_h – удельная интенсивность изнашивания; V_{dp} – деформированный объем неровностей; n_p – число циклов нагружения при пластическом контакте, приводящих к износу неровностей; d_n – диаметр пятна контакта (в первом приближении оценку диаметра пятна можно дать по Эшби [16] по формуле $d_n = 2(10^5/HB)$, м, где твердость по Бринеллю принимается в ГПа); A_r – фактическая площадь контакта, равная

$$A_{rp} = \frac{F_p}{H}.$$

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 зависимостью $\varepsilon_t = cftg\theta$, где c – коэффициент ($c = 0,01 \dots 0,05$),

f – коэффициент трения; θ – угол наклона неровностей; t_p – показатель степени в уравнении кривой выносливости.

В модели Крагельского И.В. сложность представляет определение ряда параметров:

1. Деформированный объем микронеровностей;
2. Диаметр пятна контакта;
3. Число пятен, находящихся в упругом или пластическом состоянии.

Из-за относительно простых предположений широкое распространение получила ещё одна модель изнашивания – модель Арчарда [229]. В настоящее время она тоже активно используется многими исследователями, например Qureshi and Sheikh [218], Yang [208] для оценки темпа изнашивания при трении скольжения поверхностей.

Модель Арчарда основывается на следующем допущении: объемный износ равен произведению номинальной площади контакта на сближение поверхностей пары трения. Так, например, для схемы «палец-диск» номинальная площадь равна πr^2 , где r – радиус пальца и h – линейный износ. В этом случае изношенный объем равен $w(t) = \pi r^2 h(t)$. В действительности, изнашивание происходит на фактических площадях контакта, и более того, на отдельных пятнах контакта - микровыступах. Пятна контакта находятся в упругом, пластическом, или упруго - пластическом состояниях. Если принять во внимание мнение И.В. Крагельского о том, что коэффициент износа является величиной, обратной числу циклов нагружения, приводящих к разрушению вследствие усталости, то коэффициент износа для данных условий работы не является постоянной величиной.

Представим уравнение оценки износа выступа микронеровности на основе закона Арчарда в виде:

$$w(t) = k_w \frac{F}{H} L(t),$$

где w – объемный износ; k_w – коэффициент износа; F – нормальная нагрузка;

H – твердость изнашиваемого (менее твердого) тела; L – путь трения.

Приведенный закон при оценке объема изношенного материала учитывает физические параметры процесса и механические свойства материала, и описывает процесс адгезионного изнашивания, которое пропорционально пути и мощности трения.

Главным недостатком модели Арчарда является то, что она требует знания коэффициента износа, который определяется с помощью соответствующего эксперимента. При этом процессы трения и изнашивания при модельном испытании должны быть идентичны работе натурального узла трения, т.е. критерии подобия должны быть одинаковыми.

Одним из таких критериев является коэффициент трения. Однако в уравнение Арчарда коэффициент трения не входит в явном виде. Введем в уравнение силу трения (по Амонтону)

$$F_f = fF_n,$$

где f – коэффициент трения.

Если в закон Арчарда вместо нормальной нагрузки подставить силу трения, то коэффициент трения окажется в знаменателе. *Тогда увеличение коэффициента трения приводит к снижению износа, что противоречит многим экспериментальным данным.*

Модель Арчарда действительна для грубых поверхностей (с пластично-деформированными неровностями) и непригодна для упругих поверхностей, например, полимера с упруго-деформированными неровностями. Кроме того, применение модели для различных материалов поверхностей, изменение вида трения, влияние окружающей среды, часто приводят к несоответствию между результатами эксперимента и полученными вычислениями. Можно также добавить, что закон Арчарда не рассматривает существенную эволюцию физико-механических свойств изнашиваемых материалов.

Были также разработаны и другие аналитические модели изнашивания. Однако они главным образом сосредоточены на адгезионном механизме изнашивания, а большинство широко используемых моделей изнашивания

являются в основном эмпирическими и были созданы, чтобы удовлетворить конкретному техническому применению.

Таким образом, в настоящее время нет общей аналитической модели, которая объединяет трение и изнашивание и которая подходила бы для широкого спектра технического применения. Большинство используемых моделей являются эмпирическими и подходят для определенного применения, для которого были разработаны.

Разработка аналитической модели, учитывающей коэффициент трения, поверхностную шероховатость и объем износа во время изнашивания, позволила бы осуществить значительный вклад в современную науку и могла бы быть адаптирована к использованию в широком спектре промышленного применения. Модель не должна быть эмпирической по своей природе, и тогда она не будет ограничена определенными ситуациями, а представление поверхностей в виде фрактального объекта позволит определить ряд геометрических параметров (число фактических пятен контакта, их диаметр и т.д.) и обосновать выбор необходимых коэффициентов.

1.5. ГЕРМЕТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛ-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Задачи, поставленные в настоящей работе, основываются на создании трёхмерных моделей инженерных поверхностей и проведение процедуры их контактирования. При этом можно оценить картину контактного взаимодействия с расчётом величины сближения поверхностей при приложении сжимающей нагрузки, при которой формируется некоторый промежуточный слой, определяемый исходной шероховатостью. Структура этого слоя подразумевает наличие пятен контактного взаимодействия между микровыступами сопряжённых поверхностей, которые воспринимают внешнюю нагрузку и находятся в упругом или пластическом состоянии, а также цепочку пустот между ними, которая может быть заполнена смазочным материалом, воздухом или некоторой уплотняемой средой, если представить, что моделируется уплотнительное устройство. Увеличение нагрузки на

сопряжённые поверхности приведёт к увеличению их сближения и уменьшению объёма пустот между ними, а также, возможно, перекрытию некоторых каналов из цепочки пор. Таким образом, разрабатываемая методика оценки контактного взаимодействия сопряжённых поверхностей, помимо решения вопросов трения и изнашивания, позволяет решать задачи обеспечения заданной степени герметичности металл-металлического стыка уплотнительных устройств (например, фланцевых, конусных и т.д.).

В общем виде задачу можно сформулировать так: требуется оценить величину затяжки стыка металл-металлического уплотнительного устройства, выполненного с определённой чистотой сопряжённых поверхностей (волнистостью и шероховатостью) для достижения герметичного состояния при транспортировании через него некоторой среды с заданными свойствами под расчётным давлением. Кроме того, задачу можно изменить для подбора оптимальной шероховатости сопряжённых поверхностей, при которой уплотнительное устройство будет герметично при заданных условиях. Это ещё один класс задач, который можно решить в рамках представленной работы, поэтому рассмотрим подробнее существующие методы расчёта металл-металлических уплотнительных устройств.

Герметичность таких соединения зависит от многих параметров и свойств материалов, которые можно объединить в следующие группы:

- Свойства сопряжённых поверхностей уплотнительного устройства.
- Параметры затяжки уплотнительного устройства.
- Свойства рабочей (уплотняемой) жидкости.
- Параметры транспортирования рабочей жидкости.

В первую группу, учитывающую свойства сопряжённых поверхностей, отнесём основные механические характеристики материалов уплотнительного устройства и геометрию их поверхностей. Под основными механическими характеристиками материала подразумеваем все параметры материала, характеризующие его поведение при деформации, т.е. твёрдость, модуль

упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности, удельный коэффициент теплового расширения. При этом рассматривается контакт металлических поверхностей без применения промежуточных прокладок, т.к. при высоком давлении мягкая прокладка быстро повреждается рабочей средой (выдавливается), а применение более твёрдых прокладок из другого материала не целесообразно из-за разного коэффициента теплового расширения, что приводит к разгерметизации стыка поверхностей при колебаниях температуры. Следует учитывать, что геометрия поверхностей имеет довольно сложное строение, и можно выделить макроотклонения, волнистость и шероховатость. Каждый вид геометрического отклонения от идеальной формы даёт свой индивидуальный вклад в нарушение герметичности уплотнительного соединения. Если пояска контакта не превышает в среднем 5 мм, то макроотклонениями можно пренебречь.

К свойствам рабочей среды отнесём все её параметры, оказывающие влияние на её протекание через стык сопряжённых поверхностей: вязкость, плотность, удельная теплоёмкость и вес. При этом следует учитывать влияние агрессивных жидкостей и газов на материал уплотняемого устройства. Параметрами транспортирования рабочей жидкости или газа является в основном разность давления в трубопроводе и в окружающей среде, т.е. перепад давления.

При проектировании уплотнительного устройства необходимо учитывать все вышеперечисленные факторы в комплексе для адекватного моделирования процесса протекания рабочей среды через уплотнительное соединение. Свойства рабочей среды и параметры её транспортирования являются граничными условиями и исходными данными для расчёта величины утечек по выбранной модели течения, которая определяется параметрами контактирования сопряжённых поверхностей и параметрами их микрогеометрии.

В настоящее время нет единого подхода при рассмотрении режимов течения рабочей среды между поверхностями соприкосновения. Большое

разнообразии конструкций уплотнительных устройств, условий их эксплуатации, физических свойств уплотняемой среды, микро- и макрогеометрических характеристик и физико-механических свойств контактирующих поверхностей определяют большое разнообразие режимов течения.

Так, течение рабочей среды в работе Б.В. Дерягина [38] рассматривается как молекулярное, а в работах Д.Ю. Богомолова [15], Р. Коллинза [57], В.П. Крымасева [66] как ламинарное или турбулентное для бесконтактных уплотнений в быстроходных машинах. Некоторые исследователи, например А.В. Лыков [74] и Н. Патир [93] рассматривают течение как струю из отверстий, образованных узкими щелями. В работе Н.В. Щелкачёва [142, 143] величину утечки рабочей среды Q через круглое или щелевидное отверстие определяют как сумму утечек, образованных молекулярным и вязкостным потоками. Переход от одного потока к другому определяется размерами отверстия или щели – пористостью уплотняющего стыка. В работе G. Armand [150] течение принимается как стационарный ламинарный поток. Считая, что зазор между контактирующими поверхностями достаточно мал по сравнению с длиной пути движения потока рабочей среды, а сила инерции мала в сравнении с силой вязкого сопротивления, получают следующую зависимость для определения объёмного расхода воздуха

$$Q_a = \frac{\pi \cdot h^3 \cdot (P_b^2 - P_a^2)}{12 \cdot \eta \cdot P_a \cdot \ln(R_1/R_2)}$$

где h – высота щели; P_a – давление атмосферного воздуха (абсолютное); P_b – давление рабочей среды (абсолютное); R_1, R_2 – внешний и внутренний радиусы уплотнения; η – коэффициент вязкости воздуха.

Как видно из приведенной зависимости, утечка воздуха пропорциональна квадрату давления рабочей среды. Этот вывод подтверждается и в других работах (В.М. Алексеев [4], А.А. Волошин [22, 121], Г.П. Киселёв [54], Э. Майер [76], А.В. Николаев [89], В.Д. Продан [108], Л.П. Ткач [127]). В работе Л.А. Кондакова [60] приводятся данные по

определению расхода газа в случае утечки через локализованный дефект, пористую среду и через материал уплотнения. В первом случае расход газа пропорционален квадрату разности давлений, во втором – разности давлений, а в третьем – корню квадратному из разности давлений.

В работах Кадземаки [51], В.Е. Маркво [81], О.И. Молдаванова [86], М.В. Раздолина [109], Г.А. Строганова [122 - 124] на примере запорной арматуры приведены обширные экспериментальные данные, отражающие влияние средней технологической щели на герметичность стыка. Размеры технологической щели обусловлены параметрами микро- и макрогеометрии. Однако, в большинстве работ (А.В. Димов [40], А.В. Калашников [53], Л.С. Лейбензон [71], Т. Цукидзо [91], В.К. Житомирский [134], J. Bear [153], I. Fatt [165], F. Taylor [172], A. Hunt [173], J. Kou [177]) стык контактирующих поверхностей моделируется пористым слоем. Принимая движение рабочей среды в контактном слое подобно движению в пучке извилистых капилляров, представляется возможным оценить количество рабочей среды, протекающей через неплотности уплотнения, на базе основных положений теории движения газов или жидкости в пористой среде, которые описаны у В.И. Аравина [7], Д.Ф. Гуревича [32], В.В. Измайлова [48], А. Рота [111, 193]. Так, в случае установившегося движения жидкости, объёмный расход определяется как

$$Q = -\frac{\Phi \cdot A}{\eta \cdot L} \cdot [P_a - P_b + \rho \cdot g \cdot L],$$

где Q – объёмный расход; Φ – коэффициент проницаемости; A – площадь поперечного сечения пористого слоя; L – длина пористого слоя; P_a ; P_b – наружное и внутреннее давление уплотняемой жидкости; η – динамический коэффициент вязкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести.

Коэффициент проницаемости Φ , определяемый только структурой пористого тела, в работах О.А. Брука [18], Л.Г. Гольдштейна [27], Б.П. Железнова [43], В.П. Тихомирова [129], Т. Цукидзо [139], И.А. Щупляк [144, 145], D.F. Moore [181] находится по разным зависимостям.

Таким образом анализ представленных работ показал, что до этого

момента отсутствует единая методика определения расхода рабочей среды через стык, образованный шероховатыми поверхностями. В каждой работе предлагалась своя методика расчёта герметичности, применяемая к каждому конкретному случаю.

Большинство экспериментальных работ и теоретических исследований сводилось к определению минимальных контактных давлений, необходимых для обеспечения заданного уровня герметичности (А.В. Арефьев [8], В.А. Белый [13], В.М. Гаврюхин [25], С.Е. Захаренко [45], Д.А. Мендельсон [82], Л.И. Экслер [146], J.S. Courtney [163], R.C. Parker [186].) В работах Х.Х. Мухаметшина [88], В.Б. Протопопова [104], РМ-3-62 [110], В.Ф. Солдатова [119], А.А. Туника [132], Т. Цукидзо [140], J. Wallach [203], Н. Yang [208] за критерий силового воздействия принимается произведение коэффициента уплотнения на давление уплотняемой среды. В работах В.Д. Продана [105 - 108] усилие для обеспечения герметичности складывается из усилия обжатия, необходимого для обеспечения пластических деформаций микронеровностей уплотняемых поверхностей соединения, и усилия для компенсации действия внутреннего давления на поверхности уплотнения.

В отдельных работах, например, в работах В.А. Калашникова [53], Г.Г. Лебединского [69], Г.Я. Лейва [72], П.М. Огара [90], Б.В. Скворцова [118], H.S. Chenq [162], M. Gonzalez-Valadez [170], [196], K. Varadi [200], теоретические зависимости величины утечки рабочей среды от контактных давлений на уплотняемых поверхностях были основаны на теории контактного взаимодействия. *Однако универсальные, точные и удобные зависимости, необходимые для инженерных расчетов, не получены. Это связано с трудностью учёта всех факторов, влияющих на контактные давления в стыке. Кроме того, аналитические уравнения не позволяют с помощью расчёта получить полную герметичность, что на практике легко достижимо (уравнения всегда дают, пусть и малую, но утечку через рассчитываемый стык уплотнения, чего в реальности можно избежать).*

В настоящее время существуют в основном два направления в решении проблемы по обеспечению заданной степени герметичности.

Первое направление характеризуется дифференцированным изучением влияния отдельных факторов, условий и параметров на герметичность соединений, причём часть из них иногда не учитывается вообще. Данное направление не ставит своей целью нормирование точности параметров с учётом их конструкторско-технологической взаимосвязи, поэтому имеет узкую направленность.

Второе направление связано с изучением физической сущности процесса герметизации, с установлением научно - обоснованных норм герметичности. Это ведёт к нормированию показателей обеспечения заданного уровня герметичности в конструкторской и технологической документации. Данное направление перспективно, так как позволит решить задачу управления процессом герметизации на основе учёта взаимосвязи отдельных факторов, условий и параметров при изготовлении, сборке, повторной сборке (ремонте).

Рассмотрим известные *модели пористой среды*. Идеальная пористая среда представляет собой систему каналов (обычно цилиндрической формы) с одинаковым диаметром. Фиктивная пористая среда состоит из упаковки шаров одинакового диаметра. Обе модели представлены на рис. 1.15.

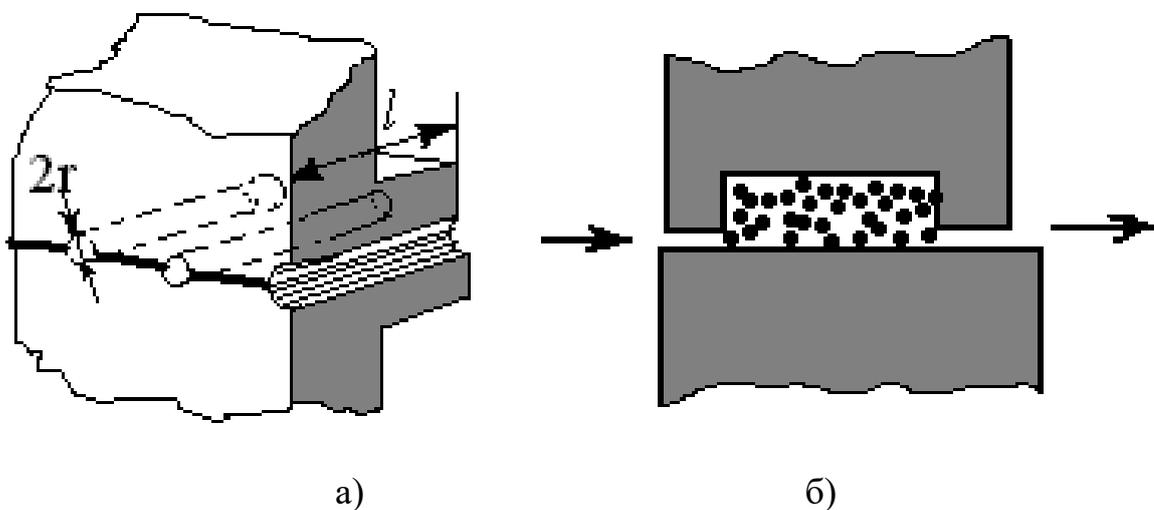


Рис. 1.15. Идеальная а) и фиктивная б) пористая среда

Следует заметить, что для оценки герметичности пористой среды многие исследователи часто применяют *перколяционную теорию протекания*, которая основывается на процессе случайного течения жидкости (газа) через пористую среду, которую предложили С. Бродбент и Дж. Хаммерсли (S.R. Broadbent, J.M. Hammersley, 1957). Процесс протекания в этом случае называют перколяционным процессом, характерной особенностью которого является наличие порога протекания. Ниже этого порога процесс распространения жидкости (газа) ограничен конечной областью среды. Величину порога протекания можно определить с помощью численного эксперимента. Рассмотрению перколяционных процессов посвящено достаточно большое количество литературы.

Рассмотрим более подробно модели пористых сред. В отличие от модели идеальной пористой среды размеры пор (или каналов) в фиктивной модели не остаются постоянными. Поперечное сечение порового канала по длине оси постоянно меняется. Оси поровых каналов в этой модели при плотной упаковке шаров не прямолинейны. Сликтер [71] полагал, что поровые каналы следует считать прямолинейными в виде сети капилляров. При этом гидравлические характеристики будут зависеть от пористости и просветности (т. е. от степени упаковки твердых шаров). Козени [9] предложил заменить объем фиктивной пористой среды равновеликим объемом идеальной пористой среды. В этом случае прямолинейные капилляры имеют гидравлический радиус r_h , который выражается через диаметр шаров и пористость, как показано в работах R.V. Waterhouse [205] и [172]. Для упрощения считают, что капилляры имеют один и тот же диаметр, называемый гидравлическим. Его размер зависит от диаметра частиц d_p и пористости среды m и равен

$$d_h = \frac{m}{1 - m} d_p.$$

Реальная пористая среда, образованная в сопряжении инженерных шероховатых поверхностей, существенно отличается от рассмотренных моделей (идеальной и фиктивной). Обычно реальную пористую среду

заменяют на эквивалентную идеальную среду по гидравлическим характеристикам, как показано у В.Н. Щелкачёва [142, 143]. Совместное решение формул течения жидкости по капилляру (Пуазейль) и линейной фильтрации (Дарси) дает следующую оценку гидравлического диаметра

$$d_h = 5,7(K/m).$$

Здесь K – коэффициент проницаемости в единицах Дарси (Da); m – пористость; d_h – гидравлический диаметр, мкм.

Основным минусом модели пористой среды является её абстракция по отношению к реальной топографии контактного зазора. В этой модели частично можно учесть величину пористости реального стыка поверхностей, но учесть размер и геометрию постоянно изменяющегося канала, их число, а особенно влияние направления следов обработки поверхности практически невозможно, что ограничивает применение этой модели для приблизительного расчёта изотропных поверхностей.

Фрактальная модель порового пространства, считающаяся наиболее перспективной, имеет свои характеристики. Учитывая искривленность капилляров, можно найти длину отдельного капилляра L_t , которая будет больше, чем длина прямого капилляра L_0 в направлении течения уплотняемой среды. В работе S.W. Weatcraft [206] предложена формула для оценки длины искривленного канала как

$$L_t(\varepsilon) = \varepsilon^{1-D_t} L_0^{D_t}.$$

Здесь D_t – фрактальная размерность канала; ε – длина шкалы измерения. При $D_t = 1$ канал становится прямым, а при $D_t = 2$ наблюдается поверхностное течение. Приведенное уравнение является одним из фрактальных скейлинговых законов, описывающих поровую структуру.

Кроме искривленности для оценки фильтрационных процессов необходимо учесть число капилляров, которое определяется по формуле, используемой Маджумдаром при оценке параметров контактного взаимодействия фрактальных поверхностей:

$$N(A > a) = \left(\frac{a_{max}}{a_{min}} \right)^{D_f/2},$$

где D_f – фрактальная размерность порового пространства; a – площадь пор в направлении, перпендикулярном направлению течения.

Фрактальная модель усреднённо позволяет определить геометрию каналов протекания и их число при моделировании стыка фрактальных поверхностей, что делает её самой привлекательной из существующих моделей, и поэтому она была взята за основу.

1.6. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании проведённого анализа литературы по теме диссертационного исследования в 1 главе настоящей работы можно сделать следующие заключения:

- 1. В настоящее время не существует комплексной модели, позволяющей одновременно и с высокой степенью точности учесть все основные виды отклонений инженерных поверхностей от идеальной геометрии. Кроме того, из основных трёхмерных моделей шероховатых поверхностей самой приемлемой оказалась фрактальная модель, которая позволяет обойти ряд ограничений современных моделей (например, постоянство радиуса скругления вершин микровыступов и т.д.) и учесть даже самые мелкие микронеровности (например, субшероховатость), моделируя при этом «первичную поверхность» после технологической обработки с высокой детализацией в заданном масштабе измерений.*
- 2. Существующие модели контактного взаимодействия шероховатых поверхностей не позволяют достаточно точно оценить число и фактическую площадь пятен контакта, а самое главное - правильно идентифицировать их упруго-пластическое состояние при малых нагрузках на уровне деформации микронеровностей. В отличие от классического подхода, когда считается, что первичный контакт*

возникает в упругом состоянии и по мере увеличения нагрузки переходит в пластический, на уровне микроконтакта действует иной механизм. Наличие относительно острых субмикровыступов дают малую площадь контактного взаимодействия и первоначально пластическое состояние контакта, которое по мере роста нагрузки меняется, постепенно переводя пятна контакта из пластического состояния в упругое в зависимости от картины контактного взаимодействия, расположения микронеровностей и их формы, что приводит к нелинейной зависимости сближения поверхностей от нагрузки в области малых контактных давлений (≈ 2 МПа) и невозможности применения в этих условиях классической модели Герца.

3. Коэффициент трения является интегральной величиной, содержащей адгезионную и деформационную составляющую, вклад которых во многом определяет упруго-пластическое состояние пятен контакта (с учётом физических свойств материала) и микрогеометрия сопряжённых поверхностей, определить которые с достаточной степенью точности при малых нагрузках с помощью современных моделей поверхностей не получается.
4. Большинство существующих моделей трения в основном являются эмпирическими и подходят для определенного применения, для которого были разработаны. Относительно универсальные и широко применяемые модели трения либо содержат переменные, определить которые очень сложно, как, например, в модели И.В. Крагельского, где деформированный объем неровностей $V_{др}$, число циклов нагружения n_p , диаметр пятна контакта d_n и фактическая площадь контакта A_r определяются по приближённым зависимостям и имеют большое расхождение с экспериментальными данными при малых нагрузках, либо требуют проведение эксперимента, как, например, в модели Арчарда, где требуется экспериментальное определение

коэффициента износа k_w для заданных режимов работы, что затрудняет её использование, а также делает модель вообще неприменимой при изменении условий трения.

5. *Современные модели герметичности металл-металлических уплотнительных устройств, которые рассматриваются в данной работе из-за схожести условий работоспособности, основанных на решении контактной задачи, являются абстрактными (пористая среда) и не позволяют с достаточной точностью определить фактические параметры каналов протекания для конкретного сопряжения с учётом анизотропии поверхностей и их взаимного расположения (например, извилистость, число каналов, их диаметр, который постоянно меняется и т.д.), а также не допускают возможности возникновения полной герметичности, рассчитывая хоть и малую, но утечку через уплотнение, что в совокупности даёт значительные ошибки при проектировании новых уплотнительных устройств.*

Таким образом, разработка новой методологии расчёта и проектирования, которая адекватно описывала бы особенности процесса трения и изнашивания шероховатого слоя при малых нагрузках, а также герметичность металл-металлических уплотнительных устройств 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, трения и изнашивания 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 упругопластического состояния. Эксперименты показывают, что на микроуровне процесс деформации микронеровностей отличается от классической модели деформирования макротел тем, что первичный контакт возникнет в пластическом состоянии относительно острых вершин микровыступов и по мере дальнейшего сближения переходит в упругое. Новая модель должна учитывать этот факт и основываться на критерии перехода из пластического состояния в упругое, который требуется определить.
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.

ГЛАВА 2. МНОГОУРОВНЕВАЯ ТРЁХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Задача описания поверхности после того или иного вида обработки, обеспечивающей требуемые эксплуатационные характеристики, связана не столько с выбором метода описания, сколько с выделением тех параметров, определяющих особенности поверхности, которые имеют метрологическую поддержку и выражены таким образом, чтобы их можно было реализовать в процессе технологии изготовления поверхности. В стандарте ISO 25178-2 содержится множество пространственных параметров, и информация о структуре поверхности может быть избыточной. Анализ корреляции между параметрами полезен при их выборе. В неявном виде такие параметры, как глубина впадин, наклон неровностей, параметры опорной поверхности Абботта-Фейерстоуна и др. так или иначе учитываются при решении контактных задач, например, при оценке параметров процесса просачивания (перколяции) через уплотнительное соединение. Компьютерное моделирование фрактальных поверхностей и визуализация 3D поверхности в виде карт являются эффективным способом представления инженерных поверхностей с учетом особенностей строения на микро- и нано уровне. Эти особенности следует учитывать особенно при решении задач контактного взаимодействия слабонагруженных узлов трения и при оценке параметров процесса фильтрации через фрактальную пористую среду. Такой подход дает конструктору максимум информации при проектировании слабонагруженных узлов трения. Фрактальные показатели выражают в неявном виде связь между параметрами поверхности и ее функциональными свойствами. Шероховатость на микро- и наноуровне базируется на справедливости утверждения, что структура естественной инженерной поверхности одинаково фрактальна на всех уровнях. В работе выявлена корреляционная зависимость с достаточно высокой степенью связи между фрактальными трехмерными и стандартными (по ГОСТ 2789-73) показателями. В настоящее время фрактальные параметры

не отражаются в рабочей документации (чертежах деталей), и технолог использует стандартные параметры шероховатости, аналогичные для подобных изделий, удовлетворительно показавших себя в практике эксплуатации.

Трехмерные 3D параметры поверхности более надежны, чем параметры 2D-профиля. Например, пик на 2D-профиле не обязательно является вершиной рельефа поверхности, особенно для случайных поверхностей, а средний уклон поверхности больше, чем средний наклон профиля. Найяк [189] разработал соотношения между статистикой двумерного случайного профиля шероховатой поверхности и трехмерными гауссовыми поверхностями. Для описания поверхности недостаточно использовать только высотный параметр S_a . Другие параметры, такие как пространственные, гибридные или функциональные, могут предоставить больше информации о текстуре поверхности.

Математические модели поверхностей металлов, сплавов и нанопокровов, используемые при моделировании таких физических процессов, как трение, изнашивание, фильтрация жидкости через зазор соединения, содержат в большинстве случаев сильные упрощения. Допущение о гладкости поверхности приводит к ряду физически необоснованных выводов. Так, экспериментально доказано, что микроструктура поверхности на нанометровом и атомарном уровне оказывает значительное влияние на результаты расчетов.

В работе теоретически обоснована трактовка результатов экспериментов контактного взаимодействия шероховатых поверхностей и идентификация трения при малых нагрузках. Прикладное значение определяется необходимостью оптимизации средств диагностики поведения слабонагруженных пар трения, в которых происходит имитация трения и изнашивания, а также технологических процессов создания требуемого качества поверхности для конкретного проектируемого сопряжения.

2.1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Геометрия инженерной поверхности является само по себе сложным объектом, имеющим многоуровневую структуру [192, 195]. Это объясняется многочисленными погрешностями и отклонениями от идеального, указанного инженером – конструктором, состояния при изготовлении детали.

Одной из основных проблем в механике контактного взаимодействия твердых тел является установление связи между геометрией поверхности и ее эксплуатационными свойствами. Сложность решения проблемы заключается в отсутствии единого подхода к оценке зависимости между геометрией поверхности и ее функциональным назначением. В работе Д. Уайтхауза [134] рассматривается обобщенный подход к проблеме, основанный на классификации эксплуатационных характеристик шероховатых поверхностей. Выделим те характеристики, которые являются существенными при решении трибологических задач, в частности, влияющие на контактное взаимодействие, механизмы трения и изнашивания, а также на герметичности стыка шероховатых поверхностей. Наличие пленок на поверхности оказывает в большей степени влияние на электро- и теплопроводность, однако при этом сохраняется ведущая роль шероховатости и волнистости при формировании фактической и контурной площадей контакта. Таким образом, при решении контактных задач основным фактором является микрогеометрия поверхности независимо от наличия пленок.

В табл. 2.1 приведены некоторые характеристики топографии поверхности и их влияние на эксплуатационные свойства поверхностей. К таким характеристикам топографии отнесем:

- R_a , R_q – арифметическое среднее и среднее квадратическое отклонение высот неровностей;
- R_{sk} , R_{ku} – коэффициенты асимметрии и эксцесса;
- $R_{\Delta q}$ – среднее квадратическое значение наклона неровностей;

- m_4 – спектральный момент, характеризующий кривизну выступа;
- R_{Sm} – средний шаг неровностей;
- S_{al} – автокорреляционная длина – горизонтальное расстояние, которое быстрее всего уменьшается до указанного значения;
- S_{td} – отношение минимальной длины автокорреляционной функции к максимальной по выбранным направлениям поверхности.

Таблица 2.1

Влияние топографии поверхности на ее эксплуатационные свойства

Эксплуатационные свойства	Высотные параметры	Форма и распределение	Наклон и кривизна	Шаговые параметры	Текстура
Характеристики топографии	R_a, R_q	R_{sk}, R_{ku}	$R_{\Delta q}, (m_4)^{1/2}$	R_{Sm} , плотность вершин	S_{td}, S_{al}
Подшипники	(+)	(+)	+	+	(+)
Уплотнения	(+)	(+)	(+)	+	(+)
Трение	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Жесткость стыка	(+)	(+)	+	+	+
Изнашивание	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
Адгезия	(+)	(+)	+	+	+
Усталостные явления	(+)	+	-	-	(+)

Примечание. (+) – существенное влияние; + – слабое влияние; - – отсутствие влияния

Таблица позволяет сделать оценочные выводы относительно слабого или сильного влияния параметров шероховатости на те или иные эксплуатационные свойства поверхности. Более того, при разработке модели поверхности данные таблицы позволяют не принимать во внимание параметры, которые незначительно влияют на эксплуатационные свойства.

Моделирование контакта двух шероховатых поверхностей, описываемых с помощью одного из самых популярных методов случайного поля, по мнению Д. Уайтхауза, недостаточно хорошо предсказывает

эксплуатационные характеристики. В качестве примера рассмотрим деформацию единичной микронеровности (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Деформация единичной неровности

При контактном взаимодействии неровностей, находящихся в упругом состоянии, первоначальная картина поверхности меняется. В соответствии с рис. 2.1 происходят структурные изменения: деформация соседних выступов и радиусов кривизны. Таким образом, первоначальная до нагружения поверхность может существенно отличаться от нагруженной поверхности. Для упрощения расчетов часто принимают условие, при котором влиянием деформации соседних выступов пренебрегают. Кроме того, применяют замену контакта двух шероховатых поверхностей на контакт гладкой поверхности с поверхностью, имеющую эквивалентную шероховатость, выбор параметров которой не всегда обоснован.

Перспективным считается метод оценки параметров контактного взаимодействия, когда используется не только необходимая информация о сопряженных поверхностях, а принимается во внимание их совместимость. Для достижения цели – получения приемлемых с точки зрения точности результатов расчетов следует использовать компьютерные эксперименты, включающие картографирование двух поверхностей и моделирование их контактного взаимодействия.

2.2. МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Микрогеометрия поверхностей оказывает влияние на процессы контактного взаимодействия и трения при сопряжении двух и более тел, поэтому моделирование инженерных поверхностей с учётом всех видов отклонений от идеального профиля в настоящей работе будет рассматриваться исключительно в контексте их контактного взаимодействия. Для решения задач, связанных с контактным взаимодействием реальных инженерных поверхностей, которые имеют сложное геометрическое строение, необходимо разработать модель поверхности, которая учитывала бы все основные виды отклонений от идеальной геометрии.

Рассмотрим контакт двух поверхностей. Если рассматривать поверхности без макро-отклонений (идеализированные), то в первом приближении контакт поверхностей произойдет по всей площади соприкосновения для конформных тел, и нагрузка будет распределена по всей геометрической площади. Если тела имеют макро-отклонения в виде представленных ранее видов, например, бочкообразность, то контакт возникнет только на вершине выпуклости, и пятно контакта будет тем больше, чем больше радиус кривизны, больше величина нагрузки или меньше твёрдость поверхности. При этом площадь контакта в первом приближении (с учётом пока только макро-отклонения) будет несколько меньше геометрической площади контакта идеальных тел. Следовательно, реальные контактные давления будут больше ожидаемых для идеальных поверхностей, и рост контактного давления будет тем больше, чем больше макро-отклонения по величине. Рассматривая небольшую нагрузку (что соответствует теме настоящей работы), контакт таких поверхностей можно считать упругим, и применяя известные решения Герца для цилиндрического или сферического контакта, можно найти его площадь и контактные давления.

Если углубиться дальше и учесть волнистость на втором уровне, то можно отметить, что контакт поверхностей будет возникать не по всей

площади, найденной на первом этапе, а на вершинах волн, образованных волнистостью, которые располагаются на найденной на первом этапе площади. Таким образом, размер площади контакта снова уменьшится, и уже до контурных пятен, расположенных на площади контакта, образованной макро-отклонениями, что опять приведёт к росту реальных контактных давлений.

Если углубиться ещё дальше и учесть шероховатость, то можно обнаружить, что фактические пятна контакта будут образовываться на вершинах контактирующих микровыступов шероховатости, которые находятся на вершинах волн, которые, в свою очередь, находятся на пятнах контакта, образованных макро-отклонениями сопряжённых поверхностей. Следует отметить, что фактические пятна контакта, как правило, довольно малы, и реальные контактные давления будут значительно выше, чем первоначально ожидаемые для идеальных тел.

Следует сказать, что при больших нагрузках пластические и упругие деформации микронеровностей приближают фактический контакт к номинальному, что снижает влияние шероховатости при расчётах и позволяет с достаточной степенью точности выполнять расчёты с помощью существующих методик и зависимостей. Для малых нагрузок влияние шероховатости возрастает, и применение современных методов расчёта приводит к значительным ошибкам.

Профильные оценки отклонений микрогеометрии реальной поверхности от идеальной согласно ГОСТ 2789-73 широко используются до сих пор благодаря простоте оценки и применения в расчётах, но не учитывают пространственную составляющую геометрии сопряжённых поверхностей и дают очень ненадёжные результаты, особенно для слабонагруженных кинематических пар, прецизионных механизмов, узлов точной механики, оптики и т.д. Трёхмерная профилография проводится согласно ГОСТ Р ИСО 25178, начиная с 2014 года, но применяется в настоящее время довольно редко из-за дороговизны оборудования для проведения трёхмерного исследования

поверхностей, а также из-за отсутствия моделей, методов и способов применения результатов измерений в реальных расчётах. Трёхмерная оценка микрогеометрии поверхностей является на сегодняшний день самой современной и позволяет с высокой точностью оценить микрогеометрию реальных инженерных поверхностей. В настоящей работе будут представлены модели и методы оценки, расчёта и проектирования трёхмерных кинематических пар трения.

Таким образом, предложим следующую **трёхмерную многоуровневую модель** межконтактного зазора (рис. 2.2).

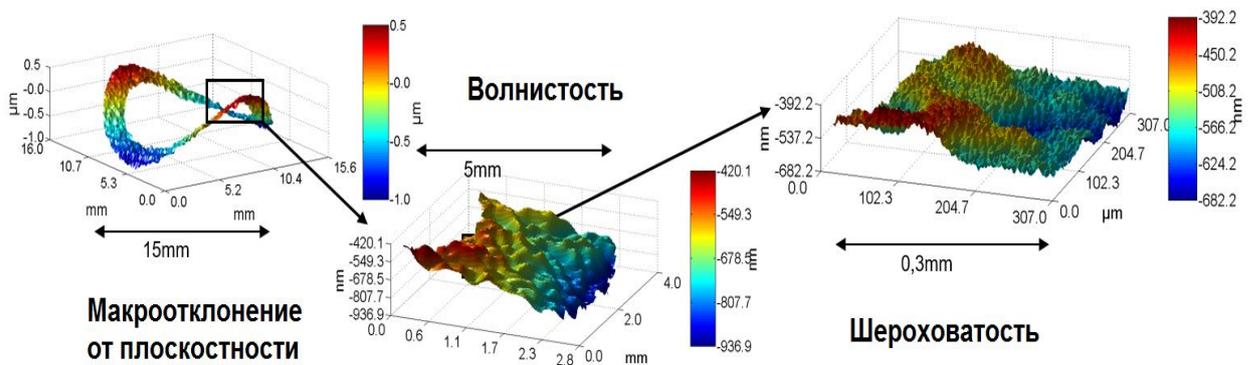


Рис. 2.2. Многоуровневая модель межконтактного зазора

В зависимости от необходимой степени точности при решении конкретной задачи модель предусматривает соответствующее число уровней.

1. На первом уровне моделируем контакт трёхмерных поверхностей, имеющих макро-отклонения. Указанные погрешности поверхностей при упругом взаимодействии приведут к возникновению на номинальной площади контакта контурных пятен непосредственного соприкосновения поверхностей, имеющих макро-отклонения, а во всех остальных местах контакт будет отсутствовать – имеем щель.

2. На втором уровне будем моделировать контактное взаимодействие волнистых поверхностей с учётом их расположения на криволинейных участках исходных поверхностей, которые содержат макро-отклонения. Таким образом, на пятне контакта, найденном на первом уровне,

получим некоторое число контурных пятен контакта с учётом параметров волнистости (шага волн, их высоты, формы, распределения и т.д.). Контакт при этом будет оставаться в упругом состоянии.

3. Третий уровень моделирует контакт шероховатых поверхностей на контурных пятнах контакта, который в зависимости от условий нагружения и физико-механических свойств сопряжённых поверхностей даст фактические пятна контакта в упругом, упругопластическом или пластическом состоянии. Их размер и форма будет определяться шероховатостью поверхности, а число будет зависеть от размеров и числа контурных пятен контакта, найденных на двух предыдущих уровнях. При этом в плоскости контакта будем наблюдать сложную систему микроканалов и полостей, которые обусловлены структурой шероховатого слоя сопряжённых поверхностей. Эта система микроканалов напоминает пористую среду.

При повышении требований к точности оценки контактного взаимодействия можно продолжить увеличивать уровни учёта отклонений от идеальной формы и рассмотреть нанометровый уровень – моделировать субмикрощероховатость и т.д.

Таким образом, получаем сложную многоуровневую трёхмерную модель поверхности, которая состоит из отдельных уровней, на каждом из которых моделируются сами поверхности с учетом рассматриваемых отклонений и процесс их контактирования с определением параметров контакта (площадь пятен, их число, нагрузка на пятно и т.д.). Каждый последующий уровень основывается на результате предыдущего, т.е. выходные данные на предыдущем уровне являются входными данными на последующем этапе. Модели контактного взаимодействия на каждом уровне тоже различны, т.к. взаимодействуют элементы с различной геометрией и свойствами.

Данную модель возможно реализовать только с помощью применения ЭВМ методом моделирования трёхмерных поверхностей и проведением симуляции контактного взаимодействия созданных моделей с помощью

имитационного моделирования. При этом есть несколько преимуществ данного подхода:

1. Оцениваются пятна контакта, которые получаются при фактическом взаимодействии микронеровностей трёхмерных моделей – здесь не применяются никакие аналитические методы фильтрации данных, не используются эмпирические коэффициенты и т.д. Получаем картину контактного взаимодействия, которая соответствует действительности без каких-либо преобразований, усреднений и т.д.
2. Можно получить выборку данных при моделировании нескольких контактных взаимодействий различных моделей, имеющих одну и ту же исходную (заданную) шероховатость. Главным условием при создании трёхмерных моделей должно быть наличие случайной составляющей, что позволит нам каждый раз получать разные поверхности с разным «рисунком» микронеровностей в пределах заданных параметров шероховатости для учёта статистики контактного взаимодействия при оценке разброса параметров.
3. Можно применять не только модели, но и трёхмерные карты реальных поверхностей, полученных после трёхмерного профилографирования на щуповых или оптических приборах.

Для реализации предложенной многоуровневой модели во второй главе настоящей работы нужно решить ряд основных задач:

- 1. Определиться со способом реализации моделей для каждого уровня.*
- 2. Разработать алгоритм создания моделей поверхностей для каждого уровня и процедуру загрузки карт реальных поверхностей после трёхмерного профилографирования.*
- 3. Реализовать все алгоритмы в виде рабочих программ для ЭВМ с целью их практического применения для проектирования трибоузлов.*
- 4. Оценить погрешность моделей в сравнении с реальными образцами*

поверхностей.

- 5. Создать базу данных поверхностей, облегчающую процесс поиска и выбора оптимального сочетания образцов пар трения.*

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКРООТКЛОНЕНИЙ И ВОЛНИСТОСТИ

Для решения контактной задачи взаимодействия инженерных поверхностей, имеющих отклонения трущихся поверхностей от идеальной формы, необходимо получить фактические пятна контакта – такие, какие будут при соприкосновении реальных поверхностей при заданном качестве их обработки. При этом следует учесть случайный фактор распределения пятен контакта, например, при сдвиге поверхностей, их повороте и т.д.

Такую задачу можно решить на ЭВМ с помощью моделирования трёхмерного контакта реальных карт поверхностей, полученных после сканирования небольшого участка поверхности образца. Конечно, сканирование другого участка поверхности образца даст несколько другую картину расположения микронеровностей, но в целом при оценке определённого количества статистически значимой выборки образцов можно получить приемлемые результаты.

Для обработки отсканированных на 3D-профилографе трёхмерных карт в настоящей работе используется собственное, разработанное автором, программное обеспечение. Для разработки программ была выбрана быстрая среда программирования C++ Builder компании Embarcadero RAD Studio. Пример рабочего окна по созданию отдельного модуля отображения 3D карты поверхности представлен на рис. 2.3. В верхней части окна представлено основное меню программы – элементы управления средой разработки приложений. В левой части представлена структура программы, т.е. элементы и модули, из которых состоит программа. В основном это компоненты, которые размещены на форме программы – она представлена по центру. При выделении любого компонента формы внизу слева инспектор объектов отображает свойства выделенного объекта и действия, которые можно

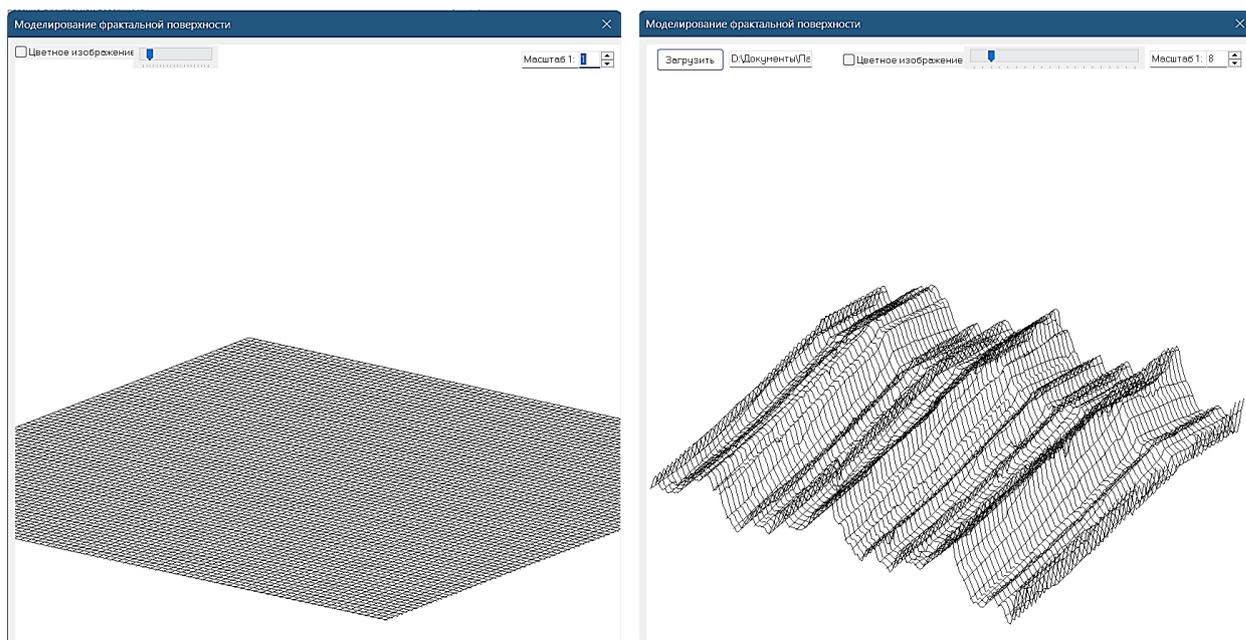


Рис. 2.4. Модуль отображения 3D-поверхности

Точки откладываются по оси X от первой до последней точки в ряду (число точек в ряду, как было отмечено ранее, указывается в заголовке). Следующие точки (в файле они идут непрерывно) будут относиться уже к следующему ряду и т.д. Для правильного чтения файла нужна специальная функция заполнения двумерного массива (из которого делается построение 3D картины) при чтении информации из файла.

С помощью функций преобразования 3D сцены, созданной на канве (любом элементе, который служит для отрисовки 3D картины) которая основана на механизме OpenGL, можно отрисовать точки, загруженные из файла, в том порядке, как они шли при 3D сканировании реальной поверхности, и получить изображение трёхмерной модели (рис. 2.5). Для того, чтобы получить приемлемый вид поверхности, рисуются не точки, а линии, соединяющие точки. При этом мы получим каркасное представление поверхности (можно рисовать только линии по оси X или по оси Y, а можно по обоим осям, получив сеточную модель; также можно пропускать часть линий, регулируя тем самым плотность рисунка). Более того, можно соединять точки не линиями, а полигонами в виде треугольников, которые градиентно окрашиваются в соответствии с высотой точки (например, самая высокая

точка – желтая, самая низкая – синяя, а между ними остальные цвета в формате RGB как при отображении высот в картографии).

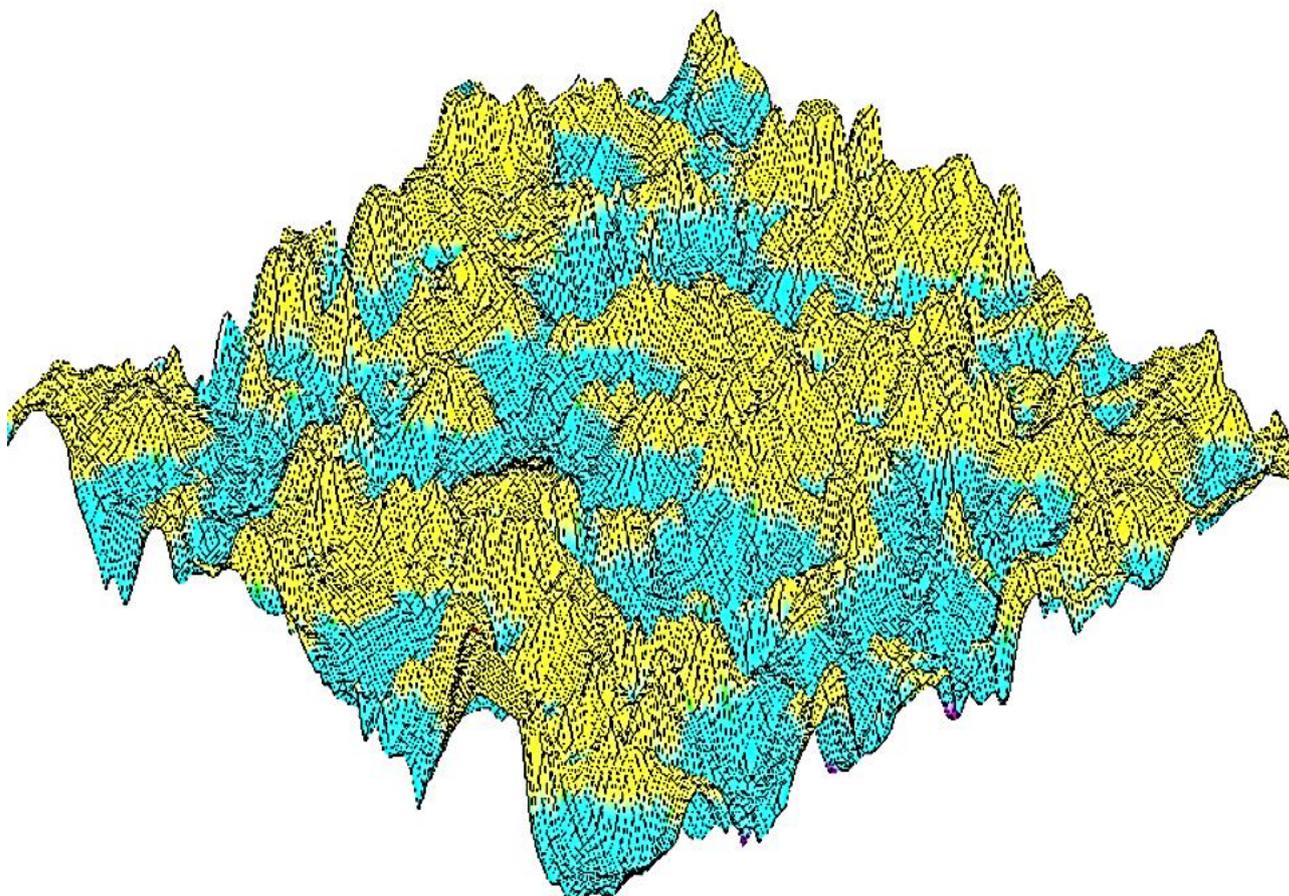


Рис. 2.5. Твёрдотельная модель 3D-поверхности

2.3.1. Моделирование макро-отклонений

Для воспроизведения макро-отклонения используем исходный массив точек, который содержит высоты точек будущей карты. Первоначально массив содержит нули, представляющий идеальную плоскость. Предположим, что нам нужно построить макро-отклонение от плоскости в виде вогнутости по одной оси (например, по оси X) с величиной отклонения 10% по высоте в сравнении с размером этой модели. Разработанная автором в рамках настоящей работы программа в согласии с исходными условиями найдёт радиус изогнутости профиля (например, для размера модели 257 точек по осям X и Y это будет радиус $R = 1654,1$) и приподнимет края плоскости на величину $h = (257 / 2) \cdot 0,1$ в согласии с преобразованным для этого случая уравнением

окружности:

$$Z = R - \sqrt{R^2 - (i - 129)^2}$$

Таким образом, мы получим вогнутую поверхности как на рис. 2.6.

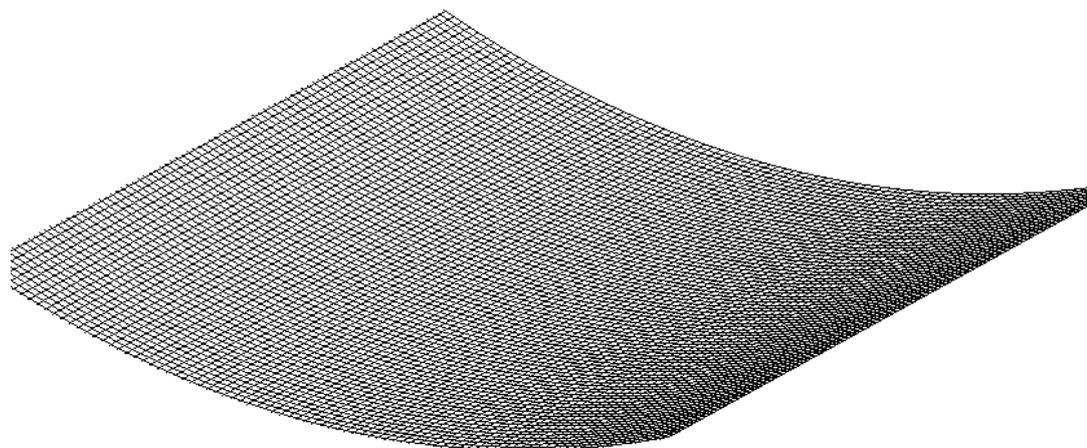


Рис. 2.6. Моделирование вогнутости 3D-поверхности

Следует сказать, что размер моделируемого участка при реализации макро-отклонений будет равен номинальной площади моделируемого элемента – например, опоры трения. При реальном размере этой опоры 257 мм и при числе точек модели построения 257 шаг между точками будет 1 мм. Если необходимо построить более точную модель, число её точек можно увеличить, например, до 7681, что будет соответствовать шагу между точками 0,03 мм, что для макромоделей более чем достаточно. Построение на современных компьютерах таких моделей, например, на процессоре 13 поколения Intel i5-13400, занимает около 3 секунд, что позволяет применять их в реальных условиях.

Таким образом, разработан алгоритм и программное обеспечение для создания моделей трёхмерных поверхностей, содержащих макро-отклонения с учётом случайной фазы (реализуется функцией $\text{random}(\delta)$) в заданных пределах δ . При этом реализована возможность выбора формы исходного узла трения (плоскость, сфера, цилиндр, конус), на которую можно наложить макро-отклонения.

2.3.2. Моделирование волнистости

Как говорилось ранее, волнистость реализуется на следующем уровне после макро-отклонений, поэтому нужно отметить, что реальный размер участка воспроизведения волнистой поверхности будет определяться участком контакта поверхностей, воспроизведённых на первом уровне при моделировании макро-отклонений пар трения с номинальными размерами.

На первом этапе настоящей работы модель волнистой поверхности была реализована для профиля в виде периодических выступов окружностей заданного радиуса, но расположенных на разной высоте (рис. 2.7). При этом можно менять радиус кривизны волны (а также задавать разброс значений между радиусом кривизны самой малой волны и самой большой), их число, а также ширину площадки контакта для цилиндрической аналогии волн. При этом рассматривалась задача контакта волнистой поверхности с эквивалентными параметрами с гладкой.

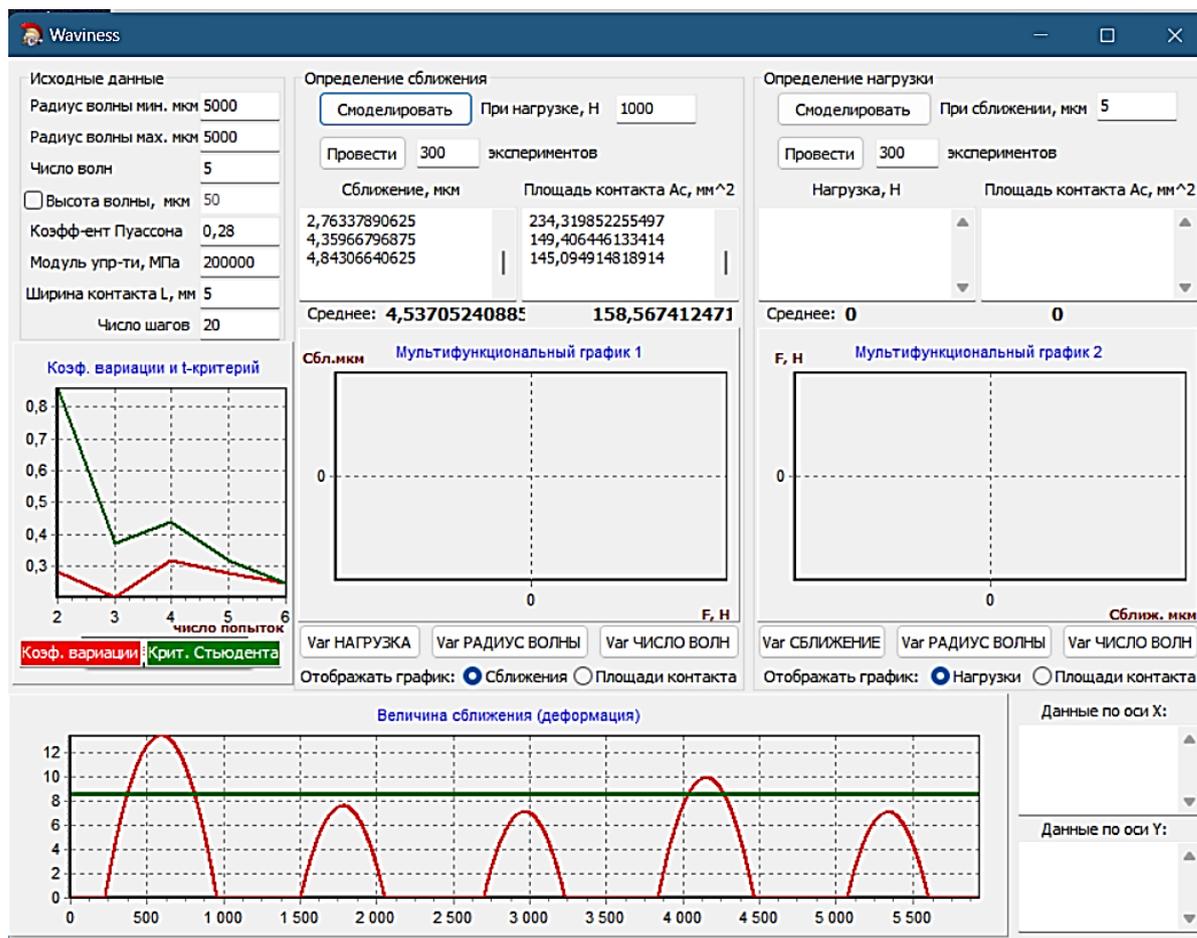


Рисунок 2.7. Модель профиля волнистой поверхности

Для создания более реалистичной модели был разработан алгоритм, по которому профиль волны строится с помощью сплайнов таким образом, что начало последующего участка сплайна является конечной точкой сплайна предыдущего (рис. 2.8).

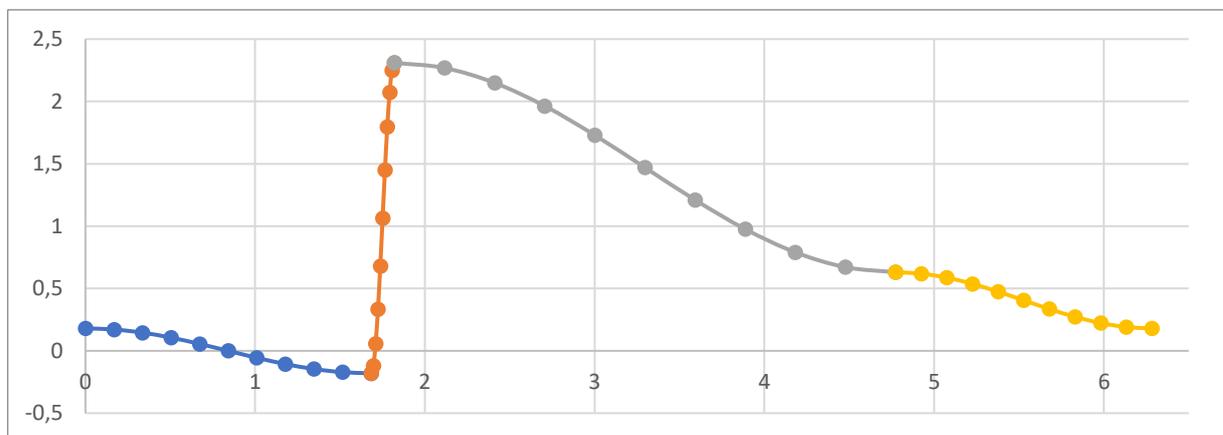


Рисунок 2.8. Построение профиля волны сплайнами

Сплайн строится по косинусоидальному закону на длине, которая выбирается случайным образом по заданным условиям (шаг между волнами). Исходными данными для построения 3D - волнистой поверхности являются:

- общая длина участка;
- вид волнистости – в ортогональной системе координат или в полярной;
- число волн в соответствующих направлениях по осям или шаг волны;
- амплитуда волны в соответствующих направлениях.

Возрастающие и убывающие участки сплайнов соединяются таким образом, чтобы обеспечить заданные условия по числу волн и их высоте. К тому же, если рассматривать 3D-моделирование волны в осесимметричном уплотнении в полярных координатах, нужно учесть, что начало первого участка, должно быть концом последнего, чтобы поверхность замкнулась в кольцо. Моделируя волны одновременно в двух направлениях по осям X и Y в ортогональной системе координат (3D), можно получить волнистые поверхности с любыми геометрическими характеристиками (рис. 2.9). Модели волнистых поверхностей, построенные в ортогональной и полярной системах координат представлены на рис. 2.10.

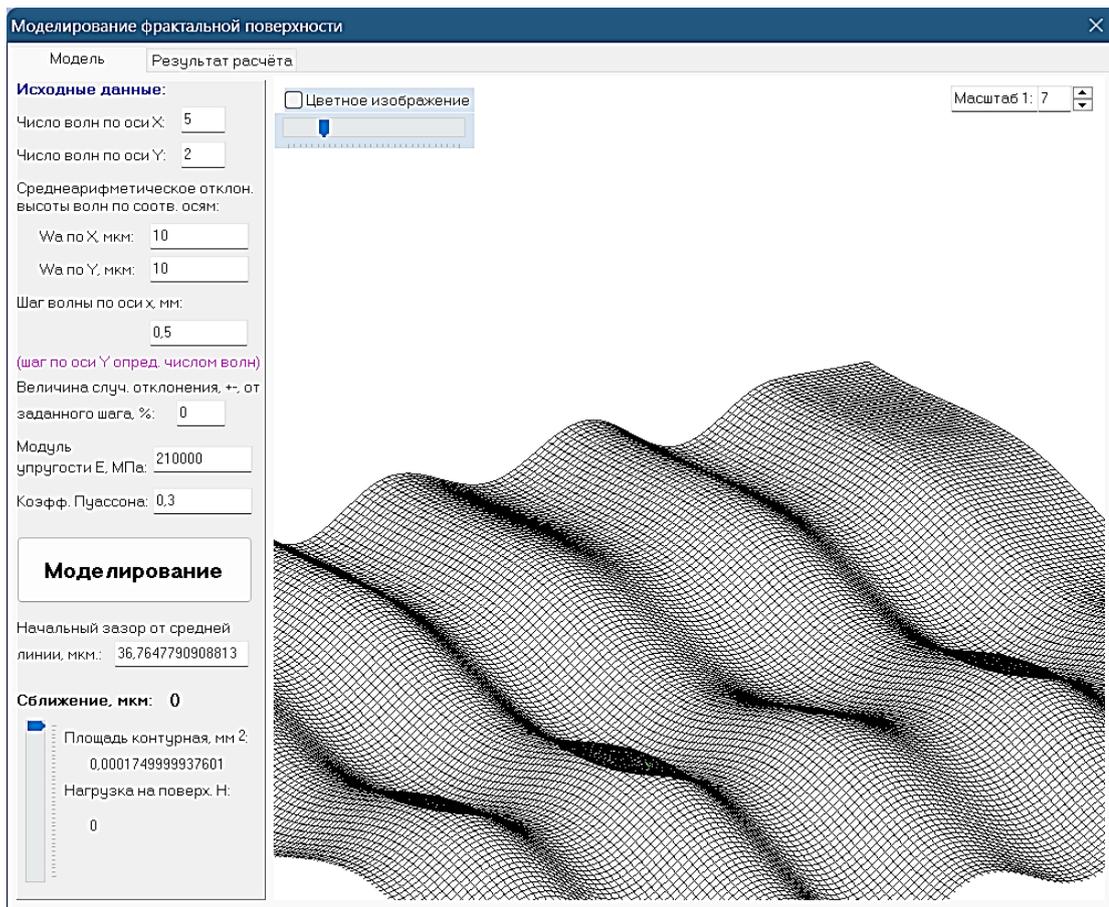


Рисунок 2.9. Моделирование волнистой поверхности

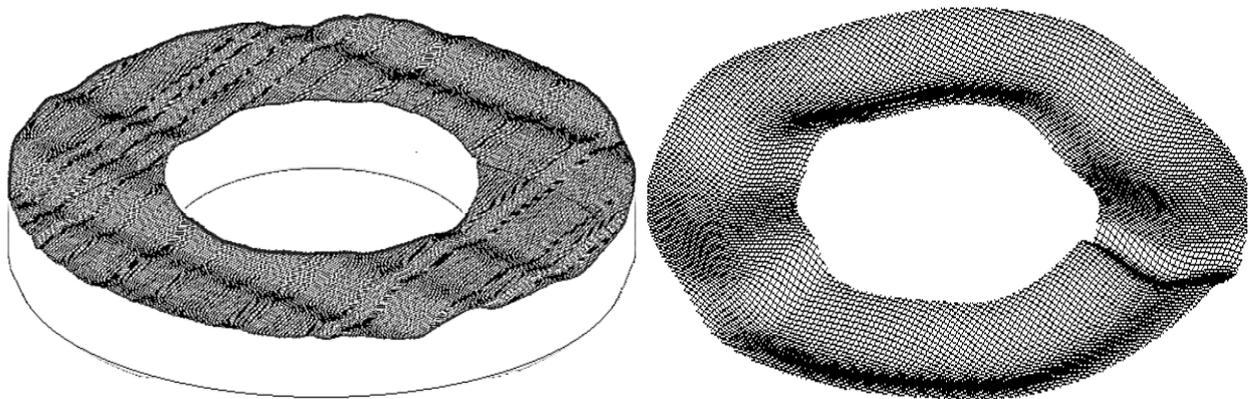


Рис. 2.10. Модели волнистых поверхностей, построенные в ортогональной и полярной системах координат

Реализация волнистости для осесимметричных устройств проводится не на отдельном участке, а моделируется всё уплотнение целиком, включая макро-отклонения. Построение модели происходит в полярной системе

координат по углу расположения точки и её окружности (или радиусу). Контакт таких волнистых поверхностей даёт более детальную информацию о контурных площадках контакта, их реальных размерах и величине щелей, образованных деформацией волн при их сближении.

Таким образом, разработан алгоритм и соответствующие программы, позволяющие с учётом случайной составляющей моделировать трёхмерные поверхности при наличии волнистости по заданным параметрам.

2.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Реальная поверхность состоит из большого числа наложенных друг на друга шероховатостей разных масштабов длин (рис. 2.11). Отклонение поверхности $z(x, y)$ от срединной поверхности $z(x, y) = 0$ считается случайным процессом, который характеризуется такими статистическими параметрами, как среднеквадратическое отклонение высоты профиля Rq , наклона, кривизны и т.д.

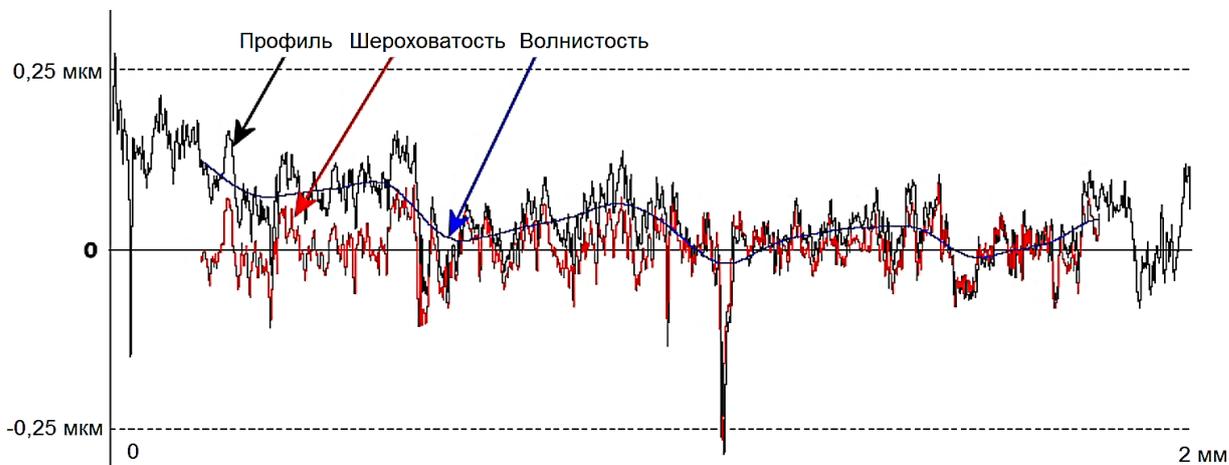


Рис. 2.11. Наложение шероховатостей с разным масштабом

Из-за многомасштабной природы поверхности среднеквадратические значения указанных параметров значительно зависят от разрешающей способности измерительного прибора и от длины статистической выборки. Зависимость всех этих параметров от увеличения масштаба и пространственного разрешения показана на рис. 2.12 [75].

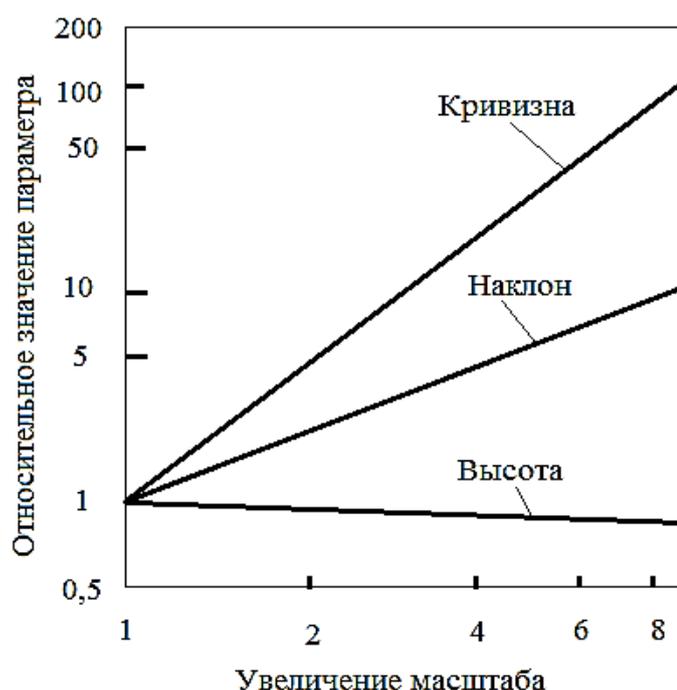


Рис. 2.12. Масштабная зависимость статистических параметров (масштаб 1 соответствует разрешающей способности измерительного прибора 4 мкм, масштаб 10 — 0,4 мкм)

Масштабная зависимость означает, что приборы с различной разрешающей способностью и длиной сканирования дают разные значения этих статистических параметров для одной и той же поверхности. Поэтому моделирование, основанное на этих параметрах, может привести к неоднозначным результатам для пары взаимодействующих шероховатых поверхностей. Необходимые параметры шероховатости инженерной поверхности определяют, как правило, с помощью анализа профилограмм, включая статистическую обработку результатов. Важно отметить, что сама профилограмма как случайный процесс представляет собой отфильтрованную функцию, отличающуюся от первичного профиля. Степень отличия зависит от радиуса иглы, ощупывающей поверхность. На рис. 2.13 представлены профилограммы, полученные при разных радиусах иглы щупа [3]. Анализ результатов записи профиля показал, что с увеличением радиуса сферического щупа уменьшается его проникающая способность. Поэтому происходит, так

сказать, недоощупывание профиля, что уменьшает получаемые значения высотных параметров на 10-20 %. Шаговые параметры профиля, например средний шаг неровностей R_{Sm} , искажаются незначительно.

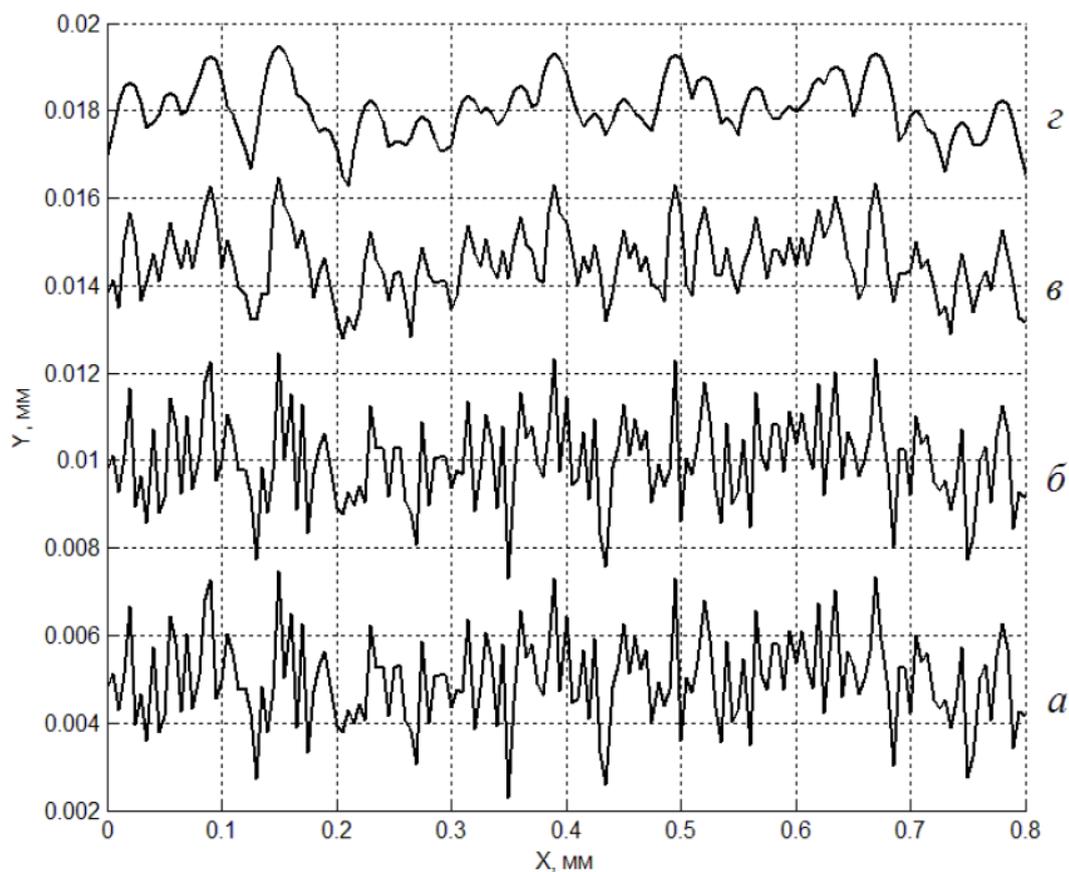


Рис. 2.13. Профилограммы одного и того же профиля, полученные с разным радиусом иглы: *а* – исходный профиль; *б* – радиус 5 мкм; *в* – радиус 20 мкм; *г* – радиус 100 мкм

Проведенные исследования позволили авторам [3] сделать вывод, что измерение шероховатости с применением координатно-измерительных приборов дает положительный результат при использовании сферических щупов диаметром 0,01 - 0,03 мм.

Как видно из рис. 2.13, наиболее существенно при грубой фильтрации (с увеличением радиуса иглы) изменяется (увеличивается) радиус верхней части пика неровностей. При этом точность оценок параметров контактного взаимодействия снижается. Поэтому очень важно знать параметры первичной поверхности, которая представляет собой фрактальный объект. *Использование*

фрактальных представлений (моделей) позволяет более корректно описать механизмы контактного взаимодействия шероховатых поверхностей для распространенных пар трения.

Фрактальная характеристика шероховатой поверхности не зависит от масштаба и обеспечивает информацию о структуре шероховатости всех масштабов длины, обладающей фрактальными свойствами. Профиль поверхности обладает свойствами непрерывности, недифференцируемости и самоаффинности. Недифференцируемость связана с тем, что невозможно провести в любой точке профиля касательную, так как в этой точке будут возникать все больше деталей шероховатости. Статистическая самоаффинность обусловлена сходством вида профиля при различных увеличениях (рис. 2.14).

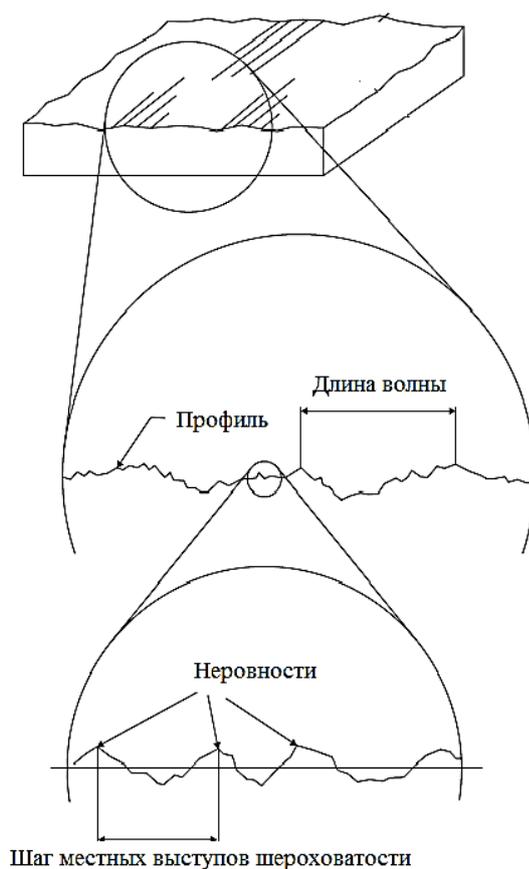


Рис. 2.14. Самоаффинность профиля

Поэтому фрактальный объект (кривая) обладает свойством самоподобия: любой участок кривой имеет ту же фрактальную размерность,

что и вся кривая, и применение фрактальной геометрии при моделировании контактного взаимодействия шероховатых поверхностей оправдано.

2.4.1. Моделирование фрактальных поверхностей

Все существующие в настоящее время трёхмерные модели дают большую погрешность при моделировании трёхмерной поверхности случайным набором выступов с определёнными характеристиками, например, конусами, сферами и т.д. (рис. 2.15.).

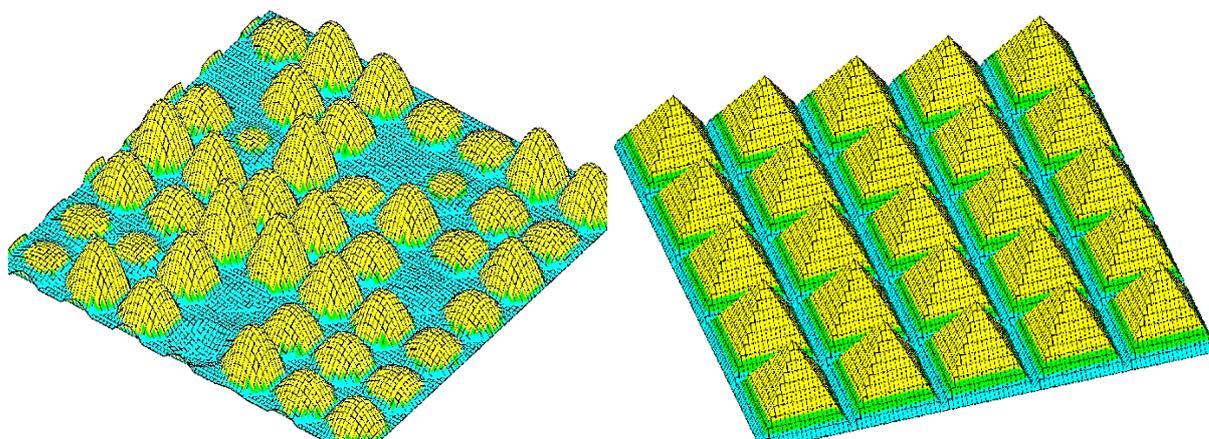


Рис. 2.15. Классические модели поверхностей

Погрешность моделей можно оценить, сравнив такую важную характеристику шероховатой поверхности, как опорную кривую профиля. Она характеризует состояние контакта поверхностей при приложении нагрузки, т.е. контактную жёсткость системы. На рис. 2.16 показано сравнение опорной кривой модели, состоящей из сфер разных размеров по высоте, с опорной кривой реальной поверхности, полученной электроэрозией. Очевидно, что механические свойства представленных поверхностей совершенно разные.

В настоящей работе предлагается использовать фрактальные модели шероховатых поверхностей, которые дают максимальное сходство модели с реальной поверхностью и минимальную погрешность при расчётах. При этом в основном рассматриваются модели и поверхности в трёхмерном масштабе, а двухмерные профили даются как сравнение и переход к двухмерным

стандартам, которые всё ещё действуют как основные.

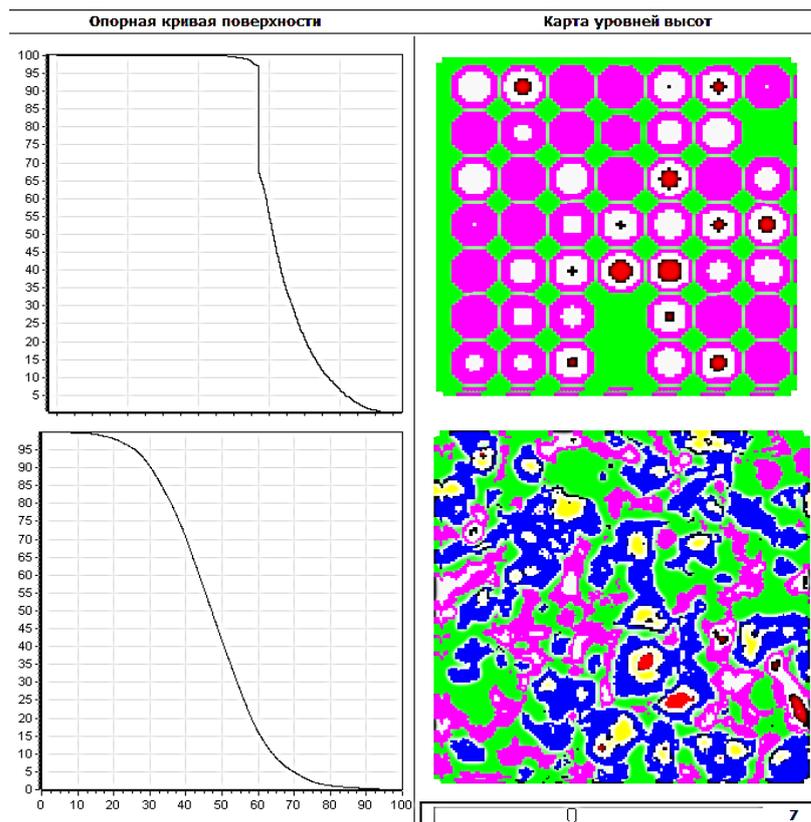


Рис. 2.16. Опорные кривые модели (вверху) и реальной поверхности

Рассмотрим способы и алгоритмы, с помощью которых можно получить профили и трёхмерные модели фрактальных поверхностей. Из множества методов моделирования фрактальных рядов и поверхностей можно выделить три основных метода, позволяющих моделировать трёхмерные карты поверхностей: метод преобразования (фильтрации) Фурье, метод серединного смещения (или метод случайного сложения) и метод моделирования поверхности по двухпараметрической функции Вейерштрасса - Мандельброта.

Метод фильтрации Фурье чаще используется для обработки одномерных рядов, а также может быть использован для моделирования анизотропных трёхмерных карт поверхностей, но для практического применения он не очень хорош, так как построенные с помощью этого метода поверхности имеют совершенно случайную форму, а также не выявлено каких-либо возможностей изменять точность построения, или его масштаб

[28], в следствии чего этот метод рассматриваться не будет.

Метод серединного смещения (случайного сложения) применим как для моделирования профиля поверхности по исходным данным, так и для моделирования трёхмерной карты поверхности. Он легко реализуется на ЭВМ и способен генерировать трёхмерные карты поверхности по исходным данным с учётом фрактальной размерности и высотных параметров.

Алгоритм моделирования профиля поверхности выполняется в следующей последовательности.

1. Зададим длину участка профиля в точках построения M и обнулیم все точки высот в этой последовательности. Получим одномерный массив длиной M , заполненный нулями, т.е. прямую линию. Число точек в массиве должно быть нечётным.
2. Фиксируем точки на границах участка, т.е. в первой и последней точке. Под «фиксированием» понимаем задание этим точкам начальных значений, которые соответствуют граничным условиям с учётом макро-отклонений и волнистости. Теоретически это могут быть нулевые значения для ровной поверхности.
3. Определяем высоту точки в середине нашего отрезка по формуле:

$$Z_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(Z_0 + Z_1) + \frac{1}{2^{nH}} \sigma \cdot \rho \cdot g,$$

где n – номер уровня смещения; σ – масштаб по высоте Z ; g – случайная величина, имеющая нормальное распределение с математическим ожиданием, равным 0 и дисперсией, равной 1; H – показатель Хёрста (связан с фрактальной размерностью Хаусдорфа-Безиковича формулой $D = 2 - H$); ρ - параметр уменьшения дисперсии $\rho = \sqrt{1 - 2^{2H-2}}$.

4. На последующих этапах алгоритм повторяется, а количество средних точек, где определяем высоту участка профиля, каждый раз увеличивается вдвое (рис. 2.17).

В результате получаем массив, где хранятся координаты Z точек профиля поверхности, идущие друг за другом. Чем больше уровней

моделирования мы проведём, тем больше будет количество точек в массиве и меньше будет фактическое расстояния между точками по оси X (масштаб по горизонтали), т.е. тем больше будет детализация модели.

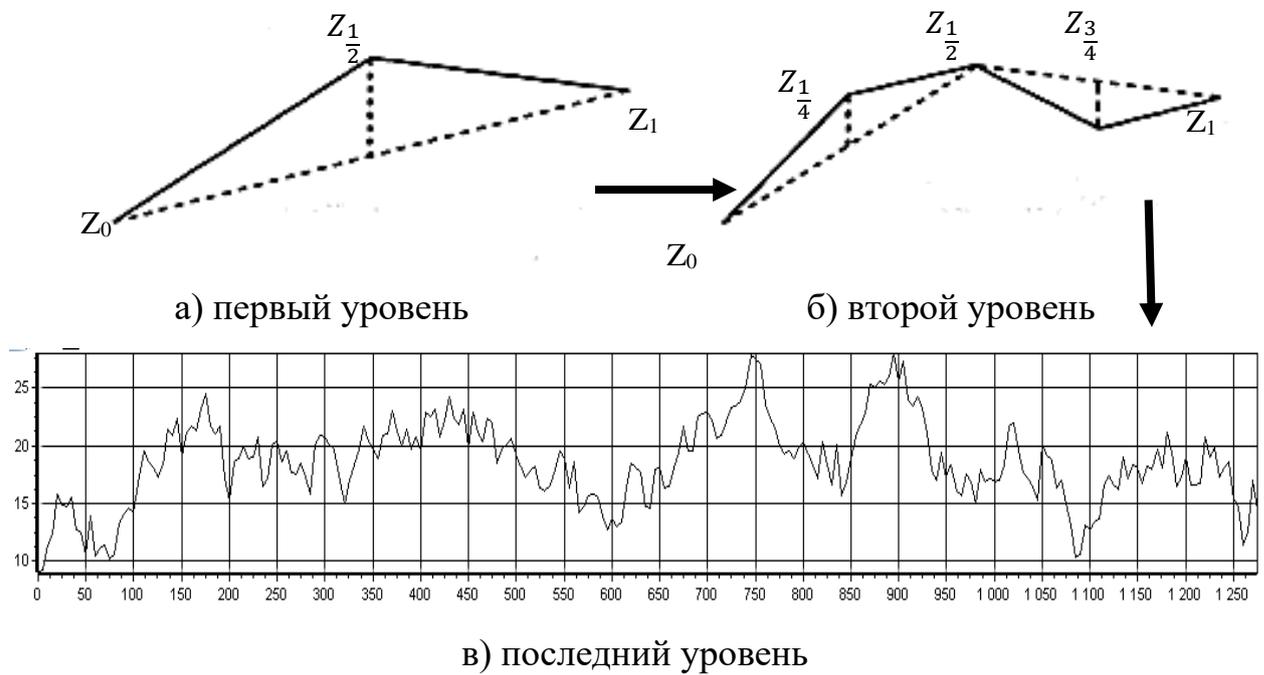


Рис. 2.17. Построение фрактальной кривой:

Применительно к модели поверхности метод срединного смещения требует некоторой корректировки. В начале задаём область – двумерный массив размером $M \times N$, где M и N – размеры прямоугольника, или участка будущей поверхности. Подразумевается, что участок поверхности квадратный, т.е. $M = N$. Также, как и для профиля, обнуляем массив, и фиксируем точки по границам участка, но уже в четырёх угловых точках. Для ровной поверхности высоту в этих точках принимаем равным 0, а для поверхностей, имеющих макро-отклонения или волнистость, можно задать граничные условия. Точки в середине участка определяются по уже представленному выше алгоритму, за исключением того, что середина берётся как среднее уже четырёх точек:

$$Z_G = \frac{1}{4} (Z_A + Z_B + Z_E + Z_F) + \frac{1}{2^{nH}} \sigma \cdot \rho \cdot g$$

Данный алгоритм является модифицированным методом срединного

смещения, который предложил Р.Ф. Фосс [136], назвав его алгоритмом *последовательного случайного сложения* (рис. 2.18).

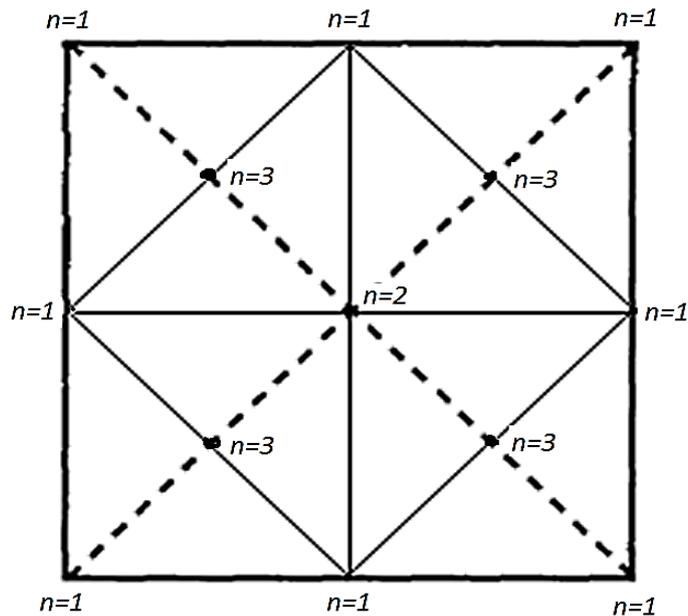


Рис. 2.18. К методу Фосса

Как показал Фосс, этот процесс приводит к самоаффинным кривым, фрактальная размерность которых равна $D = 2 - H$. Он показал также, что *заполненность* получаемых фрактальных поверхностей можно контролировать с помощью регулирования параметра уменьшения дисперсии δ . На рис. 2.18 на первом этапе моделирования, который обозначен на рисунке как $n = 1$, задаются значения высот в 8 точках согласно граничным условиям, а на втором этапе находится только одна точка в центре по результатам сложения высот в 4-х точках на серединах сторон и случайного смещения.

После каждого цикла (кроме первого) этот алгоритм удваивает число точек, в которых задано возвышение, и уменьшает на $r = 1/\sqrt{2}$ расстояние между такими точками. В результате, варьируя фрактальной размерностью, размерами площадки, точностью построения и величиной наполнения профиля, можно получить поверхности с разной шероховатостью, очень похожие на реальные поверхности (рис.2.19). Увеличение числа уровней моделирования увеличивает точность построения модели (т.е. её детализацию), но при этом невозможно управлять масштабом карты, т.е.

невозможно построить модель, содержащую, например, не 9 основных выступов, а, например, 40 выступов, что является ограничением этого метода.

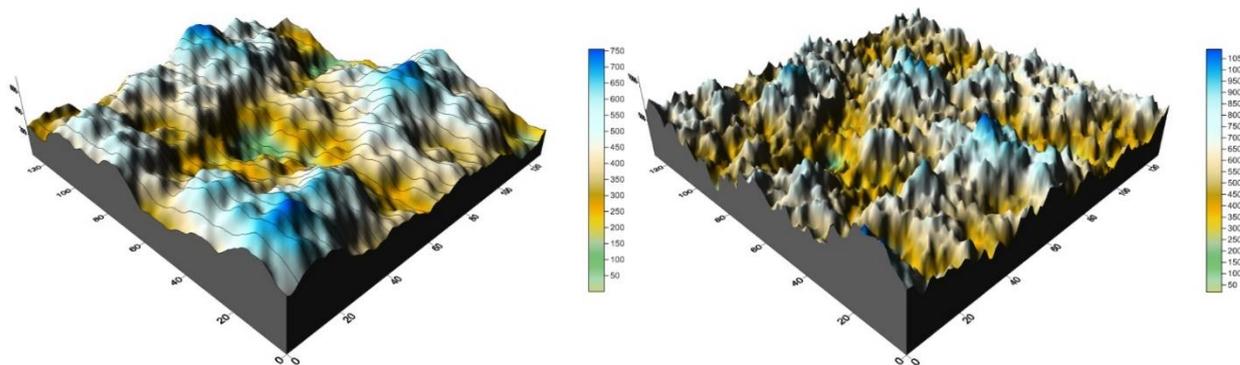


Рис. 2.19. Карты поверхностей с разной шероховатостью (по Фоссу)

Из-за особенностей алгоритма, а именно из-за малого числа начальных точек, принадлежащих первому поколению при сложении, мы получаем карту поверхности с высокой точностью, но на малом участке, где будет присутствовать небольшое количество выступов, что затрудняет применение этого алгоритма при решении контактных задач невозможностью управления фактическим размером моделируемой карты.

Для решения этой проблемы достаточно увеличить количество исходных точек, принадлежащих к первому поколению при сложении (точек без уменьшенной дисперсии), т.е. за начальные точки взять не только четыре по углам, а сразу все точки, относящиеся к поколениям от первого до, например, четвёртого, с учётом начальных (граничных) условий, что увеличит масштаб карты в 4 раза, примерно во столько же раз увеличит число микровыступов, но при этом снизит детализацию модели. Пропорциональное увеличение размера массива, отводимого под хранение точек высот поверхности, позволяет одновременно увеличить, например, в 4 раза размер карты, и сохранить детализацию поверхности.

Моделирование профиля с помощью функции Вейерштрасса-Мандельброта возможно с помощью одноимённой функции в следующем виде [136]:

$$f(x) = \sum_{\omega=-\infty}^{+\infty} \frac{(1 - e^{i\gamma^\omega x})e^{i\varphi_\omega}}{\gamma^{(2-D)\omega}}$$

Здесь $f(x)$ – масштабно-инвариантная фрактальная функция, непрерывная и не дифференцируемая ни в одной точке, ω – индекс частоты, принадлежащий интервалу $[-\infty; \infty]$; x – вещественная переменная, соответствующая координате по оси X , γ – параметр, который определяет, какая часть фрактальной кривой видна, когда переменная x изменяется в заданном интервале; D – параметр фрактальной размерности, или фрактальная размерность кривой, $1 < D < 2$; φ_ω – произвольная фаза, соответствующая каждой своей частоте.

Для практического применения при построении фрактальных кривых удобно использовать косинусную фрактальную функцию Вейерштрасса-Мандельброта, составляющую действительную часть выше представленной функции [136]:

$$f(x) = \sum_{\omega=-\infty}^{+\infty} \frac{(1 - \cos \gamma^\omega x)}{\gamma^{(2-D)\omega}}$$

При этом рекомендуют [178] параметр γ брать равным 1.5, а индекс частоты ω должен принимать конечные значения. Обычно самую низкую частоту принимают равным нулю ($\omega_{min} = 0$), а верхнюю ω_{max} определяют как [75]

$$\omega_{max} = \text{int} \left[\frac{\lg(1/L)}{\lg \gamma} \right].$$

Здесь L – длина моделируемой кривой, которая равна числу моделируемых точек x .

Двухпараметрическая функция Вейерштрасса-Мандельброта позволяет провести построение мульти-фрактального объекта, который в нашем случае является фрактальной поверхностью. Главной особенностью функции Вейерштрасса-Мандельброта является то, что она непрерывна и не дифференцируема ни в одной своей точке, поэтому широко используется для

построения нерегулярных структур в виде

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

Здесь M и N – количество гребней во взаимно-перпендикулярных направлениях, для анизотропной поверхности $M \neq N$; L – длина моделируемой кривой; частотный параметр γ определяет плотность частотных составляющих, рекомендуют принимать $\gamma = 1.5$, т.к. при крайних значениях 1 или 2 профиль перестаёт быть случайным; D_s – фрактальная размерность моделируемой 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, равный согласно [188]

$$G = \left(\frac{4(2 - D)}{\frac{1}{\omega_{max}^{2(2-D)}} - \frac{1}{\omega_{min}^{2(2-D)}}} \right)^{\frac{1}{2(D-1)}}$$

Здесь ω – частота.

Используя двухпараметрическую функцию Вейерштрасса-Мандельброта, представляется возможным смоделировать трёхмерную карту шероховатой поверхности с практически любой геометрической характеристикой. Данная функция содержит в себе как случайную структуру, так и детерминированную составляющую, отражая особенности разных инженерных поверхностей.

Учесть важные особенности структуры поверхности можно с помощью коэффициентов, входящих в функцию Вейерштрасса-Мандельброта. Например, варьируя число гребней N и M , можно регулировать частоту увеличения и уменьшения профиля шероховатости по двум взаимно-перпендикулярным осям в плоскости построения трёхмерной карты

шероховатой поверхности, тем самым моделировать эффект режима обработки, например, точение. Подбирая длину участка L , можно регулировать масштаб построения, и при больших значениях получим площадку с большим масштабом, но с меньшей детализацией (с меньшим увеличением). Параметр фрактальной размерности D определяет в нашем случае персистентность профиля, т.е. регулярность появления шероховатых выступов и впадин. При малых значениях фрактальной размерности поверхности, например, $D = 2,1 \dots 2,3$ получим довольно гладкую поверхность, которую можно получить некоторыми видами обработки инженерных поверхностей, например, выглаживанием или поверхностно-пластическим деформированием, которые могут сглаживать отдельные микронеровности, но при этом оставляют несколько выступающие холмы, что не даёт оптимальную фактическую площадь контакта. При значениях фрактальной размерности поверхности, близкой к $D = 2.5$, получим несколько более шероховатую и изрезанную поверхность, которую дают большинство видов механической обработки поверхностей – шлифование, фрезерование, точение и т.д. Фрактальная размерность с большими значениями, например, $D = 2.7 \dots 2,9$ даёт сильно изрезанные поверхности, соответствующие поверхностям разлома деталей машин. Пример построенных шероховатых поверхностей с разными параметрами по функции Вейерштрасса – Мандельброта представлен на рис. 2.20. Здесь присутствуют карты реальных поверхностей, полученных щуповым методом сканирования на трёхкоординатном профилографе - профилометре Tlysurf-6, а также карты моделей поверхностей, сгенерированных по функции Вейерштрасса – Мандельброта в программе, разработанной автором в среде программирования Embarcadero Rad Studio.

Для получения более реалистичных карт трёхмерных поверхностей функция Вейерштрасса – Мандельброта модифицируется разными авторами. Например, проф. Потапов А.А. [99] предлагает следующую двухмерную диапазонно-ограниченную функцию Вейерштрасса:

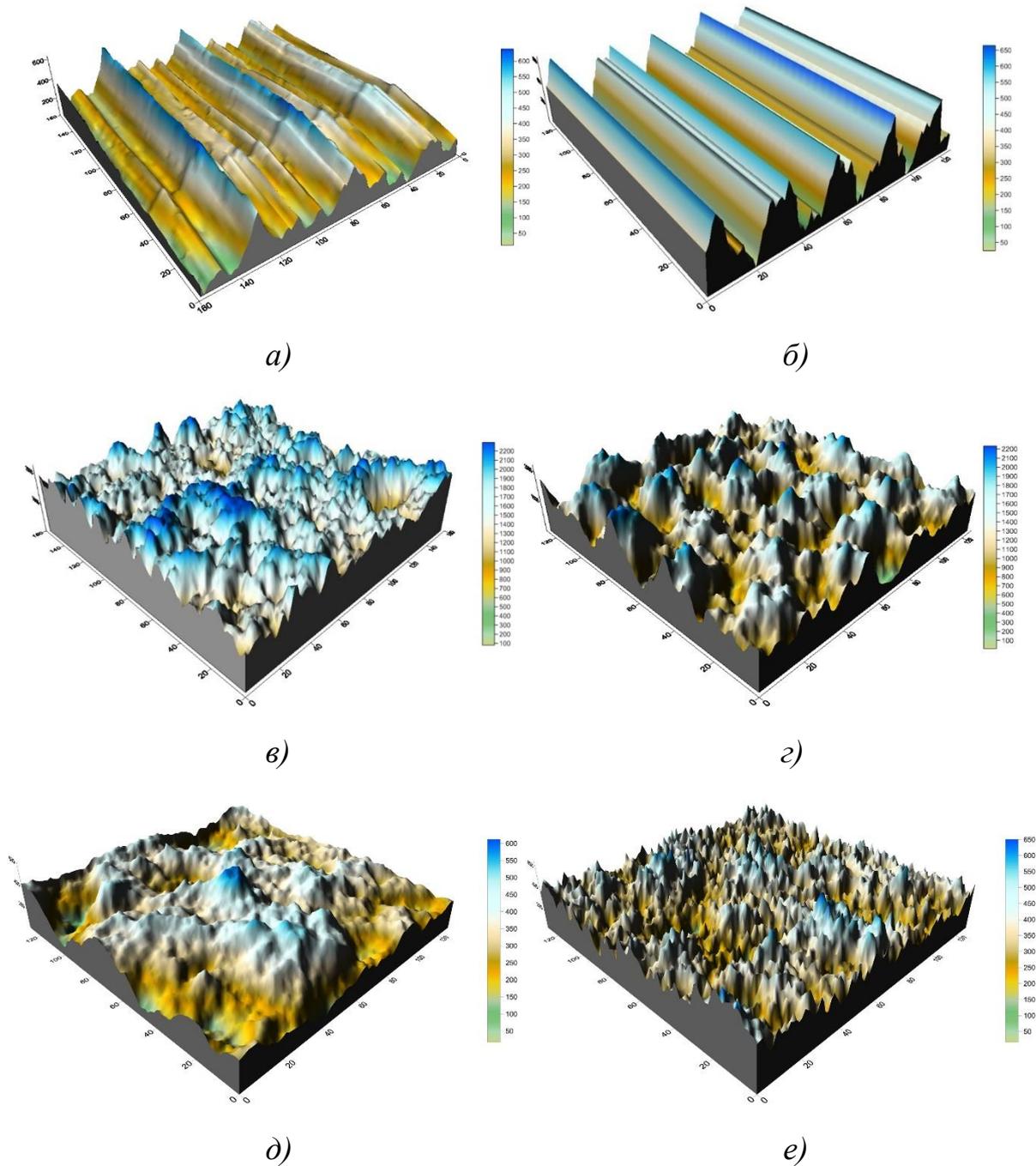


Рис. 2.20. Трёхмерные карты поверхностей: *a, в* – реальные поверхности (точение и электроэрозия); *б, г* – их модели (по Вейерштрассу); *д* и *е* – модели (по Вейерштрассу) с $D = 2.2$ и $D = 2.8$ соответственно

$$Z(x, y) = c_z \sum_{n=0}^{N-1} q^{(D-3)n} \sum_{m=1}^M \sin \left\{ Kq^n \left[x \cos \left(\frac{2\pi m}{M} \right) + y \sin \left(\frac{2\pi m}{M} \right) \right] + \theta_{nm} \right\},$$

где c_z – сомножитель; q – параметр пространственно-частотного масштабирования, $q > 1$; D – фрактальная размерность ($2 < D < 3$); N, M – число

гармоник; K – основное пространственное волновое число; θ_{nm} – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале $[-\pi, +\pi]$.

Сомножитель c_z определяется из соотношения

$$c_z = \left[\frac{2(1 - q^{2(D-3)})}{M(1 - q^{2(D-3)N})} \right]^{1/2}.$$

Данная функция является комбинацией случайной структуры и детерминированного периода. Она анизотропна в двух направлениях, если числа гармоник N и M не очень велики, имеет производные и в то же время – самоподобна. Поверхность на ее основе имеет много масштабов, а шероховатость может изменяться в зависимости от заданных значений. Предложенная функция является хорошим приближением для описания естественных поверхностей, так как естественные поверхности не являются чисто случайными или чисто периодическими и часто анизотропны. Важно отметить, что эта функция описывает математические фракталы только при стремлении M и N к бесконечности.

Таким образом, с помощью фрактальной геометрии удаётся смоделировать шероховатые поверхности, очень напоминающие реальные.

2.5. АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Визуальная схожесть трёхмерных фрактальных компьютерных моделей с реальными инженерными поверхностями не даёт основания считать адекватным замену реальной поверхности на модель. Важным является обоснование, насколько модель поверхности является адекватной реальной поверхности. Для оценки адекватности моделей реальным инженерным поверхностям предложим несколько критериев сравнения модели поверхности с оригиналом. На рис. 2.21 представлена реальная поверхность и её фрактальная модель. Сравнение спектральной плотности реальной поверхности и модели является одним из оснований для обоснования реальной поверхности и её модели.

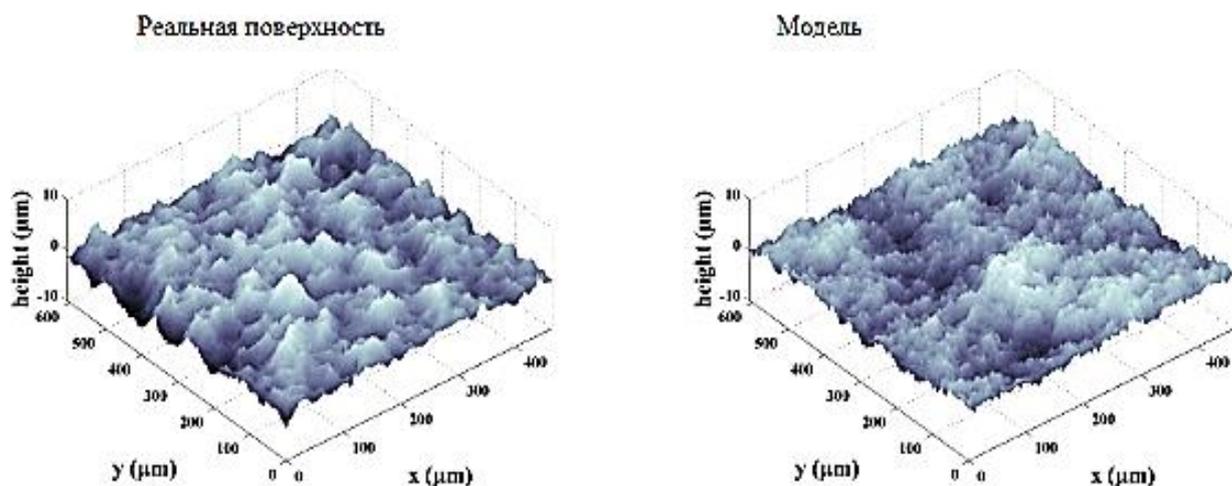


Рис. 2.21. Реальная инженерная поверхность и её фрактальная модель

Данную процедуру удобно выполнять в прикладном программном пакете, позволяющем обрабатывать статистические данные в виде рядов и массивов, например, программный пакет SPSS Statistics v24 фирмы IBM. Для этого необходимо создать новый документ и загрузить туда двумерный массив высот профиля поверхности, т.е. саму карту. Тогда функция спектра мощности плотности будет иметь обратную степенную зависимость от частоты:

$$P(\omega) = C_P \frac{1}{\omega^S},$$

где $P(\omega)$ – функция спектра мощности, м^3 ; ω – частота, м^{-1} ; C_P – некоторая константа; S – тангенс угла наклона средней линии функции спектра мощности. Отложенная в логарифмических координатах эта зависимость становится линейной. При этом по углу наклона средней линии графика спектральной плотности можно найти и фрактальную размерность исследуемой поверхности.

На рис. 2.22 представлены графики спектральной плотности реальной поверхности и её модели в логарифмических координатах. Анализ спектральной плотности реальной поверхности и модели показал хорошую сходимость – фрактальная размерность модели $D = 2.36$, а реальной поверхности $D = 2.37$.

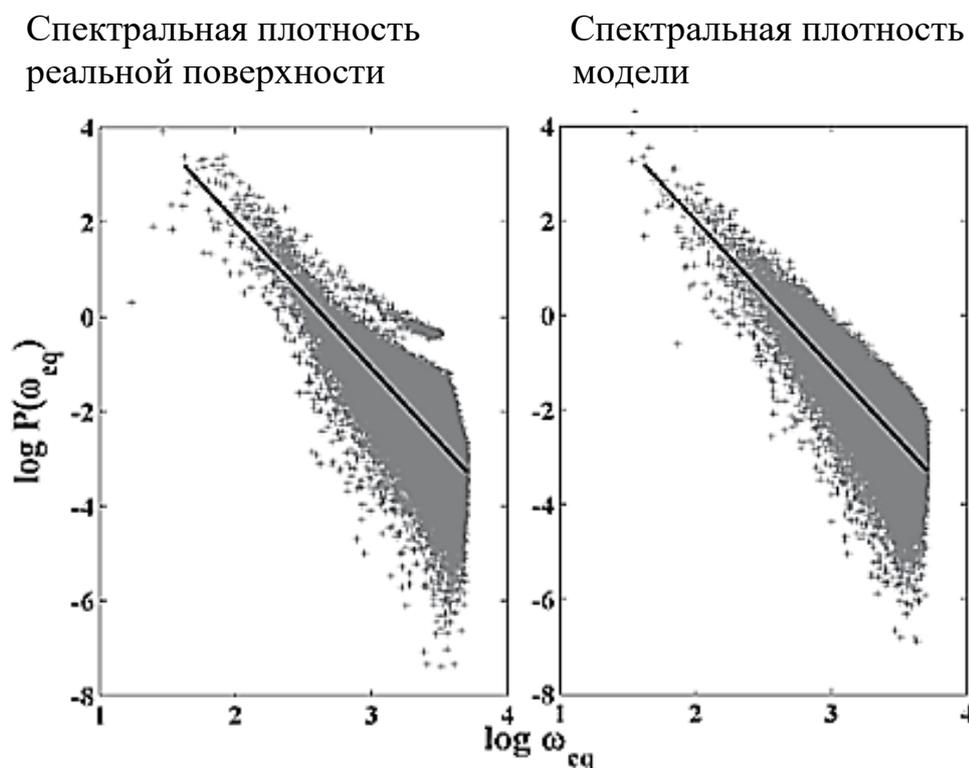


Рис. 2.22. Спектральная плотность реальной поверхности и модели

Так же важную роль играют такие параметры, как среднее квадратическое отклонение высот неровностей поверхности Ra и фрактальный фактор D , поэтому в дополнении к фрактальной размерности, определяемой с помощью спектральной плотности, для фрактального фактора предложим следующие параметры адекватности.

1. Условиями подобия реальной поверхности и ее модели является фрактальная размерность:

$$D_f = \frac{5 - k}{2} = idem.$$

Здесь k – угловой коэффициент в уравнении $lgP(\omega) = C - k \cdot lg(\omega)$.

2. Другим критерием будет безразмерный критерий

$$\pi = Ra/Rq = idem,$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение ординат; Rq – среднее квадратическое отклонение.

Критерий π можно представить в виде следующего выражения

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

Здесь G – фрактальный фактор; γ – величина, равная (по Маджумдару) $\gamma = 1,5$; ω – частота. Фрактальный фактор G можно определить по ранее приведенной формуле, или с некоторым уточнением по следующей формуле:

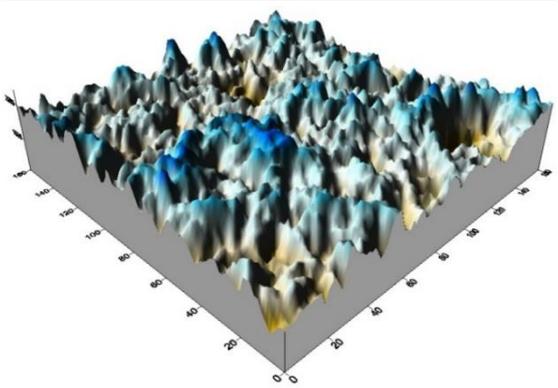
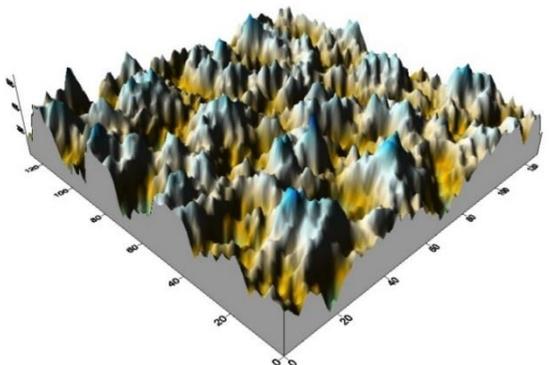
$$G = \left\{ \frac{0,9R_q}{\left[\frac{1}{2D-4} (\omega_{max}^{2D-4} - \omega_{min}^{2D-4}) \right]^{1/2}} \right\}^{\frac{1}{D-1}},$$

где R_q – оценка среднего квадратического отклонения ординат профиля, ω_{max} , ω_{min} – наивысшая и низшая частоты профиля как случайного процесса.

В качестве примера в таблице 2.2 представлена реальная поверхность и её модель, а также их параметры шероховатости.

Таблица 2.2

Параметры реальной поверхности и её модели.

№	Поверхность	Характеристики
1		Реальная поверхность (электроэрозия): $Ra_x = 2.02,$ $Ra_y = 2.11,$ $Rp_x = 5.45,$ $Rp_y = 5.98,$ $Rq_x = 2.52,$ $Rq_y = 2.63$
2		Модель (по Вейерштрассу) $Ra_x = 2.04,$ $Ra_y = 2.09,$ $Rp_x = 5,42,$ $Rp_y = 5,61,$ $Rq_x = 2,49,$ $Rq_y = 2,42$

На рис. 2.23 для реальной поверхности и её модели показаны зависимости спектральной плотности мощности от частоты (фрактальные размерности D определялись через спектральные плотности). Критерий π даёт хорошую сходимость полученных результатов, говоря о том, что эти две поверхности идентичны. Покажем дополнительно для сравнения опорные кривые поверхности и модели по высоте.

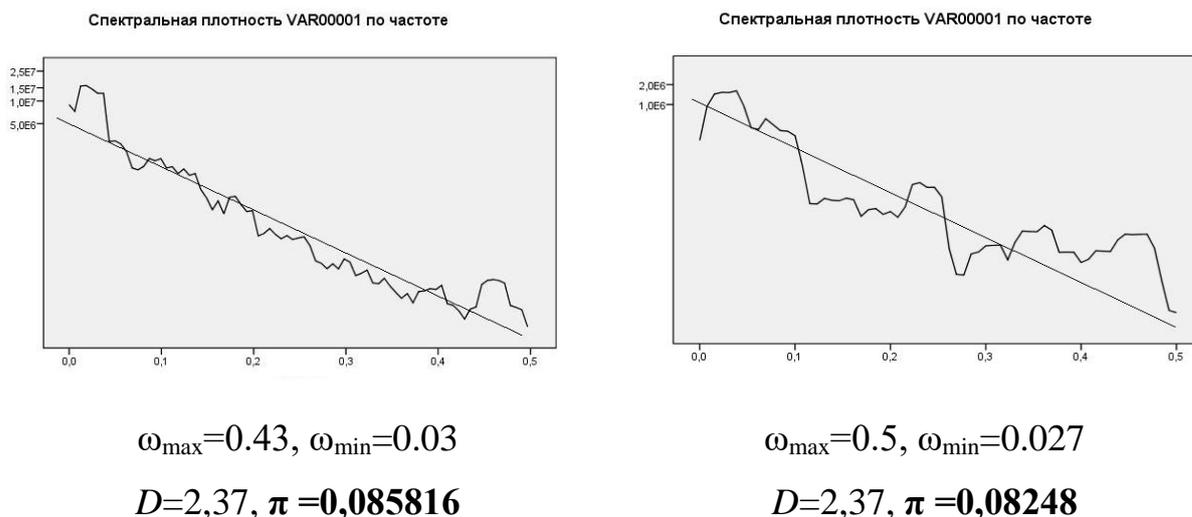


Рис. 2.23. Сравнение спектральных мощностей

На рис. 2.24 видно, что опорная кривая модели имеет практически такую-же характеристику, как и у реальной поверхности.

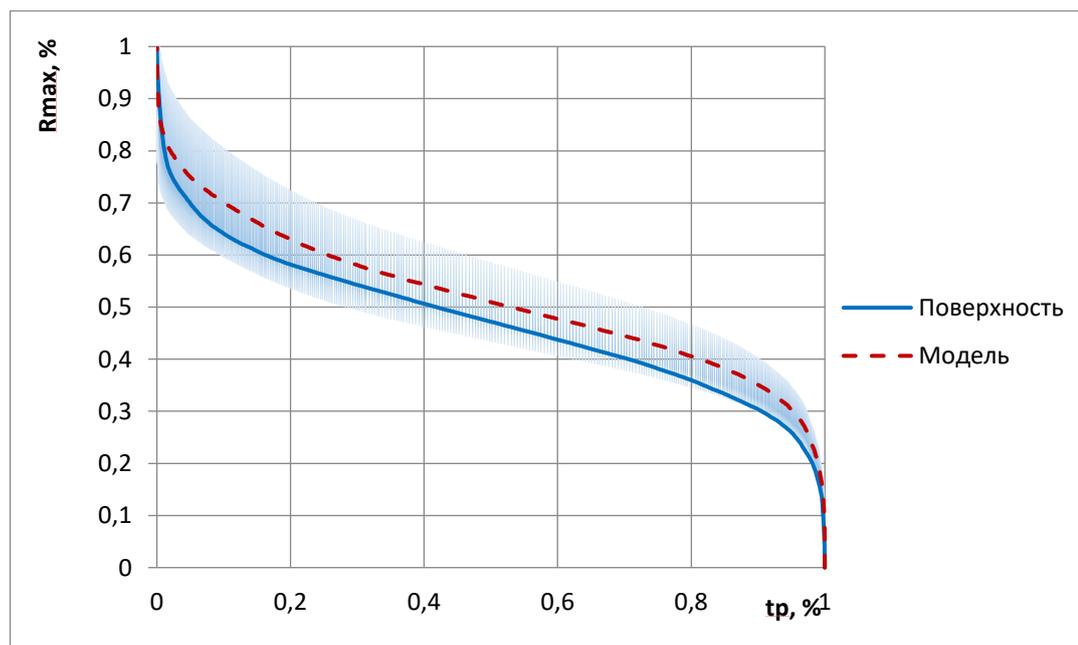


Рис. 2.24. Опорные кривые поверхности и модели.

Все предложенные критерии идентичности дали близкие результаты с погрешностью, не превышающей 15%. Также следует учесть, что реальные карты поверхностей были получены профилографированием с радиусом закругления щупа 5 мкм. и не могли отражать более мелкие неровности, которые фрактальная модель учитывает. Таким образом, фрактальная модель хорошо описывает особенности шероховатого слоя и позволяет моделировать шероховатые поверхности.

2.6. СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

Формирование базы данных поверхностей является немаловажной задачей при проектировании и разработке машин и механизмов. Интенсивно развивающиеся техника и технологии предъявляют всё большие требования к качеству деталей и узлов. Автоматизированный сбор, хранение и индексирование информации ускоряет процесс подбора материалов, качества обработки поверхностей, технологические методы производства и т.п. Результаты работы, сделанные группой исследователей на предприятии, должны быть доступны инженерам - конструкторам, проектировщикам, технологам как исходная информация при разработке той или иной конструкции или механизма. Это позволит без дополнительных исследований и затрат времени выбрать наиболее подходящие параметры поверхностей, максимально удовлетворяющие заданным условиям эксплуатации.

Информация о геометрии поверхности хранится в цифровой форме в виде совокупности высот вершин в файле в специальном формате с расширением *.map. Кроме этого, необходимо дополнительно иметь некоторую информацию об исследуемой поверхности, которая отражает различные её характеристики кроме качества поверхностного слоя, например, прочность и твёрдость материала (механические характеристики), и т.д. Поэтому задача при формировании базы данных поверхностей была поставлена так:

1. Выявить необходимые параметры поверхности.

2. Установить между ними связи (индексация).
3. Определить систему, позволяющую хранить, индексировать и предоставлять по требованию в нужном виде информацию.

Параметры, используемые нами в расчётах, были разбиты на геометрические, к которым относились параметры шероховатости и фрактальная размерность, и физико-механические, к которым относились пределы прочности и упругости, твёрдость, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и т.д. При обзоре систем управления базами данных выбор остановился на системе Microsoft SQL Server. Она отличается высокой защищённостью, стабильностью работы и возможностью обслуживать большое количество клиентов одновременно. Технически можно использовать разные системы баз данных, отвечающие требуемым запросам по безопасности, скорости предоставления информации и т.д.

Сформированная база данных состоит из четырёх таблиц и связей между ними. Первая таблица может содержать название поверхности, тип обработки и ссылку по не ключевому полю на трёхмерную карту поверхности (таблицу четыре). Вторая и третья таблица соответственно несут информацию о геометрических и механических свойствах поверхности. В общем виде это можно представить на диаграмме (рис. 2.25).

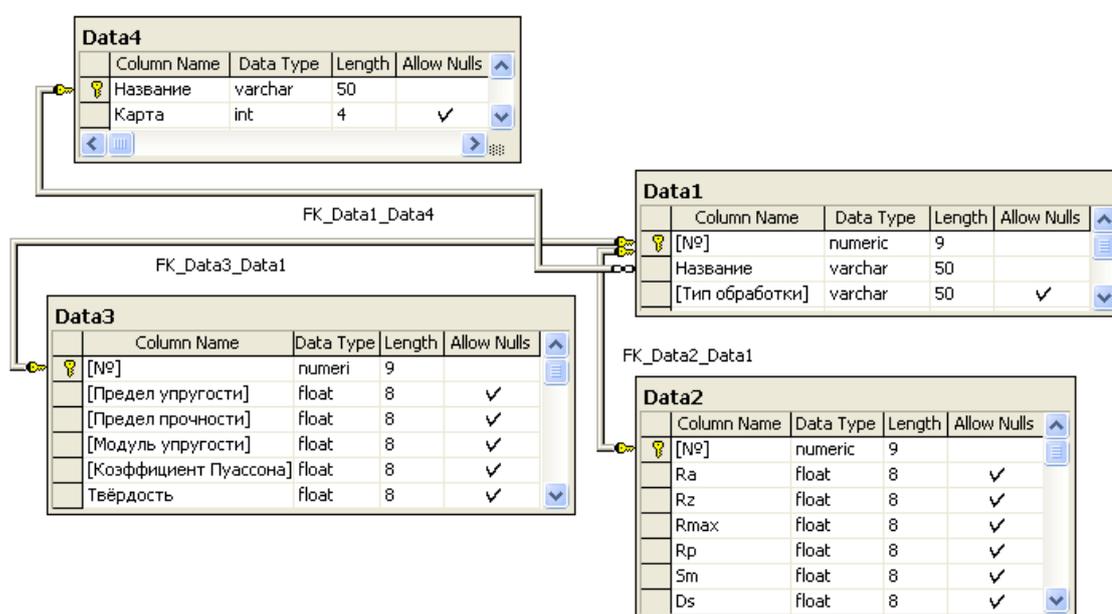


Рис. 2.25. Диаграмма базы данных поверхностей.

Представленная схема базы данных поверхностей удовлетворительно отражает необходимые данные, связи, а также позволяет в удобной форме представить запрошенную информацию (рис. 2.26).

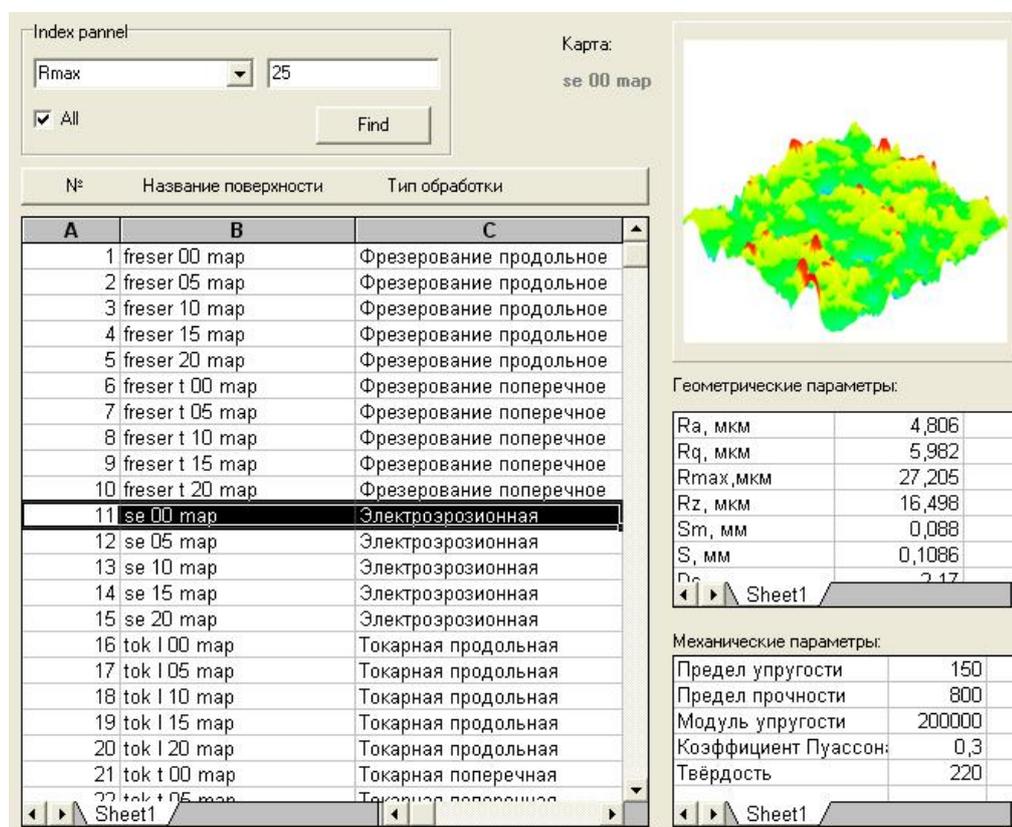


Рис. 2.26. Данные поверхности

Таким образом, сформированная база позволяет хранить полученную в процессе испытаний информацию и по запросу вывести список поверхностей, удовлетворяющих определённым условиям. Есть возможность согласовать наполнение базы данных новыми картами поверхностей с различными видами и качеством обработки напрямую с датчиков трёхмерных сканирующих устройств и микроскопов при исследовании инженерных поверхностей. Кроме того, в представленной базе находятся и фрактальные модели поверхностей, созданные различными методами, описанными ранее.

Из представленного списка со всеми параметрами и свойствами поверхностей можно проводить дальнейшие вычислительные и модельные эксперименты. После расчётов данные обязательно нужно сравнить с натурными.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Таким образом, по результатам работы, изложенной в главе 2, можно сделать следующие выводы.

- 1. Предложена трёхмерная многоуровневая модель инженерных поверхностей, подразумевающая создание на каждом уровне адекватных трёхмерных моделей, отражающих особенности геометрического строения каждого уровня: 1-й уровень - макроотклонения; 2-й уровень - волнистость, 3-й уровень - шероховатость, 4-й уровень – субшероховатость и т.д. Имея набор трёхмерных карт моделей инженерных поверхностей, можно проводить компьютерные эксперименты по контактному взаимодействию, трению, изнашиванию, оценке герметичности и многому другому.*
- 2. Разработаны алгоритмы и соответствующие программы, позволяющие для каждого уровня получить адекватную трёхмерную поверхность со свойственными этому уровню отклонениями: макроотклонения моделируются искажением исходного идеального профиля путём его изгиба, перекоса, искривления и т.д.; волнистость моделируется с помощью сплайнов по двум направлениям в ортогональной или полярной системе координат, а шероховатость моделируется фрактальными поверхностями, полученными с помощью модифицированного для изменения масштаба метода Фосса или с помощью двухпараметрической функции Вейерштрасса – Мандельброта.*
- 3. Для оценки возможности применения фрактальных моделей поверхностей в качестве шероховатости, предложены критерии адекватности, включая критерии подобия и критерий, основанный на спектральной плотности. Все предложенные критерии идентичности дали близкие результаты с погрешностью, не превышающей 15%.*
- 4. Создана база данных инженерных поверхностей, позволяющая упорядоченно хранить трёхмерные карты реальных поверхностей или*

их моделей и проводить поиск нужных карт по заданным критериям. Это позволит упростить подбор оптимального сочетания параметров шероховатости сопряжённых поверхностей при решении конкретной задачи.

ГЛАВА 3. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В главе 3 рассмотрены вопросы моделирования контактного взаимодействия на основе представленной в главе 2 многоуровневой модели инженерных поверхностей. Наличие нескольких уровней подразумевает моделирование контактного взаимодействия волнистых поверхностей на уровне образования контурных площадок контакта, и контактного взаимодействия фрактальных моделей, имитирующих взаимодействие шероховатых поверхностей с образованием фактических пятен контакта. При этом обоснован выбор параметра фрактальной размерности в качестве эффективной характеристики микро- и наноструктуры шероховатой поверхности, так как фрактальная размерность при моделировании эквивалентно заменяет целый комплекс амплитудных и шаговых характеристик из ГОСТ 2789-73.

Применение имитационного моделирования позволило с достаточной точностью оценить параметры контактного взаимодействия волнистых поверхностей. Кроме того, разработана модель контактного взаимодействия фрактальных поверхностей и найдены условия перехода от фрактальной модели к модели Герца, когда шероховатая поверхность представляется в виде набора гладких сферических сегментов, высоты которых имеют определенное вероятностное распределение. Эффективность представленных моделей подтверждена сравнением полученных данных с экспериментальными исследованиями, а на разработанные автором программы получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2021619563 от 15.06.2021 и № 2022681677 от 16.11.2022.

Как известно, контактное взаимодействие шероховатых поверхностей сопровождается возникновением в плоскости контакта дискретных пятен фактического взаимодействия (рис. 3.1).

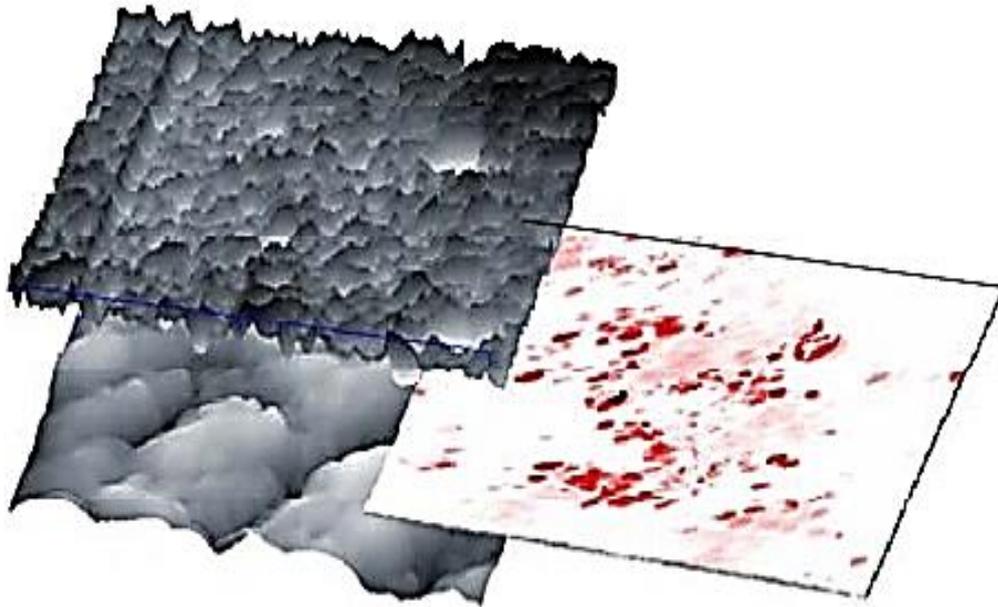


Рис. 3.1. Площадки касания двух поверхностей

В зависимости от уровня взаимодействия, на котором происходит анализ контакта, мы имеем дело либо с контурной площадью соприкосновения, определяемой волнистостью, либо с фактическими пятнами контакта, обусловленными шероховатостью, либо взаимодействием атомов кристаллической решётки на атомном уровне и т.д.

Фактический контакт микронеровностей шероховатых поверхностей возникает на контурных пятнах контакта, полученных после моделирования контактного взаимодействия волнистых поверхностей. Эти контурные площадки чаще всего далеки от идеальных геометрических фигур, но из-за небольшого размера получить их приближённую 3D - модель на компьютере не сложно. К тому же при увеличении сжимающей силы F волны, составляющие волнистость поверхности, упруго деформируются и контурные пятна контакта увеличиваются. В этом случае применение фрактальных моделей при моделировании контакта микронеровностей позволяет провести моделирование контактного взаимодействия на небольшом участке, и результаты интерполировать на всю площадь контурного контакта, т.к. фрактальные модели обладают свойством самоподобия. При этом форму пятен фактического контакта на контурных пятнах определяет шероховатость

поверхности. Пятна фактического контакта несут на себе всю нагрузку на трибосопряжение, и изнашивание шероховатого слоя тоже начинается на пятнах фактического контакта. Если микрогеометрия поверхностей такова, что образующиеся пятна контакта имеют в сумме малую площадь A , то напряжения σ на этих пятнах будут большими ($\sigma = F/A$), что приведёт к большим пластическим деформациям микронеровностей и интенсивному износу поверхностей. Слишком большая площадь фактического контакта даст малые контактные давления (напряжения деформации микронеровностей), но при этом возрастёт сопротивление перемещению поверхностей (коэффициент трения f), увеличится нагрев за счёт сил трения, а также увеличится вероятность возникновения задиров, схватывания поверхностей и заедания, что тоже приведёт к повышению интенсивности изнашивания. Очевидно, что существует для каждого случая какая-то своя оптимальная шероховатость, которая обеспечит оптимальный режим трения с минимальной интенсивностью изнашивания и максимальной долговечностью трибосопряжения. Эта оптимальная шероховатость иногда называется равновесной, к которой стремится любая пара трения в процессе её работы, но не всегда возможна её организация из-за неподходящей для данных условий эксплуатации микрогеометрии шероховатого слоя. Поэтому обеспечение исходной микрогеометрии поверхностей, близкой к оптимальной (равновесной) шероховатости, способно значительно увеличить ресурс трибосопряжения за счёт минимальной приработки поверхностей и обеспечения стабильной низкой интенсивности изнашивания в процессе нормального трения.

Помимо изнашивания поверхностей, микрогеометрия шероховатого слоя оказывает большое влияние на герметичность стыка, когда пятна контакта образуют каналы и полости между микронеровностями, которые могут сообщаться между собой или быть замкнутыми. Они играют главную роль в обеспечении герметичности контакта поверхностей, поскольку именно через них уплотняемая среда беспрепятственно протекает через сопряжение,

и неизвестно, с какой силой необходимо сжать поверхности, чтобы обеспечить герметичное состояние. Также на герметизацию будет оказывать влияние направление геометрии шероховатого слоя и механические характеристики материала, определяющие пластическую деформацию микронеровностей.

Используя компьютерное моделирование взаимодействия фрактальных шероховатых поверхностей, можно учесть большинство факторов, влияющих на картину распределения пятен контакта и определить с достаточной точностью триботехнические параметры сопряжения или требуемые усилия затяжки стыка уплотняющего устройства для достижения герметичного состояния. Механика контактного взаимодействия является основополагающей инженерной дисциплиной, чрезвычайно полезной при проектировании надёжного и энергосберегающего оборудования. Она будет полезна при решении многих контактных задач, например, для таких сопряжений, как колесо-рельс, расчёт муфт, тормозов, шин, подшипников скольжения и качения, передач зубчатыми колесами, шарниров, уплотнений, расчёт электрических контактов и др. Она охватывает широкий спектр задач, начиная от расчётов прочности элементов сопряжения трибосистемы с учётом смазывающей среды и строения материала и заканчивая применением в микро- и наносистемах.

Таким образом, в главе 3 необходимо решить следующие задачи:

- 1. Разработать методологию упругого контактного взаимодействия волнистых поверхностей (модель Герца) на основе трёхмерных моделей, состоящих из сплайнов.*
- 2. Контакт шероховатых поверхностей заменить на контакт адекватных им фрактальных моделей. Фрактальная модель, в отличие от общепринятого мнения, при малых нагрузках подразумевает возникновение первичного контакта в пластическом состоянии на относительно острых вершинах микровыступов, который при дальнейшем росте нагрузки и сближения постепенно переходит в упругий, а затем уже при больших давлениях переходит*

в пластическое оттеснение. Требуется найти условие перехода пятен контакта из пластического состояния в упругое при малых нагрузках.

- 3. На основании установленного критерия перехода пятен контакта из пластического состояния в упругое, разработать методологию контактного взаимодействия фрактальных поверхностей, моделирующих шероховатость, с оценкой параметров контакта для пятен, находящихся в упругом или пластическом состоянии: число и площадь пятен контакта, их распределение, воспринимаемая ими нагрузка, а также контактное давление на пятнах контакта.*
- 4. Разработать программу моделирования контактного взаимодействия фрактальных поверхностей с оценкой параметров контактирования. Для упрощения моделирования разработать методику замены контакта исходных поверхностей на контакт эквивалентной поверхности с гладкой.*
- 5. Верифицировать разработанные модели контактного взаимодействия в экспериментальных условиях.*

3.1. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.

Рассмотрим функциональные свойства на примере торцового стыка уплотнительного устройства при наличии волнистости и шероховатости на контактных поверхностях. Для осесимметричного кольцевого соединения (рис. 3.2) число волн определяется выражением

$$n_w = 2\pi r_m / W_{Sm},$$

где r_m – средний радиус ($r_m = (r_1 + r_2)/2$); W_{Sm} – длина волны (приведенное обозначение соответствует стандартам ISO4287: 1997 и ISO3274: 1996).

Фактический контакт колец будет возникать при взаимодействии микровыступов шероховатого слоя на вершинах волн (рис. 3.3).

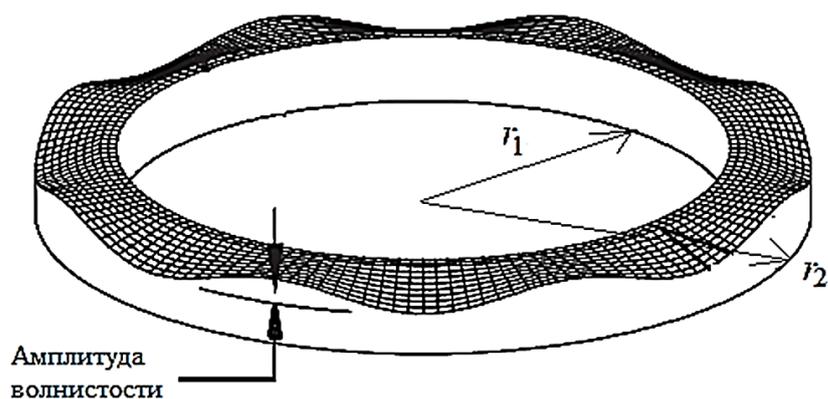


Рис. 3.2. Торцовая волнистая поверхность

В качестве модели волнистой поверхности в первом приближении примем набор радиально расположенных волн, имеющих в верхней части цилиндрическую форму. При этом учитывается случайный разброс амплитуд волн.

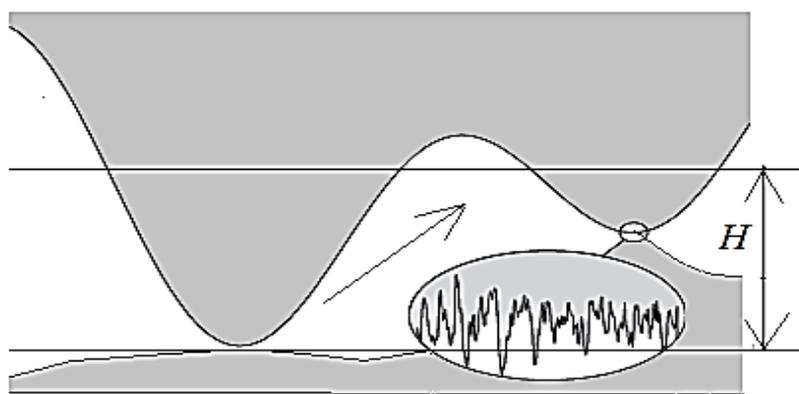


Рис. 3.3. Контакт волнистых поверхностей с зазором H

Полагаем, что эта случайная величина подчиняется определенному закону распределения со среднеквадратической высотой волн W_q . Длина волны W_{Sm} и ее радиус r_w на первом этапе расчёта приняты постоянными. Также полагаем, что все вершины волн находятся в упругом контакте с сопряженной поверхностью, а уровень деформации связан с амплитудой волн, имеющей определенное распределение. Начальный зазор ненагруженного соединения принимается равным H_0 – расстоянию между средними линиями профиля волнистости

$$H_0 = W_{p1} + W_{p2}.$$

Здесь W_p – высота сглаживания волнистого профиля; индексы 1 и 2 относятся к двум сопряженным поверхностям.

Пренебрегая шероховатостью, рассмотрим модель контактного взаимодействия гладкой поверхности с волнистой (рис. 3.4).

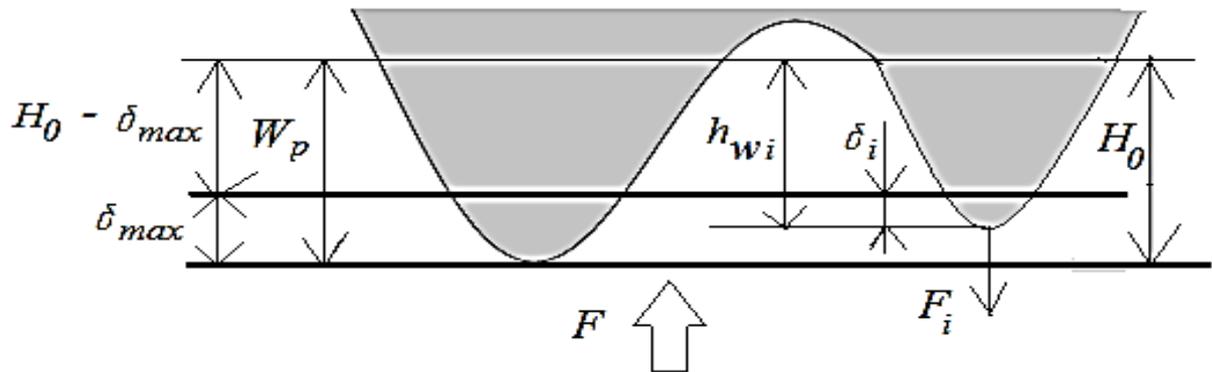


Рис. 3.4. Контакт гладкой поверхности с волнистой

После приложения сжимающей силы зазор в контакте уменьшится на величину сближения поверхностей δ_{max} . Эту величину предварительного (максимального) сближения поверхностей можно задать на этапе проектирования. Она может определяться, например, функциональными свойствами устройства (например, герметичностью) или триботехническими, например, износостойкостью, несущая способность при трении и др.

При прочих равных условиях можно записать

$$H = \left(\sum_{i=1}^2 W_{pi} \right) - \delta_{max}.$$

Здесь W_p – высота сглаживания волнистости; δ_{max} – сближение поверхностей под действием сжимающей силы, которое определим с помощью имитационной модели. Сила прижима определяется, исходя из принятой модели контактного взаимодействия волнистых поверхностей.

Модель волнистой поверхности в первом приближении представляет собой периодическую волнистую поверхность с постоянной амплитудой. В работе [158] рассматривалась задача контактного взаимодействия без учета

сил трения синусоидальной волны с плоской поверхностью (задача Вестергарда). На рис. 3.5 представлена схема контакта волнистой поверхности с гладкой.

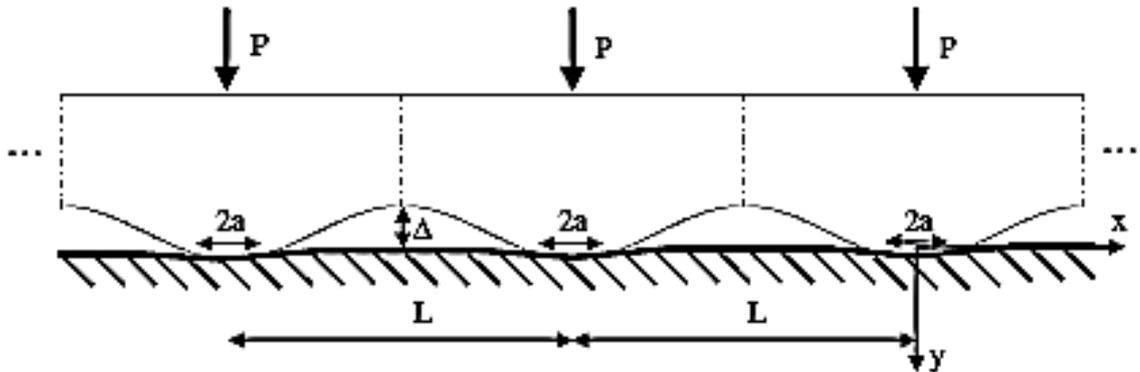


Рис. 3.5. Контакт волнистой поверхности с гладкой

Вестергардом (Westergaard) получено следующее решение

$$p(x) = -\frac{P\sqrt{2}}{2\pi \sin^2(\pi a/L)} \cos \frac{\pi x}{L} \sqrt{\cos \frac{2\pi x}{L} - \cos \frac{2\pi a}{L}}.$$

Максимальное давление (при $x = 0$) равно $p_0 = 2\Delta/A$, где A – податливость стыка, Δ – амплитуда волны; L – период (шаг) волн.

Рассмотрим модель волнистости, состоящую из набора цилиндрических волн, расположенных в радиальном направлении кольцевого уплотнительного устройства с радиусами r_2 (внешний) и r_1 (внутренний). Нагрузку на стык рассматриваемых волн (количеством n_w) обозначим через N . В этом случае погонная нагрузка (p_l) на одну волну будет равна

$$p_l = \frac{F}{r_2 - r_1} = N/n_w.$$

Используя решение Герца для контакта двух цилиндров, запишем следующие выражения:

- максимальное напряжение (случай параллельно расположенных цилиндров)

$$p_0 = 0,798 \sqrt{\frac{p_l[(R_1 + R_2)/(2R_1R_2)]}{2(1 - \mu_1^2)/E_1 + 2(1 - \mu_2^2)/E_2}},$$

- полуширина площадки контакта

$$a = 0,798 \sqrt{2p_l \frac{R_1 R_2}{R_2 + R_1} [2(1 - \mu_1^2)/E_1 + 2(1 - \mu_2^2)/E_2]},$$

где $R_{1,2}$ – радиусы цилиндров (радиус скругления гребня волны); $\mu_{1,2}$ – коэффициенты Пуассона; $E_{1,2}$ – модули упругости материалов сопряжения.

В случае с реальной волнистостью поверхности волны не имеют постоянной величины, а распределяются по высоте по определённому закону, поэтому для отыскания связи величины деформации с нагрузкой на волнистые поверхности удобно использовать имитационную модель контактного взаимодействия поверхностей.

Имитационная модель контактного взаимодействия поверхностей с учетом волнистости подразумевает применение ЭВМ. Волнистую поверхность для рассматриваемой пары трения (кольца торцового уплотнительного устройства) представим в виде цилиндрических волн (рис. 3.6).

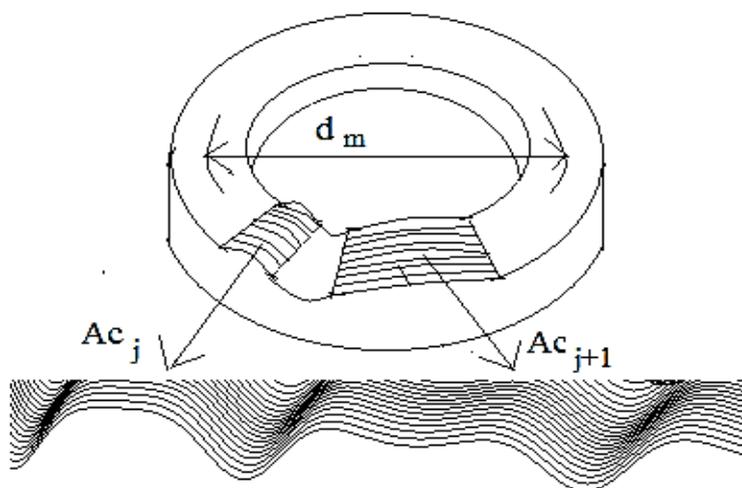


Рис. 3.6. Контурные площадки

Полагаем, что функциональные и триботехнические параметры устройства будут определяться контурными площадками, которых по окружности будет n_w . Для оценки упругой деформации волн на первом этапе представим торцовую поверхность в виде набора цилиндров одинакового

радиуса r_w , расположенных на разных уровнях по высоте (рис. 3.7). Реализовать такую модель возможно на ЭВМ в программе, где волнистая поверхность создаётся в виде массива точек в памяти компьютера, которые являются вершинами волнистой поверхности. При этом используются исходные данные в виде радиуса кривизны волны (радиуса цилиндра), их количества и функции распределения волн по высоте. Полагаем, что вершины волн имеют логарифмически нормальное распределение и согласуются с высотными параметрами волн реального устройства при их оценке профилометрическим способом.

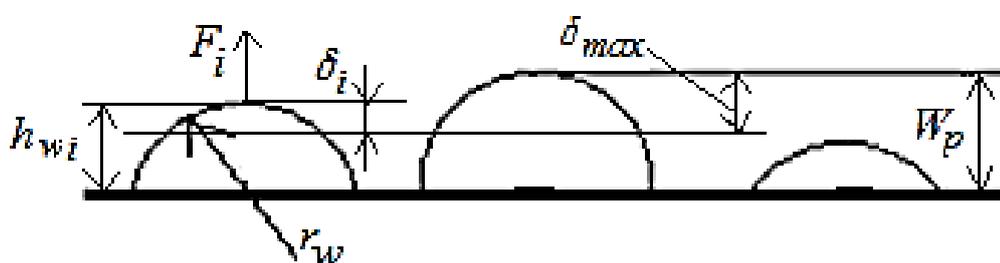


Рис. 3.7. Модель волнистой поверхности

В согласии с рис. 3.7 при приложении к волнистой поверхности внешней нагрузки F произойдёт сближение поверхностей за счёт упругой деформации вершин волн, причём каждая вершина из-за разной своей высоты расположения будет деформироваться на разную величину δ_i и будет нести на себе разную нагрузку F_i . Кроме того, для устройств небольшого размера малое число волн не позволяет получить статистически значимые результаты контактного взаимодействия, поэтому имитационное моделирование является в данном случае подходящим инструментом для получения приемлемых результатов. Поэтому к основной задаче оценки контактного взаимодействия волн добавляется ещё задача определения необходимого числа компьютерных экспериментов, дающие статистически значимые результаты при определении заданного параметра контактного взаимодействия (например, сближения или контурной площади).

Представим процедуру реализации имитационной модели контактного

взаимодействия волнистых поверхностей на ЭВМ.

Процедура проведения статистических испытаний

1. По заданным исходным данным, включающим микрогеометрию волнистости, а именно - длину волны $L = r_2 - r_1$ и средний радиус скругления волн r_w , а также приняв логарифмически нормальный закон распределения вершин волн, смоделируем в памяти компьютера волну, состоящую из n_w случайных величин (СВ).

2. Зададим нагрузку F (согласно исходным данным), приходящуюся на n_w смоделированных волн. Определим начальное сближение δ_{max} волн [184], считая, что имеем только одну волну, по формуле для контакта цилиндрических поверхностей:

$$\delta = \frac{F}{L} (\lambda_1 + \lambda_2) \left\{ \ln \left[\frac{L^3}{4(\lambda_1 + \lambda_2)F \cdot r_w} \right] + 2,38629 \right\}.$$

Здесь L – длина линии контакта; $\lambda_i = (1 - \mu_i^2)/(\pi E_i)$, где μ – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости; r_w – радиус волны, F – нагрузка, приходящаяся на волну, которая сдеформирована до сближения δ .

При предварительно рассчитанной величине сближения δ_{max} деформация i -ой волны, согласно рис. 3.7, оказывается равной

$$\delta_i = h_{wi} - (W_p - \delta_{max}).$$

Сложность решения заключается в том, что величины деформации выступов волн δ_i , как и воспринимаемые ими нагрузки F_i , разные для каждого выступа, а нагрузка F присутствует в формуле как под знаком логарифма, так и без него, т.е. прямо решить задачу не представляется возможным. Зато она легко решается с помощью ЭВМ методом дихотомии (половинного деления) до заданной степени точности $[\varepsilon]$, как будет показано позже.

3. Для всех волн n_w найдем реакцию i -той волны F_i , соответствующую деформации δ_i . Сравним сумму реакций ΣF_i , приходящихся на n_w волн, с внешней заданной нагрузкой F . Если $\Sigma F_i > F$, то следует уменьшить сближение $\delta_{max} = \delta_{max} - \Delta$, где $\Delta = \delta_{max} / 2$, а если $\Sigma F_i < F$, то следует соответственно увеличить сближение $\delta_{max} = \delta_{max} + \Delta$. Если происходит смена

неравенства с большего на меньшее или наоборот, то методом половинного деления уменьшаем $\Delta = \Delta/2$. Расчет следует закончить, если выполняется условие

$$\frac{F - \sum_{i=1}^{\leq n_w} F_i}{F} \leq [\varepsilon].$$

Здесь $[\varepsilon]$ – заданная точность (мы использовали $\varepsilon = 0,01$).

4. Выполним N прогонов моделирования волн (предварительно примем $N=20$) и определим в каждом случае сближение – $\delta_i, i=1, \dots, N$.

5. По результатам N прогонов вычисляем среднее арифметическое отклонение $\bar{\delta}(N)$ и половину доверительного интервала $d(N, \alpha)$ по формулам

$$\bar{\delta}(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i; \quad d(N, \alpha) = t_{N-1; 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(N)}{N}}.$$

Здесь дисперсия отклика (сближения) равна

$$S^2(N) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\delta_i - \bar{\delta}(N)]^2.$$

Табличные значения параметра t (критерия Стьюдента) приведены в справочных пособиях по математической статистике. Так, при $N = 20$ и $\alpha = 0,10$ имеем $t_{19; 0,95} = 2,09$.

6. Если отношение $\frac{d(N, \alpha)}{\bar{\delta}(N)} < \gamma'$, то используем $\bar{\delta}(N)$ как точечную оценку и завершаем процедуру моделирования для данной нагрузки. В итоге получаем соотношение $F_1 \sim \bar{\delta}(N)$. Погрешность оценим по формуле $\gamma' = \frac{\gamma}{1+\gamma}$, где γ – относительная погрешность ($0 < \gamma < 1$) и доверительный интервал – $100(1-\alpha)\%$. В противном случае число прогонов моделирования следует увеличить.

7. Изменив нагрузку на волны, найдем в соответствии с предложенной процедурой соотношения $F_2 \sim \bar{\delta}(N)$, $F_3 \sim \bar{\delta}(N)$, ..., $F_n \sim \bar{\delta}(N)$.

Моделирование выступов с разной высотой расположения предлагается выполнять по логарифмически нормальному распределению [39]. Пусть X^R –

случайная величина, распределенная равномерно на отрезке $[0,1]$. Тогда можно найти зависимость случайной величины (максимальной высоты волны), распределенной по логарифмически нормальному закону, от X^R . Используя данные работы [39], после сглаживания данных уравнение регрессии имеет вид

$$X^{LN} = 1,60 \cdot 10^{-3} \exp(9,78 \cdot X^R) + 7,06.$$

Здесь $X^{LN} = W_{max}$ имеет размерность, выраженную в мкм.

Сравнение данных, полученных с помощью представленного выше уравнения регрессии ($W_{max \text{ cal}}$) и экспериментальных данных ($W_{max \text{ exp}}$), представлено на рис. 3.8. В области высот выступов волн $W_p = 0 \dots 40$ мкм. расчётные данные хорошо согласуются с данными эксперимента. Таким образом, с помощью полученного уравнения регрессии можно найти набор вершин волн ($h_{wi} \sim W_{max}/2$) и произвести имитационное моделирование в соответствии с ранее предложенной процедурой.

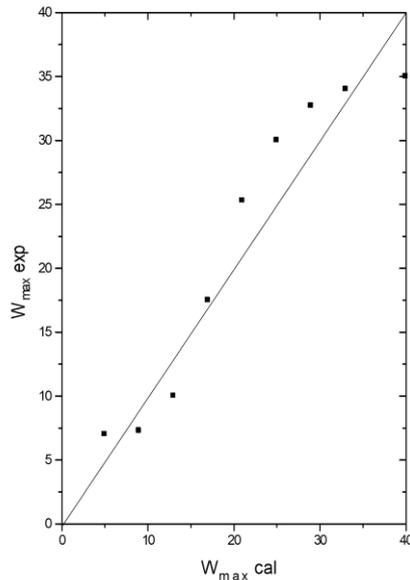


Рис. 3.8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

По предложенному алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 3.9, в среде C++ Builder была разработана программа, позволяющая смоделировать контакт волнистых поверхностей и рассчитать величину сближения и контурную площадь контакта волны с гладкой поверхностью при

заданной величине нагрузки или определить величину нагрузки при заданном сближении.

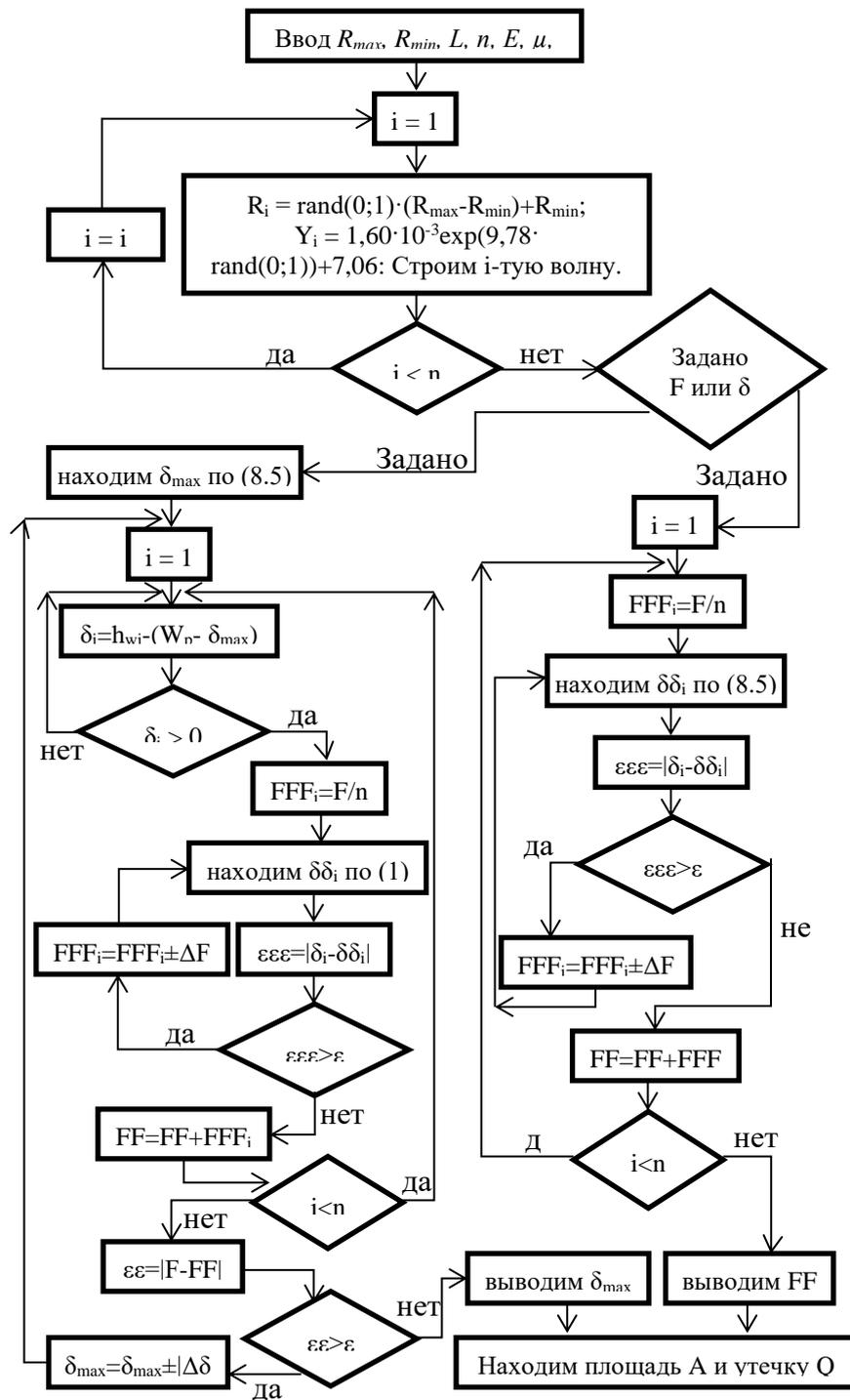


Рис. 3.9. Блок-схема основных модулей программы

Интерфейс программы, который представлен на рис. 3.10, позволяет вводить исходные данные для моделирования (вверху слева), в графическом виде представляет пользователю результат моделирования волны (внизу

программы), а также позволяет оценить сближение поверхностей при заданной нагрузке F или найти внешнюю нагрузку (нагрузочную способность волны) при заданном сближении. Для отображения результатов расчёта представлены два мультифункциональных графика, позволяющие отображать зависимости сближения, внешней нагрузки или контурной площади контакта от друг друга с учётом изменения радиуса волны в заданном пределе или их числа.

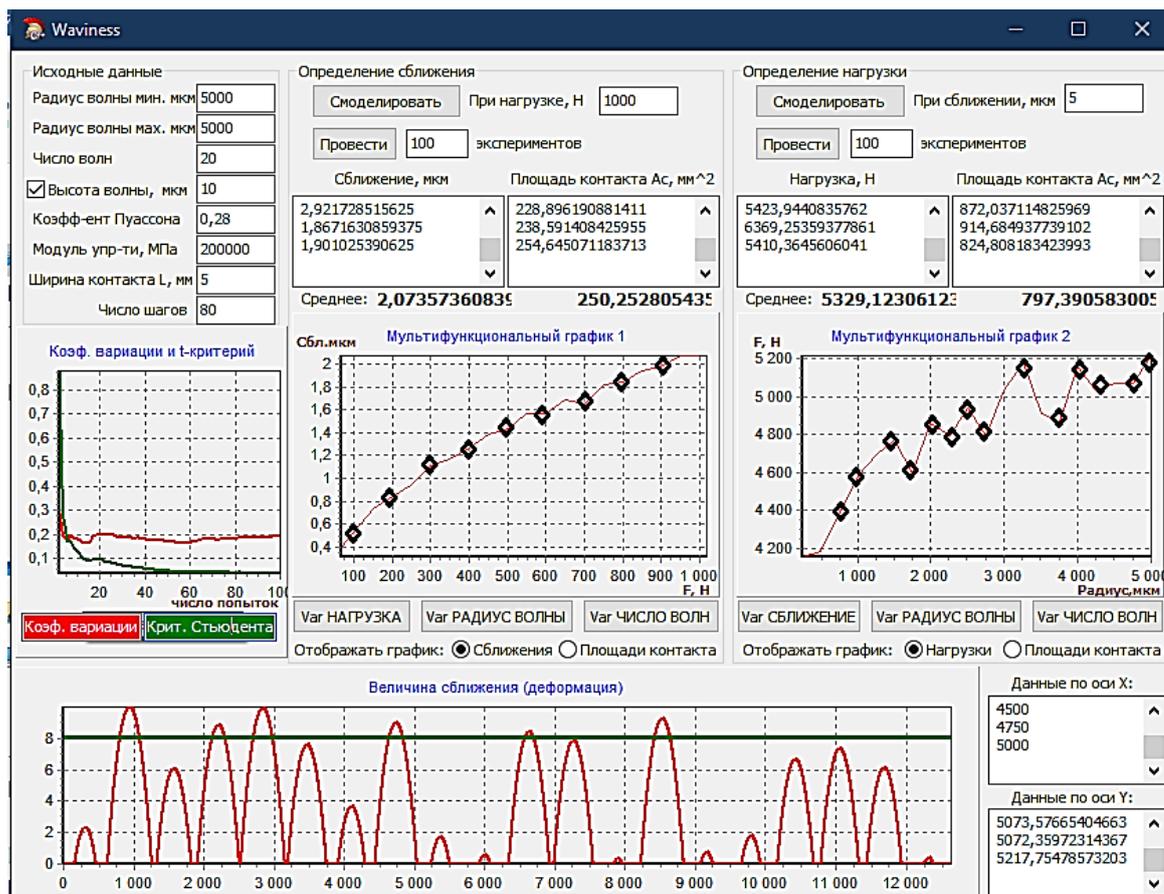


Рис. 3.10. Программа моделирования волнистых поверхностей с оценкой параметров контактного взаимодействия

Программа также позволяет оценить необходимое количество статистических испытаний или машинных экспериментов, достаточных для того, чтобы считать результаты достоверными со статистической точки зрения.

Функциональную связь между относительной площадью контакта и безразмерными параметрами, определяющими нагрузку и волнистость,

представим в виде

$$\frac{A_c}{A_a} = C \left(\frac{r_w}{H_w} \right)^\alpha \left(\frac{F_N}{A_a E} \right)^\beta$$

Диапазон изменения переменных в данном уравнении (радиуса волны, высоты волны, номинального давления) выберем из следующих интервалов:

$$1000 \leq r_w \leq 5000 \text{ мкм}; 5 \leq H_w \leq 20 \text{ мкм};$$

$$2 \leq \frac{F_N}{A_a} = p \leq 20 \text{ МПа}; E = \text{const} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Для исследования влияния параметров волнистости поставим компьютерный эксперимент по плану ПФЭ 2^2 , причем каждый эксперимент повторим по три раза. В качестве рассматриваемых факторов были выбраны следующие

$$z_1 = \log \pi_2 = \log \frac{r_w}{H_w},$$

где r_w – радиус волны, H_w – высота волны и

$$z_2 = \log \pi_3 = \log \frac{F}{A_a \cdot E},$$

где F – нагрузка, A_a – номинальная площадь, $E^* = 10^5$ МПа – приведенный модуль упругости.

Выходной параметр выражается соотношением

$$y = \log \pi_1 = \log \frac{A_c}{A_a},$$

где A_c – контурная площадь.

Уравнение регрессии представим в виде

$$y = c(\pi_2)^\alpha (\pi_3)^\beta.$$

Прологарифмировав, запишем уравнение регрессии:

$$\lg y = \lg c + \alpha \lg \pi_2 + \beta \lg \pi_3 \quad \text{или} \quad \hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2.$$

Найдем центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной x_i от натуральной z_i для каждого из рассматриваемых факторов.

Для нахождения центра применим следующую зависимость: $z_i^0 = \frac{z_i^+ + z_i^-}{2}$,

интервал варьирования λ_i определяется как $\lambda_i = \frac{z_i^+ - z_i^-}{2}$, а зависимость

кодированной переменной от натуральной $x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\lambda_i}$.

Верхнему уровню z_i^+ соответствуют максимальные значения рассматриваемых факторов. Принимая $r_{wmax} = 5000$ мкм, $H_{wmin} = 6$ мкм, найдем $z_1^+ = \lg \frac{5000}{6} = 2,921$.

Нижнему уровню z_i^- соответствуют минимальные значения рассматриваемых факторов. Принимая $r_{wmin} = 1000$ мкм, $H_{wmax} = 20$ мкм, получим

$$z_1^- = \lg \frac{1000}{20} = 1,699.$$

Для второго симплекса – критерия подобия найдем

$$z_2^+ = \lg \frac{p_a}{E^*} = \lg \frac{20}{10^5} = -3,699; \quad z_2^- = \lg \frac{3}{10^5} = -4,523.$$

Используя полученные значения, найдем центры – средние значения

$$z_1^0 = \frac{z_1^+ + z_1^-}{2} = 2,310; \quad z_2^0 = \frac{z_2^+ + z_2^-}{2} = -4,111.$$

Величины интервалов варьирования соответственно равны

$$\lambda_1 = \frac{z_1^+ - z_1^-}{2} = 0,611; \quad \lambda_2 = \frac{z_2^+ - z_2^-}{2} = 0,412.$$

Величину относительной площади контакта получим путем моделирования сферической волнистой поверхности в приведенной выше программе с принятыми ранее значениями радиуса и высоты волны. Данные факторов проведённого компьютерного эксперимента представим в виде таблицы 3.1. В качестве промежуточного результата на рис. 3.11 покажем зависимость относительной площади контакта (отношение контурной площади контакта A_c к номинальной A_a) от удельной нагрузки для параметров волнистости $r_w = 2000$ мкм; $H_w = 20$ мкм. Результат имитационного моделирования показал, что зависимость A_c/A_a от $F_N/(E \cdot A_a)$ имеет форму, близкую к линейной. Зависимость получена при постоянных значениях всех факторов, кроме числа волн, а, следовательно, при разных значениях номинальной площади касания.

Кодирование факторов

Факторы	Верхний уровень z_i^+	Нижний уровень z_i^-	Центр z_i^0	Интервал варьирования λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
z_1	2,921	1,699	2,310	0,611	$x_1 = \frac{z_1 - 2,310}{0,611} = 1,637z_1 - 3,781$
z_2	-3,699	-4,523	-4,111	0,412	$x_2 = \frac{z_2 + 4,111}{0,412} = 2,427z_2 + 9,978$

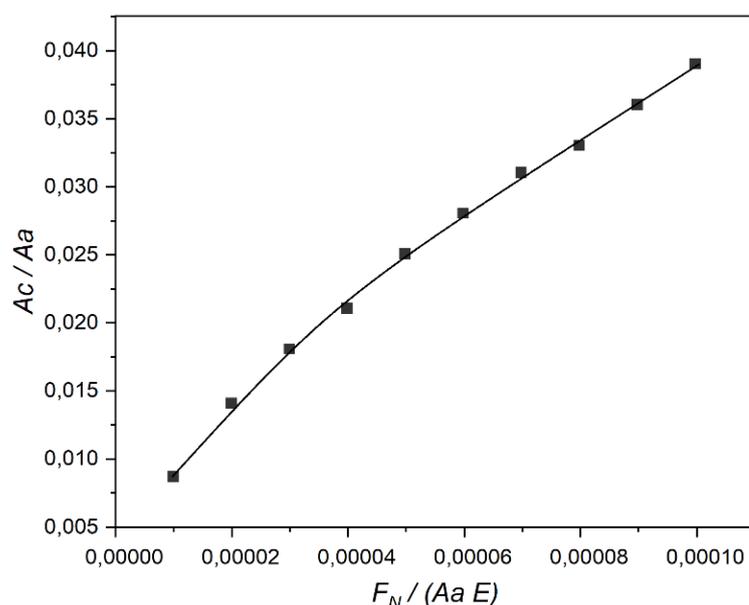


Рис. 3.11. Зависимость относительной площади контакта от нагрузки

Найдем средние выборочные результатов \bar{y}_j для каждого эксперимента. Для этого проведем ряд экспериментов со следующими значениями исследуемых факторов (табл. 3.2). Коэффициенты в уравнении регрессии найдем из решения матричного уравнения

$$b_i = (X^T X)^{-1} (X^T Y),$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} -0,862 \\ -1,351 \\ -1,555 \\ -2,092 \end{bmatrix}.$$

Обработка результатов

№	Матрица планирования		A_c/A_a	Выходной параметр (lg A_c/A_a)	\bar{y}_j
	x_1	x_2			
1	1	1	$A_{c11}/A_{a11} = 0,749/5,321$ $A_{c12}/A_{a12} = 0,700/5,184$ $A_{c13}/A_{a13} = 0,813/5,931$	$y_{11} = -0,852$ $y_{12} = -0,870$ $y_{13} = -0,863$	-0,862
2	-1	1	$A_{c21}/A_{a21} = 0,138/3,213$ $A_{c22}/A_{a22} = 0,162/3,578$ $A_{c23}/A_{a23} = 0,150/3,299$	$y_{21} = -1,367$ $y_{22} = -1,344$ $y_{23} = -1,342$	-1,351
3	1	-1	$A_{c31}/A_{a31} = 0,142/5,251$ $A_{c32}/A_{a32} = 0,144/4,981$ $A_{c33}/A_{a33} = 0,146/5,261$	$y_{31} = -1,568$ $y_{32} = -1,539$ $y_{33} = -1,557$	-1,555
4	-1	-1	$A_{c41}/A_{a41} = 0,040/4,044$ $A_{c42}/A_{a42} = 0,030/3,451$ $A_{c43}/A_{a43} = 0,020/3,251$	$y_{41} = -2,005$ $y_{42} = -2,061$ $y_{43} = -2,211$	-2,092

Решение матричного уравнения дает

$$b_0 = 1,465; b_1 = 0,257; b_2 = 0,359.$$

Тогда уравнение регрессии имеет вид

$$\hat{y} = 1,465 + 0,257x_1 + 0,359x_2.$$

Перейдя к натуральным значениям, окончательно запишем

$$\frac{A_c}{A_a} = 13,96 \left(\frac{r_w}{H_w} \right)^{0,421} \left(\frac{Pa}{E^*} \right)^{0,893}$$

На рис. 3.12 представлен график зависимости относительной контурной площади контакта A_c/A_a от безразмерных параметров волнистой поверхности r_w/H_w и нагрузки Pa / E^* для сферической модели волны. Используя ту же процедуру имитационного моделирования и исходные данные, получим уравнение регрессии для цилиндрических волн:

$$A_c = 0,067 A_a \left(\frac{R_w}{H_w} \right)^{0,028} \left(\frac{F}{A_a \cdot E} \right)^{0,031}$$

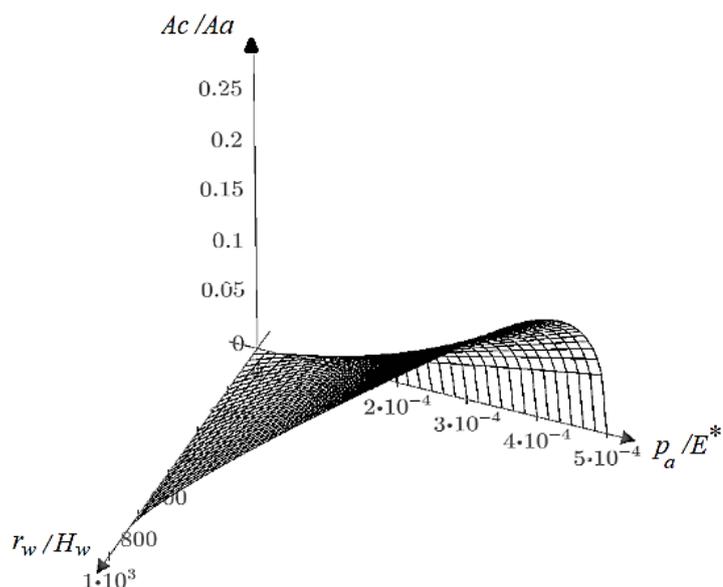


Рис. 3.12. Зависимость относительной площади контакта от параметров волнистой поверхности и нагрузки (сферическая модель волны)

Зависимость относительной площади контакта от параметров волнистой поверхности в виде набора цилиндрических волн показана на рис. 3.13.

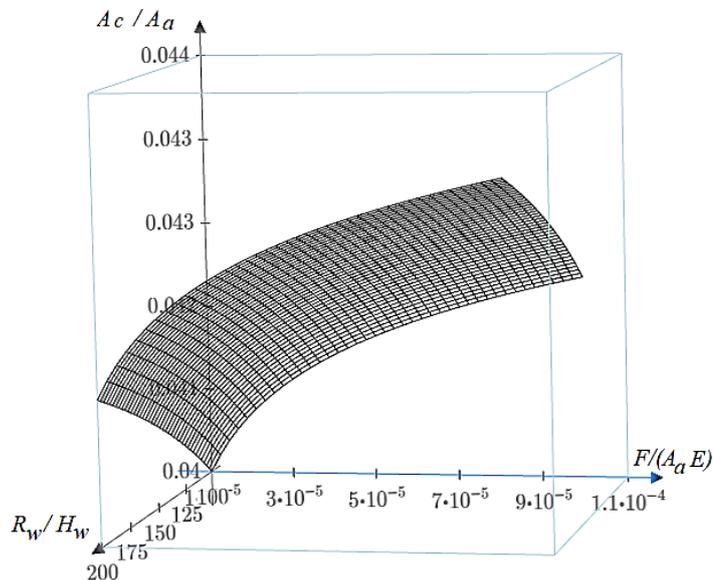


Рис. 3.13. Зависимость относительной площади контакта от параметров волнистой поверхности и нагрузки (цилиндрическая модель)

Кроме того, оценим адекватность эксперимента по критерию Фишера. Найдем дисперсию воспроизводимости как

$$S_i^2 = \frac{1}{n_n - 1} \sum_{i=1}^{n_n} (y_{ji} - \bar{y}_i)^2; \quad S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^2.$$

Здесь n_n – число повторных опытов ($n_n = 3$); n – число опытов в матрице планирования ($n = 4$); \bar{y}_i – среднее значение отклика на одном уровне.

Используя данные из таблицы 3.2, получим

$$S_{\{y\}}^2 = 0,002373.$$

Остаточную дисперсию определим по формуле

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m^*}{n - m} \sum_{j=1}^n (y_j^p - y_j^э)^2,$$

где m^* - число факторов ($m^* = 2$); m - количество коэффициентов в линейном уравнении регрессии ($m = 3$); y_j^p , $y_j^э$ - значения откликов, полученных соответственно расчетом и экспериментальным путем.

Остаточная дисперсия в данном случае оказалась равной

$$S_{\text{ост}}^2 = 0,001185.$$

Оценим критерий Фишера

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_{\{y\}}^2} = 0,412.$$

Табличное значение критерия для принятого уровня значимости $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $k_1 = n - m = 4 - 3 = 1$; $k_2 = n (m^* - 1) = 4 (2 - 1) = 4$, равно

$$F_{\text{tabl}(0,05;1;4)} = 7,71.$$

Так как $F = 0,412 < F_{\text{tabl}(0,05;1;4)} = 7,71$, то уравнение регрессии адекватно.

Кроме того, была проведена оценка влияния волнистости на контактное давление, а именно оценивалось давление номинальное Pa (на всей площади) и контурное Pc (воспринимаемое волнами). Полученные после проведения вычислительных экспериментов результаты (рис. 3.14) сравнивались с данными расчета по известным зависимостям, представленных в работах И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина и др. [212-215] при следующих исходных данных: приведенный модуль упругости (сталь) $E' = 10^5$ МПа; радиус волны $r_w = 3000$

мкм; высота волны $H_w = 10$ мкм.

$$p_c = 0,2E^{0,8} \left(\frac{H_w}{r_w} \right)^{0,4} p_a^{0,2},$$

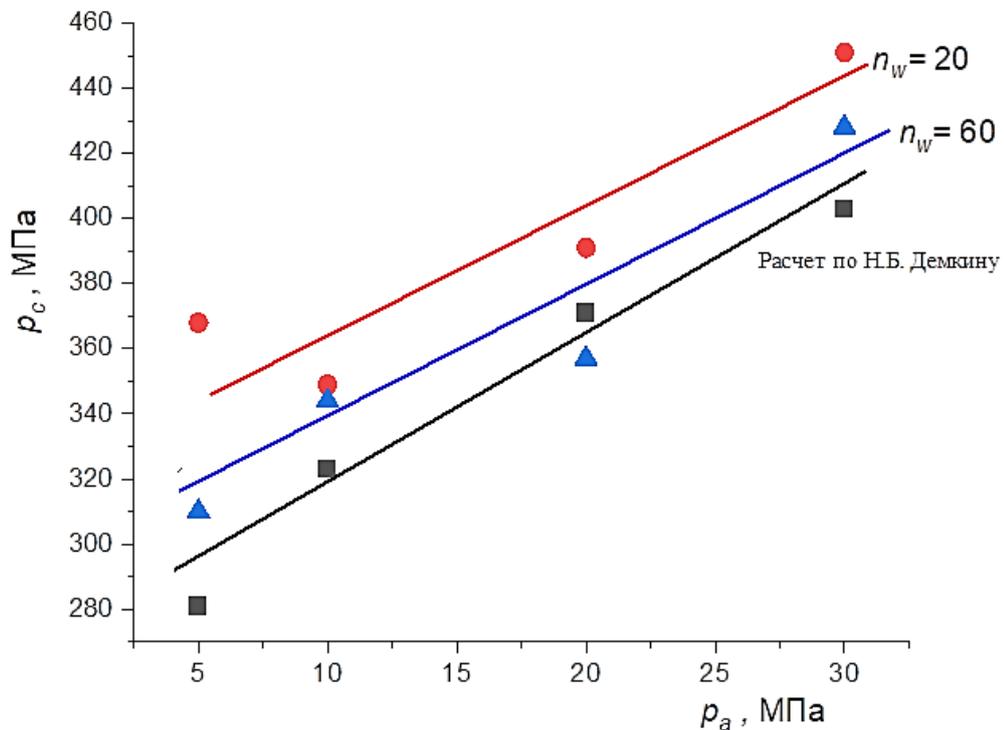


Рис. 3.14. Зависимость контурного давления от номинального

Таким образом, анализ сравнительного анализа показал, что с ростом номинального давления, контурное увеличивается практически линейно. Следует отметить, что модель Демкина не учитывает число волн, а, как показывает вычислительный эксперимент (рис. 3.14), с ростом числа волн контурное давление снижается. Это обстоятельство необходимо учитывать для тех сопряжений, которые имеют сравнительно малые геометрические площади соприкосновения, особенно в миниатюрных соединениях.

Моделирование контакта волнистых поверхностей для трёхмерного случая даёт возможность более точно оценить параметры контактного взаимодействия, а именно контурную площадь и нагрузку на отдельный выступ волны. Для трёхмерного случая в качестве исходной информации берём трёхмерную модель из сплайнов, построение которой было описано в главе 2 пункт 2.3.2 (рис. 3.15).

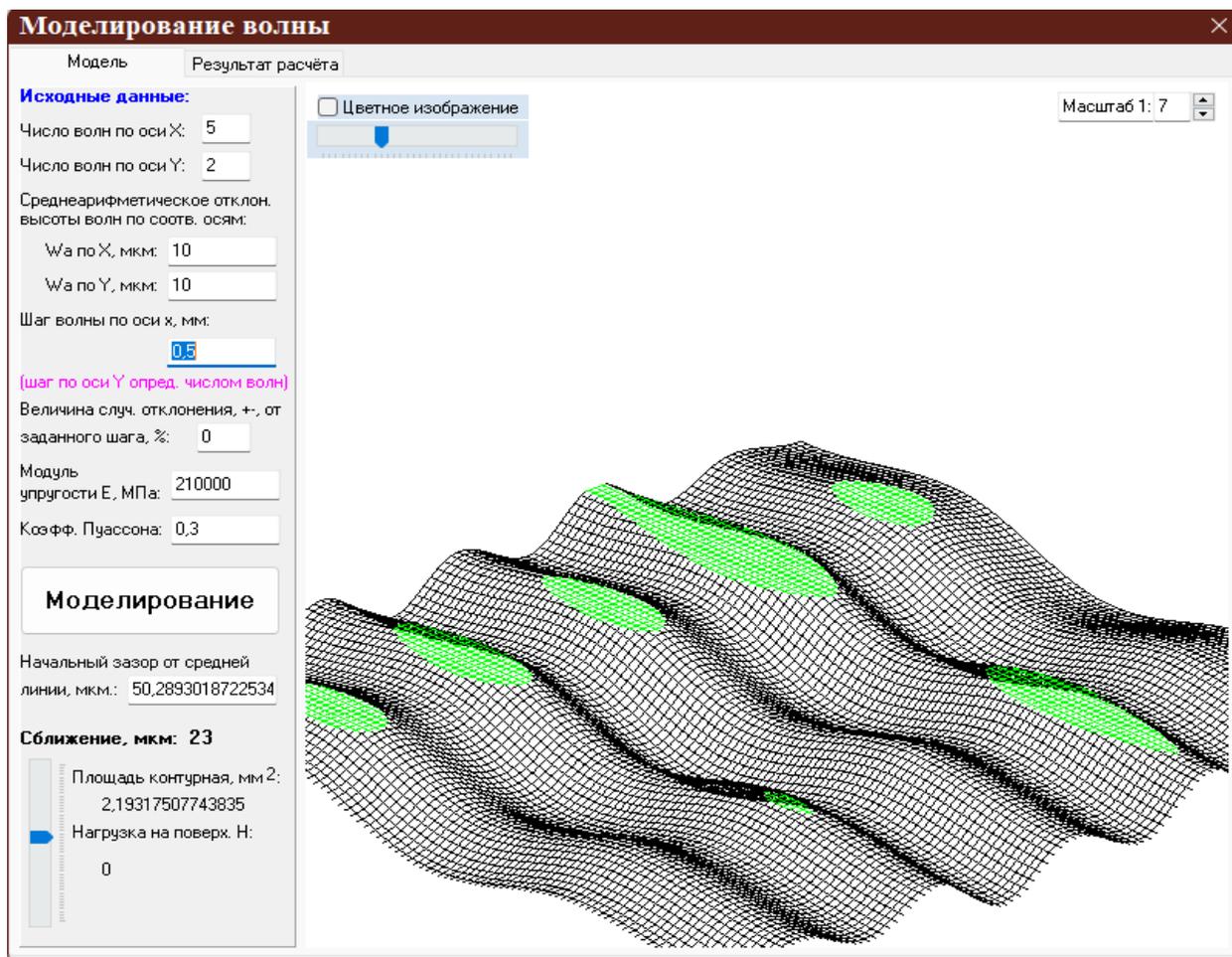


Рис. 3.15. Контакт волнистых поверхностей

С помощью разработанных в этой работе алгоритмов можно привести в контакт с плоскостью построенную по исходным данным 3D модель волнистой поверхности. Как правило, контакт реальных волнистых поверхностей часто имеет сферическую аналогию, причём пятна имеют неправильную эллиптическую форму, размеры которых легко определяются в программе (площадь контакта каждого пятна S_i и величину деформации выступа δ_i).

Таким образом, предложенный алгоритм имитационного моделирования позволяет создавать трёхмерные модели волнистых поверхностей и проводить симуляцию их контактного взаимодействия с определением параметров контактирования: число контурных пятен контакта, их площадь, а также контактную жёсткость и величину

нагрузки, воспринимаемую каждым пятном при заданном режиме нагружения.

Далее, используя предложенную в данной работе многоуровневую модель поверхностей, переходим к оценке фактического контакта на контурных пятнах, величина и нагрузка на которые теперь известна.

3.2. КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Методы моделирования инженерных поверхностей на основе фрактального представления о строении шероховатого слоя подробно были описаны ранее во второй главе настоящей работы. И помимо внешнего сходства фрактальной поверхности с реальной представляется возможность более полно учесть практически все описанные ранее геометрические факторы в одной модели. Кроме того, такой подход снимает некоторые допущения, в частности о том, что все радиусы закругления вершин выступов принимаются одинаковыми, и позволяет учесть определённое распределение площадей пятен касания, которое будет рассмотрено ниже. Фрактальная геометрия позволяет установить соответствие площади отдельного пятна контакта с радиусом закругления верхней части выступа, что, в свою очередь, повышает точность оценок параметров контактирования.

3.2.1. Связь фрактальных параметров с параметрами шероховатости

Для практического применения фрактальных моделей необходимо установить связь между фрактальными параметрами и основными статистическими показателями качества инженерных поверхностей. Такую связь провел А. Маджумдар. Так, связь между средним квадратическим отклонением ординат профиля σ и мощностью спектральной функции $S(\omega)$ имеет вид

$$\sigma = \left[\int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} S(\omega) d\omega \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Здесь ω_{min} и ω_{max} – низшая и наибольшая частоты. Наибольшая частота связана с разрешающей способностью инструмента измерения (радиус щупа), а низшая – с длиной выборки. В расчетах обычно принимают выборочное значение (оценку) среднего квадратического отклонения, т.е. $\sigma = Rq$.

Мощность спектральной функции Вейерштрасса-Мандельброта определяется выражением

$$S(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \omega^{2D-5}.$$

Учитывая, что $\sigma = Rq$ и произведя несложные преобразования, запишем

$$Rq^2 = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} \omega^{2D-5} d\omega.$$

Проинтегрировав, получим

$$Rq^2 = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \frac{(\omega_{min}^{2D-4} - \omega_{max}^{2D-4})}{(2D-4)}.$$

Откуда фрактальный параметр шероховатости будет равен

$$G = [4(D-2) \ln \gamma] Rq^{1/(D-1)} \left(\omega_{min}^{(2-D)/(D-1)} - \omega_{max}^{(2-D)/(D-1)} \right).$$

Параметр G (по данным Д. Павелеску [188]) изменяется в пределах от $G=9,9 \cdot 10^{-16}$ до $1,2 \cdot 10^{-2}$ мкм. Изменяя Rq при неизменяемых значениях D и ω , параметр G будет изменяться в пределах, представленных в табл. 3.3.

Таблица 3.3.

Зависимость фрактального параметра G от Rq

Rq , мкм	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
G , мкм	$1,062 \cdot 10^{-11}$	$1,088 \cdot 10^{-8}$	$1,114 \cdot 10^{-5}$	$6,422 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$

Для определения радиуса закругления вершины выступа неровности шероховатой поверхности вернёмся к функции Вейерштрасса-Мандельброта

[204], с помощью которой во второй главе производилось моделирование фрактальной кривой (профиля поверхности) в виде:

$$z(x) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D-1} (\lg \gamma)^{\frac{1}{2}} \sum_{n=0}^{n_{max}} \gamma^{(D-2)n} \left[\cos \phi_{1n} - \cos \left(\frac{2\pi \gamma^n x}{L} \right) + \phi_{1n} \right].$$

Фрактальный параметр шероховатости G , имеющий размерность длины, является масштабом высот неровностей, не зависящим от частоты. Более грубая поверхность имеет большее значение G . Фрактальная размерность D характеризует низко- и высокочастотные компоненты профиля.

Для отдельного выступа (рис. 3.16), приняв $n = 0$; $\phi_{1n} = 0$, запишем:

$$z(x) = L \left(\frac{G}{L} \right)^{D-1} (\lg \gamma)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi \gamma^n x}{L} \right) \right].$$

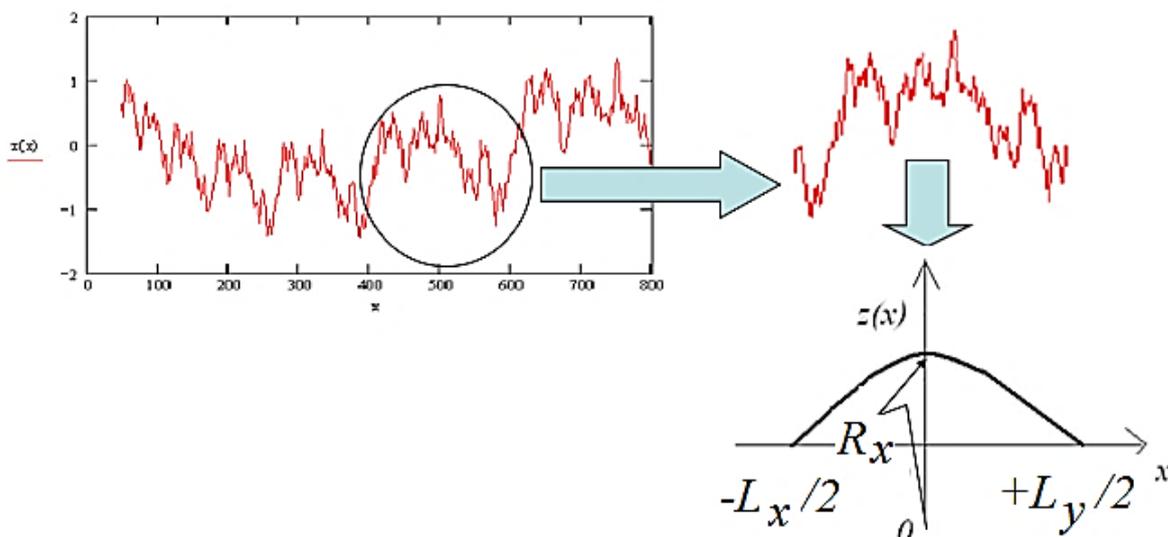


Рис. 3.16. Моделирование выступа

Для анизотропной поверхности радиус закругления выступа определяется выражением

$$R = \sqrt{R_x R_y}.$$

Найдем радиус вершины выступа в сечении ZOX :

$$R_x = \frac{1}{\left| \frac{d^2 z}{dx^2} \right|_{x=0}} = \frac{L_x}{\left(\frac{G_x}{L_x} \right)^{D_{zx}-1} (2\pi)^2 (\ln \gamma)^{1/2}}$$

Аналогичным образом выразим радиус закругления в сечении ZOY :

$$R_y = \frac{L_y}{\left(\frac{G_y}{L_y}\right)^{D_{zx}-1} (2\pi)^2 (\ln\gamma)^{1/2}}.$$

Здесь L_x и L_y размеры пятна контакта.

После несложных преобразований, с учетом того, что $\pi L_x L_y = 4a$, где a – площадь пятна, получим:

$$R = \frac{a^{\frac{D_{zy}}{2}} (4/\pi)^{(D_{zx}-1)/2} L_x^{D_{zx}-D_{zy}}}{2\pi^{\frac{3}{2}} (\ln\gamma)^{\frac{1}{2}} G_x^{(D_{zx}-1)/2} G_y^{(D_{zy}-1)/2}}.$$

Для изотропной поверхности при $D_{zx} = D_{zy} = D$ и $G_x = G_y = G$ имеем

$$R^* = \frac{a^{D/2}}{2^{2-D} \pi^{1+D/2} (\ln\gamma)^{1/2} G^{D-1}}.$$

Для определения радиуса закругления вершины выступа анизотропной поверхности необходимо знать следующие параметры: площадь пятна a ; фрактальные размерности D_{zx} , D_{zy} ; фрактальные параметры шероховатости G_{zx} , G_{zy} . Указанные параметры можно оценить при наличии информации о массиве ординат поверхности, на основе которой формируется поверхность. Затем, анализируя вариограммы, построенные в разных взаимно перпендикулярных направлениях - вертикальных разрезах поверхности $Z(X, Y)$, можно найти минимальное и максимальное значения фрактальной размерности. Обозначим их D_{zy} и D_{zx} . Фрактальные параметры шероховатости G_{zx} , G_{zy} по выбранным двум взаимно перпендикулярным направлениям определяются по ранее представленной формуле

$$G = [4(D - 2)\ln\gamma] R q^{1/(D-1)} \left(\omega_{min}^{(2-D)/(D-1)} - \omega_{max}^{(2-D)/(D-1)} \right),$$

Таким образом, предлагаемая фрактальная модель поверхности учитывает распределение площадей пятен контакта, при этом каждой площади касания соответствует свой радиус закругления. Плотность выступов фрактальной модели определяется зависимостью

$$D_{sum} = \frac{1}{A_a} \left(\frac{a_{max}}{a} \right)^{D_p/2}$$

Здесь A_a – номинальная площадь; a_{max} – максимальная площадь единичного пятна контакта; D_p – фрактальная размерность площадок контакта, измеренная, например, с помощью метода «периметр - площадь».

3.2.2. Распределение пятен контакта

Фундаментальное положение в теории контактного взаимодействия о дискретности контакта предполагает наличие определенного распределения площадей пятен касания. Считается, что подобное распределение подчиняется степенному закону. Наличие многовершинности выступов и более мелких неровностей на выступе ограничивает использование распределения высот выступов для более точной оценки параметров контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. Переход от функции распределения высот выступов к распределению площадей пятен касания производится по следующей формуле

$$f(a) = f[\psi(a)]|\psi'(a)|,$$

где $\psi(a)$ – функция, обратная $\phi(h)$, $|\psi'(a)|$ – модуль производной, a – площадь пятна, h – высота.

Рассматривая верхнюю часть выступа в виде сферического сегмента (рис. 3.17), запишем выражение для площади среза в виде

$$a = 2\pi r(\alpha + z - Rp).$$

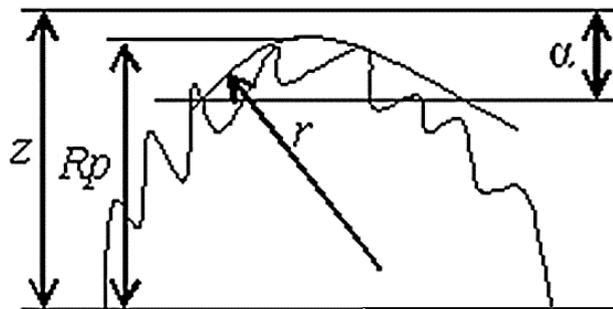


Рис. 3.17. Модель выступа

Здесь r – радиус закругления, α – сближение, z – высота выступа, Rp – высота сглаживания. Тогда можно выразить высоту выступа:

$$z = \frac{a}{2\pi r} + (Rp - \alpha).$$

Также можно определим связь между высотой выступа и радиусом закругления

$$z = \frac{a^{(2-D)/2} \pi G^{D-1}}{2} + (Rp - \alpha)$$

Тогда относительная высота будет равна

$$z^* = \frac{a^{(2-D)/2} \pi G^{D-1}}{2Rp} + \left(1 - \frac{\alpha}{Rp}\right)$$

При $\alpha = Rp$ высота выступа определяется площадью основания выступа.

В этом случае можно записать

$$z^* = \frac{a^* (2-D)/2 a_{max}^{(2-D)/2} \pi G^{D-1}}{2Rp}$$

Здесь $a^* = a / a_{max}$ – площадь основания выступа.

Обратная функция имеет вид

$$\psi(a^*) = c_1 a^{*(2-D)/2},$$

где $c_1 = \frac{a_{max}^{(2-D)/2} \pi G^{D-1}}{2Rp} \leq 1$

Производная обратной функции равна

$$\psi'(a) = c_1 \frac{2-D}{2a^{*D/2}}.$$

Так как распределение площадок нагруженного контакта рассматривается относительно a_{max} и фрактальная размерность не зависит от уровня сближения, то можно при определенном сближении найти такое значение c_1 , при котором $c_1 = 1$. Тогда

$$z^* = a^{*(2-D)/2}.$$

Плотность распределения пятен касания подчиняется выражению [194]

$$f(a^*, v, w) = c_2 a^{*\frac{(v-1)(2-D)-D}{2}} (1 - a^*)^{\frac{(w-1)(2-D)}{2}}.$$

Здесь $c_2 = \frac{\Gamma(v+w)(2-D)}{2\Gamma(v)\Gamma(w)}$.

Интегральная функция представленного распределения имеет вид

$$F(a^*) = \int_0^{a^*} \xi^m (1 - \xi)^n d\xi,$$

где $m = [(v-1)(2-D) - D] / 2$; $n = (w-1)(2-D) / 2$; ξ – переменная интегрирования.

Разложив сомножитель в подынтегральном выражении $(1-\xi)^n$ в ряд по формуле бинома Ньютона и ограничиваясь четырьмя членами разложения, получим

$$F(a^*) = c_3 \left[\frac{a^{*(m+1)}}{m+1} - n \frac{a^{*(m+2)}}{m+2} + \frac{n(n-1)}{2!} \frac{a^{*(m+3)}}{m+3} - \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} \frac{a^{*(m+4)}}{m+4} \right]$$

Здесь c_3 – коэффициент, определяемый из условия нормировки

$$F(a^*=1) = 1.$$

Интегральную функцию для конкретных расчетов представим в виде

$$F(a^*) = a^{*p}, p < 1.$$

Для определения показателя степени p используем следующую процедуру. Задавшись значением $a_i^* \in [0,1]$, найдем точки в логарифмической шкале координат $\{lg F_i(a^*), lg(a_i^*)\}$, $i = 1, \dots, N$.

С помощью метода наименьших квадратов вычислим коэффициенты b_0 и b_1 аппроксимирующей функции $y = b_0 + b_1 x$, где $y = lg F(a^*)$, $x = lg(a^*)$. В результате получим выражение $lg F(a^*) = b_0 + b_1 lg(a^*)$. Потенцируя полученное выражение, запишем

$$F(a^*) = 10^{b_0} a^{*(b_1)}.$$

Учитывая, что при $a^*=1$ имеем $F(a^*) = 1$, предыдущее выражение перепишем:

$$F(a^*) = a^{*p}$$

Откуда

$$p = b_1 + b_0 / lg a^*.$$

Приемлемым для оценки показателя p является значение $a^* = 0,25$.

Представим результаты компьютерного анализа контактного взаимодействия реальных инженерных поверхностей в программе, разработанной автором. Контакт получен между картами реальных

поверхностей, оцифрованных на щуповом 3D – профилометре TauSurf-6:

1. Электроэрозия, $Ra = 3.8$ мкм, $Rp = 11.7$ мкм, $Rmax = 49$ мкм.
2. Фрезерование, $Ra = 3.2$ мкм, $Rp = 11.1$ мкм, $Rmax = 24.8$ мкм.

На рис. 3.18 представлена карта контактного взаимодействия двух указанных поверхностей при определенном сближении ($\delta = 4.7$ мкм. при начальном зазоре $W = 31.7$ мкм; площадь фактического контакта 27%).

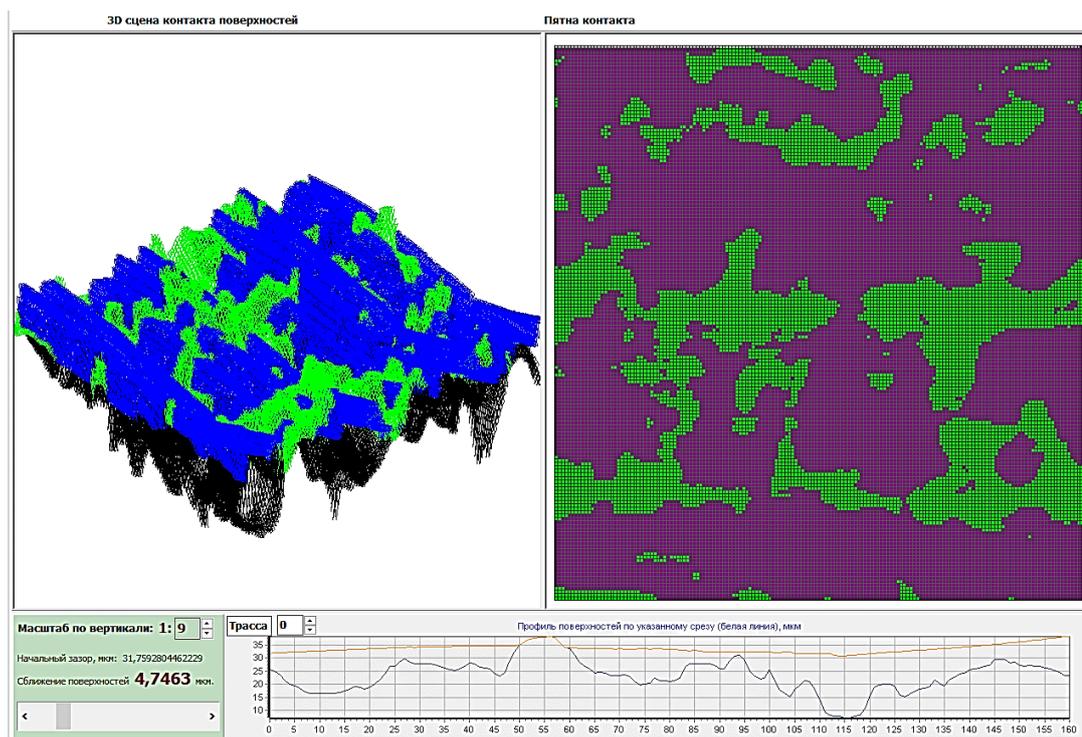


Рис. 3.18. Контактное взаимодействие двух шероховатых поверхностей

В левой части показана трёхмерная сцена контактного взаимодействия, полученная по разработанному автором алгоритму с использованием 3D-карт поверхностей после их сканирования на 3D-профилографе или их фрактальных моделей. Процесс контактирования относительно прост – для этого в памяти компьютера создаётся несколько массивов данных, которые содержат две исходные поверхности, массив для хранения перевернутой карты (той поверхности, что находится сверху), а также массив формирующихся пятен контакта при сближении поверхностей (несмотря на то, что пятна контакта расположены в разных плоскостях, в массиве они

хранятся как-бы приведенные в одну плоскость). Первоначально верхняя (перевернутая поверхность) располагается на высоте $H = R_{max1} + R_{max2}$ от нулевой плоскости (к её координатам прибавляется H), и проводится проверка: для каждой точки проверяется величина зазора между точкой нижней поверхности и верхней с учётом H .

В итоге определяется самый маленький зазор, который необходимо вычесть из первоначального расстояния H , чтобы получить начальное положение верхней поверхности, при котором мы имеем касание поверхностей в одной точке – поверхности коснулись, но нагрузку они пока не воспринимают. И с этого положения начинается сближение поверхностей, так как дальнейшее уменьшение расстояния H будет происходить с наложением профилей, которое моделируется двумя способами (подробнее описаны в п. 3.2.4): для случая упругого контакта просто ищется средняя точка между двумя накладывающимися друг на друга профилями (т.е. «лишний» материал просто не учитывается – он как бы сжимается, а при снятии нагрузки возвращается), а при пластическом контакте происходит распределение этого «лишнего» материала вокруг пятна контакта для каждого деформирующегося микровыступа обеих поверхностей по разработанному автором алгоритму (с помощью поиска кратчайшего пути смещения материала с применением математической модели графов), в результате чего микровыступы становятся толще (расплющиваются) и к прежней форме уже не возвращаются.

В нижней части программы можно видеть параметры контактного взаимодействия и контакт профилей в выбранном вертикальном сечении. Также все инженерные параметры по ГОСТ 2789-73 и их фрактальные параметры загруженных в программу 3D-карт поверхностей определяются автоматически.

Используя компьютерные алгоритмы, представляется возможным найти все пятна контакта при заданном сближении поверхностей и определить их фактическую площадь, а также построить график плотности распределения пятен контакта (рис. 3.19).

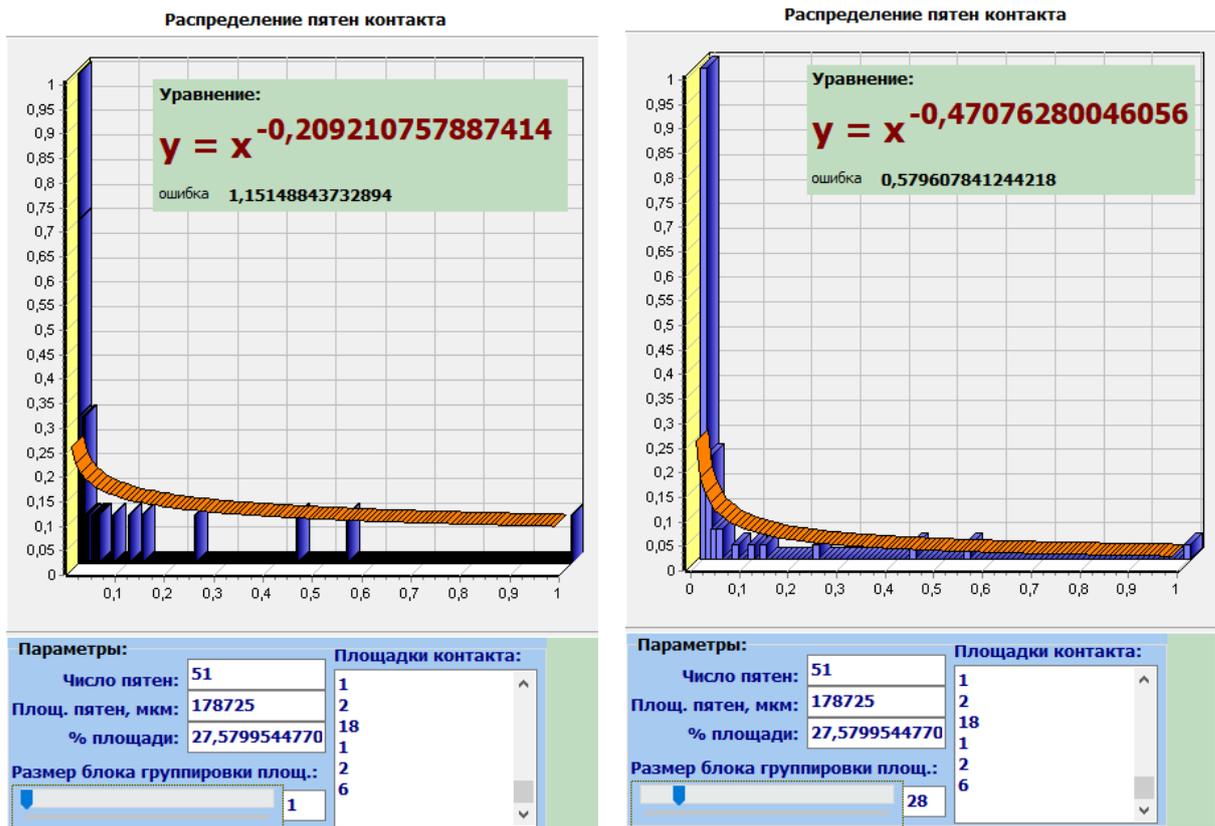


Рис. 3.19. Плотность вероятности распределения пятен контакта

Здесь в левой части рис. 3.19 представлен график распределения в чистом виде, без объединения отдельных пятен контакта в блоки, соответствующие некоторому интервалу фактических площадей. При этом ошибка полученного уравнения довольно существенна. Уменьшить ошибку можно объединив часть пятен контакта в отдельные блоки, соответствующие заданным условиям (правая часть рис. 3.19).

Для оценки рационального объема выборки (числа пятен) используем в первом приближении нормальный закон распределения, т.к. он является предельным, к которому приближаются многие другие и часто встречается в природе. Тогда объем выборки найдем, используя соотношение

$$n = \frac{\sigma^2}{\Delta^2},$$

где σ^2 – дисперсия; Δ – ошибка.

Полагая, что $\Delta = \sigma/6$, оценим минимальное значение объема выборки,

равное $n \geq 36$. В данном примере (рис. 3.18) $n = 53$. Оценка выборки по методу К.Н. Воинова [23] показала, что закон распределения фактически сформировался при $n = 42$. При меньшем объеме выборки следует произвести «размножение» данных, например, с помощью бутстреп-метода, предложенного Б. Эфроном.

Далее интегральная (эмпирическая) функция (ЭФР) распределения сравнивалась с теоретическими законами (ТФР), которые имели соответствующее отклонение d . Критерием согласия эмпирической функции распределения с предлагаемым теоретическим законом распределения принят критерий А.Н. Колмогорова, в соответствии с которым предлагаемый теоретический закон распределения, наилучшим образом соответствующий эмпирическому закону, должен удовлетворять условию

$$d < d_{cr} = \frac{\lambda}{\sqrt{N}}$$

Здесь λ – критерий Колмогорова - Смирнова, соответствующий уровню значимости α ; N – объем выборки (число анализируемых пятен).

Например, отклонения между теоретическим и статистическим распределением по Парето [183] $d = 0,18$, логнормальный закон $d = 0,16$, экспоненциальный закон $d = 0,25$. При $\alpha = 0,05$ принимают $\lambda = 1,36$. Для данного примера критическое значение расхождения эмпирического и теоретического закона распределения не должно быть больше $d_{cr} = \frac{1,36}{\sqrt{73}} = 0,159$, что указывает на то, что рассмотренные законы не отвечают требованию критерия согласия.

Плотность пятен контакта в значительной степени определяет такие параметры контактного взаимодействия, как жесткость, тепло- и электропроводность, герметичность стыка и др. Согласно модели Маджумдара – Бхушана [75, 157], плотность пятен контакта относительно максимальной площади пятна a_{max} определяется зависимостью

$$D_{sa} = \left(\frac{a_{max}}{a} \right)^{D/2} A_a^{-1}.$$

В отличие от модели Гринвуда – Вильямсона [189], плотность пятен с увеличением номинальной площади снижается по гиперболическому закону. Соотношение между числом пятен $N_s = (a_{max}/a)^{D/2}$ и номинальной площадью A_a не соответствует условию: с ростом номинальной площади, на которой располагаются пятна (срез неровностей плоскостью, параллельной средней плоскости, на определенном уровне), плотность пятен убывает по показательному закону.

$$N_s \propto (A_a^0)^{-B}.$$

Здесь A_a^0 – базовая площадь, равная для изотропной поверхности квадрату базовой длины профиля.

Тогда выражение плотности пятен имеет вид

$$D_{sa} = \frac{N_s}{A_a} \sim (A_a^0)^{-B-1}.$$

Запишем это выражение следующим образом:

$$D_{sa} = C(A_a^0)^{-B-1},$$

где C – нормирующий множитель.

Полагаем, что в пределах базовой площади плотность пятен описывается соотношением

$$D_{sa1} = C\langle a \rangle^{D/2} (A_a^0)^{D/2-1}.$$

Из условия самоподобия запишем:

$$D_{sa2} = C(A_a^0)^{D/2} A_a^{D/2-1}.$$

Здесь D – фрактальная размерность ($1 < D < 2$).

Считаем, что плотность пятен (на уровне средней плоскости при $E\{z(x)\} = 0$) равна плотности выступов. В этом случае для изотропной шероховатой поверхности плотность вершин равна

$$D_{sum} = m^2,$$

где m – число выступов (выбросов – максимумов профиля как случайного процесса).

По Я.А. Рудзиту [112], для типичных инженерных поверхностей имеем

$$m = \begin{cases} 265 - 349R_a, & R_a \geq 0,63 \text{ мкм}; \\ 75 - 25R_a, & R_a > 0,63 \text{ мкм}. \end{cases}$$

Найдем множитель C , приравняв $D_{sum} = D_{sa2}$. Тогда при $A_a = A_a^0$ имеем

$$C = m^2 / (A_a^0)^{D-1}.$$

Подставив найденный множитель в уравнение $D_{sa} \sim A_a$, окончательно запишем

$$D_{sa} = m^2 \left(\frac{A_a^0}{A_a} \right)^{1-D/2}.$$

Как и говорилось ранее, распределение пятен контакта инженерных поверхностей является распределением с тяжелыми хвостами, которое хорошо описывается универсальным степенным законом. К тому же степенные законы отражают структуру и процессы, протекающие в сложных системах, и в двойных логарифмических координатах имеют вид прямой, что говорит о скейлинговом поведении, т.е. об отсутствии выделенных масштабов и наличии фрактального поведения.

Вероятность того, что случайным образом взятое пятно будет иметь фактическую площадь Pr большую a , равна функции: $Pr(A > a) = F(a^{-\alpha})$. Здесь α – показатель степени. Расположим площади пятен в порядке уменьшения их размера. Выбор одного такого пятна случайным образом с равномерным распределением означает выбрать один порядковый номер из списка. В этом случае можно заменить $Pr(A > a)$ на $N(A > a)$. Тогда число пятен контакта определяется выражением

$$N(A > a) \propto \left(\frac{a}{a_{max}} \right)^{-\frac{D}{2}}.$$

Пусть плотность распределения относительной площади пятна контакта соответствует степенному закону

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

где $0 < a_{min}^* \leq a^* \leq 1$, $a_{min}^* = a_{min}/a_{max}$.

Средний размер площади пятна контакта равен

$$\langle a^* \rangle = \int_{a_{min}^*}^1 C(a^*)^{-\alpha} \cdot a^* da^*.$$

Здесь a^* – переменная интегрирования. Проинтегрировав, получим

$$\langle a^* \rangle = \frac{C}{2 - \alpha} [1 - (a_{min}^*)^{2-\alpha}]. \quad (\alpha \neq 0)$$

Величину C найдем из условия нормировки

$$C = \frac{1 - \alpha}{1 - (a_{min}^*)^{1-\alpha}}.$$

Тогда площадь среднего пятна контакта (при бесконечно большом числе пятен N – это математическое ожидание) находится из выражения

$$\langle a^* \rangle = \frac{1 - \alpha [1 - (a_{min}^*)^{2-\alpha}]}{2 - \alpha [1 - (a_{min}^*)^{1-\alpha}]}.$$

Интегральная функция распределения определяется как

$$\begin{aligned} F(a^*) &= \int_{a_{min}^*}^{a^*} C(a^*)^{-\alpha} da^* = \frac{C}{1 - \alpha} [(a^*)^{1-\alpha} - (a_{min}^*)^{1-\alpha}] = \\ &= \frac{(a^*)^{1-\alpha} - (a_{min}^*)^{1-\alpha}}{1 - (a_{min}^*)^{1-\alpha}} \end{aligned}$$

При $a_{min} \rightarrow 0$ имеем $F(a^*) = (a^*)^{1-\alpha}$.

Обозначим $p = 1 - \alpha$, $1 < D < 2$. Плотность вероятности распределения относительной площади пятен определяется соотношением

$$f(a^*) = \frac{dF(a^*)}{da^*} = (1 - a^*)(a^*)^{-\alpha}.$$

Тогда число пятен с площадью в диапазоне от a_{1}^* до a_{2}^* , будет равно

$$N(a_1^* \leq a^* \leq a_2^*) = (a^*)^{-\frac{D}{2}} \int_{a_1^*}^{a_2^*} f(a^*) da^* = \frac{2p}{2p - D} \left[(a_1^*)^{\frac{2p-D}{2}} - (a_2^*)^{\frac{2p-D}{2}} \right].$$

На рис. 3.20 представлен график эмпирической функции распределения (столбчатая диаграмма) и подбираемой теоретической функции распределения (гладкая кривая). В данном случае после проверки согласия по критерию А.Н. Колмогорова приемлемой функцией распределения

($d = 0.05 \ll d_{кр} = 0,18$) будет функция

$$F(a^*) = (a^*)^p = (a^*)^{0,555}$$

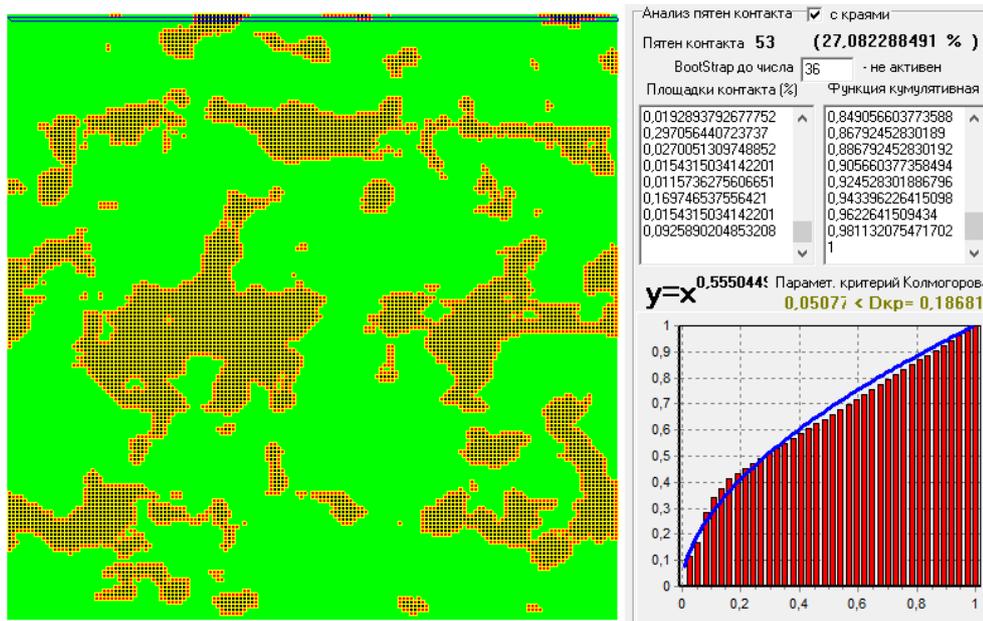


Рис. 3.20. Кумулятивная функция распределения пятен контакта

В этом случае число пятен контакта достаточно и их размножение бутстреп - методом не потребовалось.

В процессе анализа функций распределения пятен контакта для различных поверхностей, удалось установить зависимость показателя степени функции распределения пятен контакта в зависимости от фрактальной размерности поверхности, которая представлена на рис. 3.21.

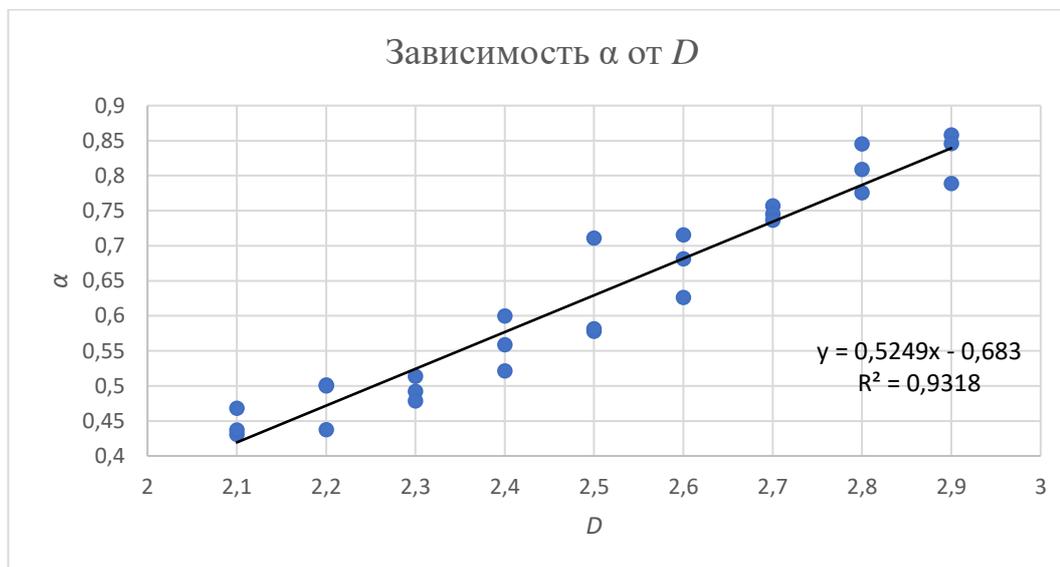


Рис. 3.21. Зависимость показателя степени α от параметра D

С погрешностью в виде величины достоверности аппроксимации $R^2 = 0,93$ представленная зависимость является линейной и показатель степени функции распределения α монотонно растёт с увеличением фрактальной размерности D .

Таким образом, с помощью предложенной методики моделирования контакта трёхмерных карт реальных поверхностей или их адекватных фрактальных моделей в разработанной автором программе можно найти действительную функцию распределения пятен фактического контакта.

3.2.3. Параметры контактного взаимодействия поверхностей.

Модель *Гринвуда – Вильямсона* (J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson) базируется на следующих допущениях:

- шероховатая поверхность представляется в виде набора выступов определенной формы на номинально плоской поверхности;
- высоты вершин подчиняются вероятностному закону распределения;
- при контакте выступы деформируются упруго в соответствии с теорией Г. Герца;
- шероховатые поверхности изотропны;
- форма выступов неровностей в их верхней части – сферическая;
- все вершины выступов имеют одинаковый радиус, хотя высоты являются случайными;
- не учитывается взаимодействие соседних выступов;
- деформации подвержены только выступы, но не основная часть тела.

Модель ГВ содержит всего три параметра: 1) плотность вершин выступов D_{SUM} ; 2) стандартное отклонение высот вершин σ_s ; 3) детерминированный радиус вершин сферической формы r . При заданных значениях этих параметров можно определить характеристики контактирования шероховатой поверхности с параллельной ей гладкой поверхностью, отстоящей от её средней линии на расстоянии d (рис. 3.22).

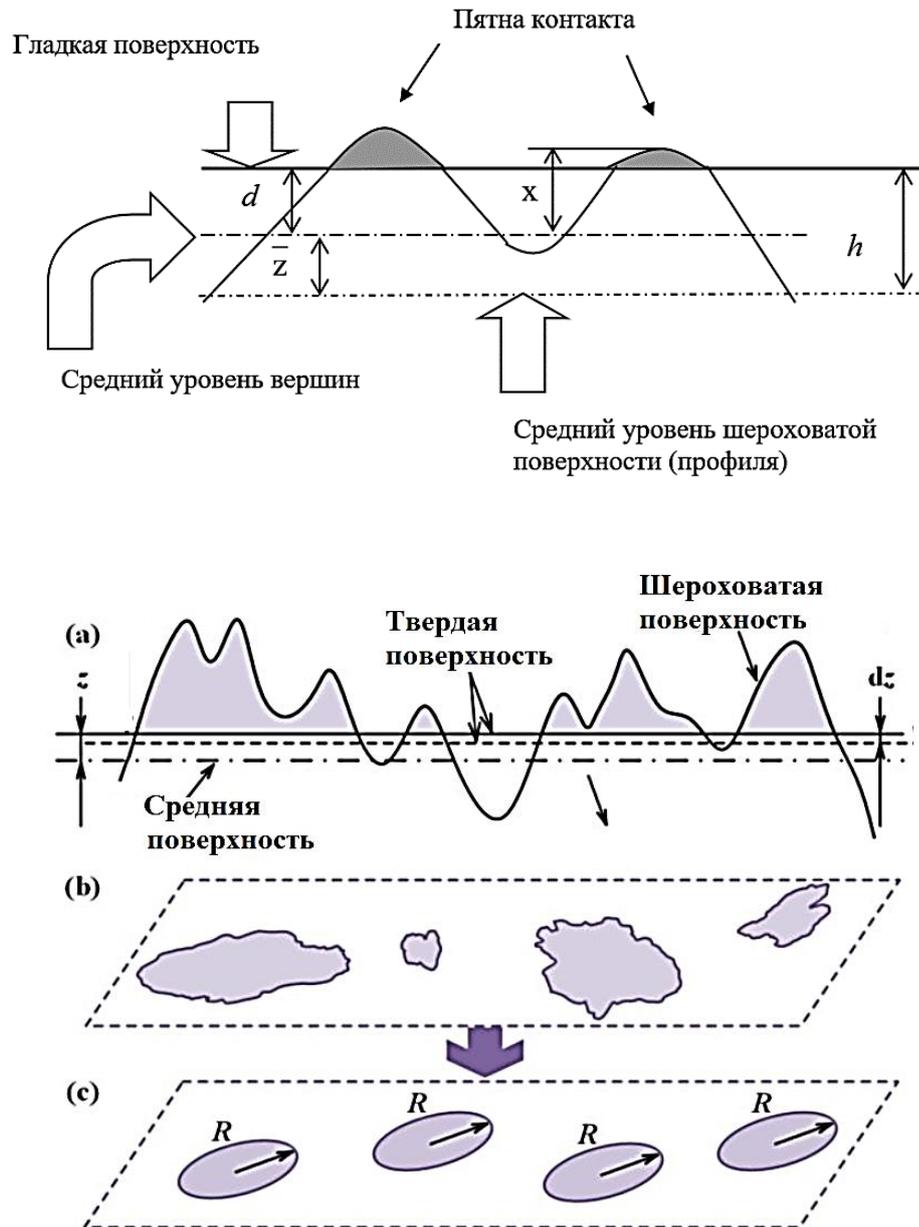


Рис. 3.22. Контакт гладкой поверхности с шероховатой

Расстояние между поверхностями обозначено как h . Для отдельного пятна контакта, находящегося в условиях упругого контакта в соответствии с теорией Герца, запишем зависимости, позволяющие оценить:

- площадь пятна: $A_i = \pi r (x - d), x \geq d;$
- нагрузку: $F_i = (4/3) E' r^{1/2} (x - d)^{3/2}, x \geq d;$
- контактное давление: $p_0 = (2 E' / \pi r^{1/2}) (x - d)^{1/2}, x \geq d;$

Здесь $1/E' = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$ – приведенный модуль упругости, E_1, E_2 – модули упругости материалов тел, находящихся в контакте, ν_1, ν_2 –

коэффициенты Пуассона, r – радиус закругления вершин неровностей.

Вводя переменную $z \equiv x / \sigma_S$, получим $x - d = \sigma_S (z - d / \sigma_S)$. Переменная z подчиняется определенному закону распределения. Здесь отношение d / σ_S представляет собой безразмерное расстояние между поверхностями (полагаем, что $d / \sigma_S = d / Rq$).

Для множественного контакта, используя вышеприведенные зависимости, представим следующие выражения:

- число пятен контакта: $n = D_{SUM} F_0(d / \sigma_S)$;
- фактическая площадь контакта: $Ar = Aa D_{SUM} \pi r \sigma_S F_1(d / \sigma_S)$;
- нагрузка: $F = Aa D_{SUM} (4/3) E' r^{1/2} \sigma_S^{3/2} F_{3/2}(d / \sigma_S)$.

Здесь $F_0, F_1, F_{3/2}$ – функции, выраженные через стандартную функцию гауссовой плотности вероятности $\phi(z)$ и имеющие вид:

$$\phi(z) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(\frac{-z^2}{2}\right)$$

$$F_n(d / \sigma_S) = \int_{d / \sigma_S}^{\infty} (x - d / \sigma_S)^n \phi(z) dz$$

Для преодоления ограничений модели ГВ, выраженных в её допущениях, *Маджумдаром и Бхушаном* была предложена фрактальная модель шероховатой поверхности, которую будем называть модель М-В [75]. *Маджумдар и Бхушан* считают, что “*вследствие того, что меньшие пятна контакта имеют меньшие радиусы закругления, то более вероятно, что они подвергнутся пластической деформации*”. Такой подход противоречит механизму деформации твердых тел в виде шара или цилиндра, рассматриваемые в классической механике контакта, т.е. теории Герца или модели Гринвуда – Вильямсона (G-W) [171]. Причина этого несоответствия происходит из-за предположения в модели G-W о наличии гладкого сферического сегмента в верхней части при деформации неровности $0 \leq \omega \leq \delta$. При определении радиуса верхней части выступа r в модели М-В учитывают фрактальную структуру в отличие от модели G-W, в которой радиус верхней

части выступа характеризуется радиусом скругления r' . Контактное взаимодействие отдельной неровности (пика) фрактальной поверхности с жестким плоским штампом характеризуется тем, что вначале происходит пластическая деформация локальных пиков верхней части неровности ввиду их малого радиуса (рис. 3.23).

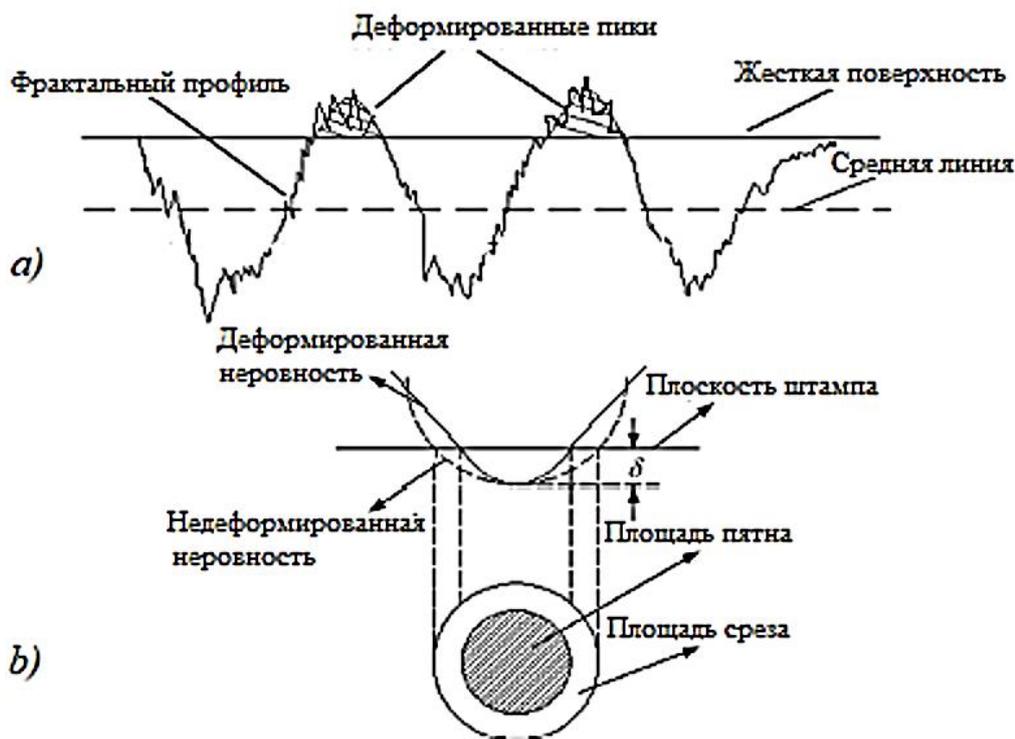


Рис. 3.23. Деформация неровностей: *a* – контакт фрактальной шероховатой поверхности с плоской; *b* – площади пятна и среза верхней части неровности

Увеличение сближения δ приводит к формированию площади пятна контакта, которая растет до тех пор, пока пятно не перейдет в упругое состояние, которое в данной работе определяется критической площадью a_c . Деформация выступа и радиус вершины выступа в соответствии с изотропной функцией W-М [216] соответственно равны

$$\delta = 2^{3-D_p} G^{D_p-1} (\ln \gamma)^{1/2} \pi^{(D_p-2)/2} (a')^{(2-D_p)/2},$$

$$R = \frac{(a')^{D_p/2}}{2^{4-D_p} \pi^{D_p/2} G^{D_p-1} (\ln \gamma)^{1/2}}.$$

Здесь D_p – фрактальная размерность профиля ($1 < D_p < 2$, $D = D_p + 1$); $\gamma = 1,5$.

Площадь среза выступа связана с площадью упругого контакта и выражается зависимостью

$$a' = 2a.$$

Запишем нагрузку на выступ, соответствующую упругому состоянию:

$$F_e^0 = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} \delta^{3/2}.$$

Подставив в это выражение ранее приведенные зависимости, выражающие деформацию и радиус, получим

$$F_e^0 = \frac{2^{4,5-D_p}}{3} E^* \pi^{(D_p-3)/2} G^{D_p-2} (\ln \gamma)^{1/2} a'^{(3-D_p)/2}.$$

Из равенства (в момент перехода из упругого состояния в пластическое)

$$F_e^0 = F_p^0 = H a'$$

найдем критическую площадь контакта

$$a_c = \left[\frac{2^{4,5-D_p}}{3} \pi^{(D_p-3)/2} (\ln \gamma)^{1/2} \left(\frac{E^*}{H} \right) \right]^{2/(D_p-1)} G^2.$$

Здесь $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$; $H = \min\{H_1, H_2\}$; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; H – твердость по Бринеллю. Заметим, что переходный режим упругопластического состояния, в модели Маджумдара - Бхушана не рассматривался.

Множественный контакт. Фактическая площадь контакта шероховатых поверхностей при малых нагрузках состоит из отдельных дискретных пятен контакта. Число пятен, имеющих площадь, большую a , определяется фундаментальной зависимостью Корчака:

$$N(A > a) = \left(\frac{a_L}{a} \right)^{(D-1)/2}$$

Здесь a_L – наибольшая площадь пятна; D – фрактальная размерность поверхности ($2 < D < 3$).

Размерное распределение пятен подчиняется зависимости

$$\frac{dN}{da} = \frac{D-1}{2} a_L^{(D-1)/2} a^{-(D+1)/2}.$$

Найдем площади фактического контакта для пластического состояния:

$$A_{rp} = \frac{F_N}{H}.$$

С другой стороны, для всех пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии ($a < a_c$), имеем

$$A_{rp} = \int_0^{a_c} a \frac{D-1}{2} a_L^{(D-1)/2} a^{-(D+1)/2} da = \frac{D-1}{3-D} a_L^{(D-1)/2} a_c^{(3-D)/2}.$$

Для упругого контакта ($a > a_c$) запишем

$$A_{re} = \int_{a_c}^{a_L} an(a) da = \frac{D-1}{3-D} \left(a_L - a_L^{(D-1)/2} a_c^{(3-D)/2} \right).$$

Нормальная нагрузка, воспринимаемая фрактальной поверхностью, определяется суммой сил, приходящихся на фактические пятна контакта, находящиеся в обоих состояниях

$$F_N = F_{Np} + F_{Ne},$$

Для пластического состояния по всем пятнам контакта получим

$$F_{Np} = A_{rp} H = \frac{D-1}{3-D} a_L^{(D-1)/2} a_c^{(3-D)/2} H$$

Для упругого множественного контакта имеем

$$F_{Ne} = \frac{16}{3} E^* \sqrt{\pi} G^{D-2} (\ln \gamma)^{1/2} \int_{a_c}^{a_L} a^{(4-D)/2} \frac{D-1}{2} a_L^{(D-1)/2} a^{-(D+1)/2} da.$$

Проинтегрировав, запишем

$$F_{Ne} = \frac{D-1}{5-2D} E^* \sqrt{\pi} G^{D-2} (\ln \gamma)^{1/2} \left(a_L^{(4-D)/2} - a_L^{(D-1)/2} a_c^{(5-2D)/2} \right).$$

Тогда фактическая площадь контакта (ФПК) в зависимости от нагрузки выражается следующим соотношением:

$$A_r = \left[\frac{3(3-2D)}{4\sqrt{\pi} E^* D G^{D-1}} \right]^{2/(3-D)} \left(\frac{D}{2-D} \right) F_N^{2/(3-D)}.$$

Таким образом, основные параметры контактного взаимодействия фрактальных поверхностей (площадь пятна контакта и нагрузка) найдены.

3.2.4. Условие перехода от модели Герца к фрактальным моделям

Рассмотрим деформацию отдельного выступа, представляемого гладким сферическим сегментом и в виде фрактального объекта (рис. 3.24).



Рис. 3.24. Профили выступа: а – модель Герца; б – фрактальная модель

Для модели Герца (ГВ) нормальная контактная жесткость, деленная на приведенный модуль упругости, определяется выражением

$$\frac{K_n}{E'} = \frac{1}{E'} \frac{dF}{d\delta} = 2(r')^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{1}{2}}$$

Подставив в это уравнение значение сближения δ , выраженного из формулы $F = \frac{4}{3} E' (r')^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}}$, запишем

$$\frac{K_n}{E'} = \left(6r' \frac{F}{E'} \right)^{1/3}$$

Расчет для модели ГВ проводился при следующих данных: число неровностей $N = D_{SUM} \cdot A_a = 230$; $R_q = 0,45$ мкм; $r = 740$ мкм., $E' = 2 \cdot 10^5$ МПа. Результат расчёта зависимостей $\frac{1}{E'} \frac{dF_N}{d\delta}$ и $\frac{F_N}{E'}$ представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Расчётные данные для построения модели ГВ

Переменные	Значения				
d^*	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
$\frac{1}{E'} \frac{dF_N}{d\delta}$, мкм	1238	998	785	597	434
$\frac{F_N}{E'}$, мкм ²	339	229	138	66	10

Для фрактальной модели использовались эти же параметры шероховатости, а также дополнительно определялись фрактальные параметры. Также для *фрактальной модели*, учитывая, что профиль описывается фрактальной «кривой», отношение контактной жесткости к приведенному модулю упругости выразим следующей зависимостью

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

Величину нагрузки на пятно контакта можно найти по выражению

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

где D – фрактальная размерность; ($1 < D < 2$); G – параметр фрактальной шероховатости; $\gamma = 1,5$, l – размер пятна контакта (диаметр).

Выразив из последнего уравнения отрезок l и подставив его в уравнение оценки контактной жёсткости, после некоторых преобразований получим

$$\frac{K_n}{E'} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{10,188}} \left[\frac{1}{1.182 G^{D-1} (\ln \gamma)^{3/4}} \frac{F}{E'} \right]^{1/(3-D)}$$

В одних координатах (рис. 3.28) представим зависимости нормальной контактной жесткости от нагрузки (в относительных величинах) для модели Герца и для фрактальной модели при выше представленных исходных данных.

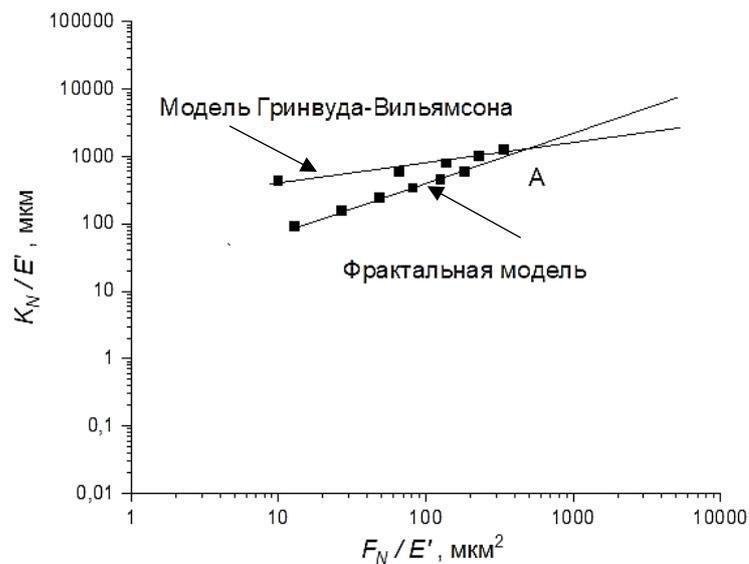


Рис. 3.28. Зависимость нормальной контактной жесткости от нагрузки для модели Герца и фрактальной модели

Для фрактальной модели дополнительно определялись фрактальные параметры: $D = 1,53$; $G = 6,76 \cdot 10^{-6}$ мм; $r' = 0,173$ мм. График имеет переменную градуировку осей, где каждый следующий порядок значений занимает такой же размер, что и предыдущий.

До точки А пересечения прямых, адекватной является фрактальная модель, а затем с увеличением нагрузки более корректно отражает процесс контактного взаимодействия модель Гринвуда-Вильямсона. Нагрузка, соответствующая переходу от одной модели к другой, определяется координатами точки А (для данного примера точка А имеет координаты $\frac{F_N}{E'} \sim 500$ мкм²; $\frac{K_N}{E'} \sim 1000$ мкм). Для контактного взаимодействия стальных поверхностей в данном примере имеем $F_N = 50$ Н и контактную жесткость $K_N = 10^8$ Н/м.

Для оценки номинального давления найдем номинальную площадь, которая равна

$$A_a = \frac{N}{D_{SUM}},$$

где N – число неровностей (в расчетах принято 230); плотность выступов определим по формуле

$$D_{Sum} = \frac{1}{6\pi\sqrt{3}} \frac{m_4}{m_2}.$$

Здесь соотношения для четвертого и второго спектральных моментов [218] имеют вид

$$m_4 = \frac{\pi}{(r/0,375)^2}; \quad m_2 = (0,076R_q^{0,52})^2.$$

При $r = 0,74$ мм; $R_q = 0,45 \cdot 10^{-3}$ мм. получим $D_{Sum} = 10$ мм⁻².

Номинальная площадь контакта и контактное давление, соответствующие переходу от фрактальной модели к модели Гринвуда-Вильямсона, оцениваются следующими величинами

$$A_a = \frac{230}{10} = 23 \text{ мм}^2; \quad p_a = \frac{F_N}{A_a} = \frac{50}{23} = 2,17 \text{ МПа.}$$

Также интерес представляет аналитическая зависимость перехода от фрактальной модели к модели Герца. В этом случае, приравняв решение Герца и решение для фрактальной модели, получим

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

Таким образом, выявлено условие, в соответствии с которым расчет параметров контактного взаимодействия определяется фрактальной моделью для пластического состояния контакта при малых нагрузках и статистической моделью при повышенных нагрузках, когда неровность находится в упругопластическом или упругом состояниях, описываемых моделью Герца.

Сравним полученный результат (нагрузку перехода) с данными, приведенными в работе Порты и Попова [217], в которой нагрузка перехода выражается зависимостью

$$F_{tr} = E' [\zeta(H)^{3H+3} R_q^{-3} L^{3H} (6R)^{H-1}]^{1/(H-2)}$$

Здесь R_q – среднее квадратичное отклонение ординат профиля; L – характерная длина (в расчетах авторы приняли $L = 1$ мм); R – радиус индентора; функция $\zeta(H) = 1,7 / (H + 1)$. Показатель Херста H связан с фрактальной размерностью профиля соотношением $H = 2 - D$.

Сравнительную оценку величин F_{tr} дадим при следующих одинаковых данных: $R = r' = 0,5$ мм; $HR_q = 9 \cdot 10^{-3}$ мм; $E' \cong 10^5$ МПа; $\zeta(H) = 1$. Расчет по Порту и Попову дает $F_{tr} = 2,45$ Н, а по предлагаемой в этой работе методике при этих же условиях имеем $F_{tr} = 5,14$ Н. Разница обусловлена тем, что в подходе Порты и Попова условно принято значение $L = 1$. Если принять соотношение $L = \sqrt{A_a}$, где A_a – номинальная площадь, равная $0,64$ мм² и $L = 0,8$ мм, то нагрузка перехода станет $F_{tr} = 3,51$ Н, что уже ближе к значению $5,14$ Н.

Таким образом, два разных подхода дают близкие по значению результаты, что говорит о правильном направлении исследований.

3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Используя разработанное в данной работе программное обеспечение, можно проводить компьютерное моделирование контактного взаимодействия шероховатых и волнистых поверхностей как на реальных трёхмерных картах, полученных после трёхмерного профилографирования, так и на их моделях. На рис. 3.29 представлено окно разработанной программы по проведению контактного взаимодействия шероховатых поверхностей и оценке параметров контактирования.

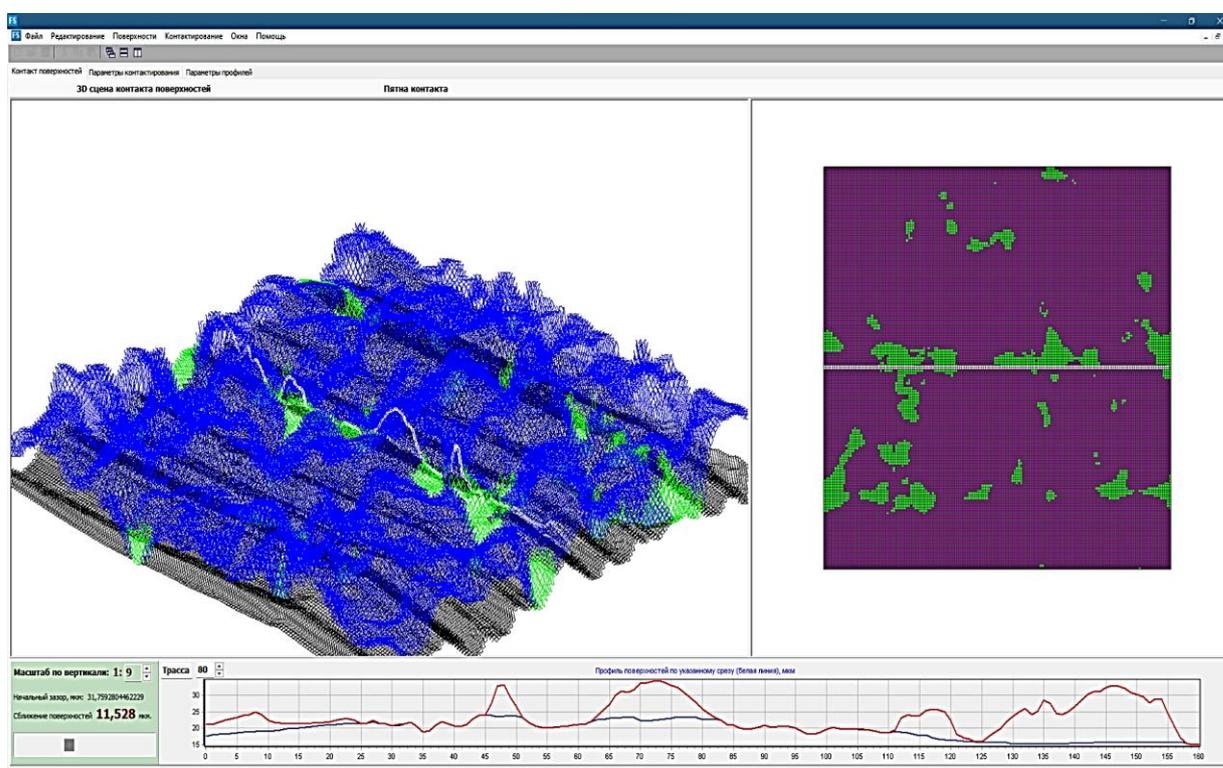


Рис. 3.29. Моделирование контактного взаимодействия поверхностей

Например, сопряжение фрезерованной и шлифованной поверхностей (реальные поверхности после трёхмерного профилографирования на профилометре TalySurf-6) даёт закон распределения площадок пятен контакта $F(a^*) = (a^*)^{1-\alpha} = (a^*)^{0,486}$. Тогда $\alpha = 0,514$, и средняя площадь пятен контакта будет $\langle a \rangle = 0,327a_L$.

Представим *процедуру имитационного моделирования* контактного

взаимодействия шероховатых поверхностей.

1. Загружаем в программу карты интересующих нас поверхностей. Это могут быть карты реальных поверхностей, полученных с помощью трёхмерного профилографирования, или их адекватные модели, которые можно создать в этой же программе по заданным исходным данным (размер карты $X \times Y$, масштаб увеличения по горизонтали и вертикали, число волн в обоих направлениях N и M , среднеарифметическое отклонение профиля Ra , эксцесс профиля γ , фрактальная размерность D_s и т.д.).

2. Вводим в контакт загруженные карты поверхностей. Программа автоматически переворачивает вторую загруженную поверхность, располагает её над первой и определяет высоту расположения второй поверхности H_{max} , т.е. первоначальный зазор (поверхности имеют первоначальное касание). При этом в качестве инструмента у пользователя появляется возможность сближать поверхности на величину δ (в зависимости от состояния пятна контакта вершины будут либо расплющиваться, либо деформироваться упруго, образуя фактические пятна контакта).

3. По имеющейся карте пятен контакта определяем их число и фактический размер, т.е. получаем набор случайных величин a_i^* - фактические площади пятен контакта. Это также можно сделать, зная закон распределения пятен контакта для соответствующей пары сопряжённых поверхностей, как было показано ранее, например, с помощью зависимости $a_i^* = x_{Ri}^{1/(1-\alpha)}$ (здесь $x_R \propto Rav[0,1]$ – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке от нуля до единицы):

4. Определяем, к какому состоянию следует отнести каждую площадь пятна контакта из массива площадей, полученных на предыдущем этапе моделирования, и используя соответствующую зависимость между нагрузкой и площадью пятна, находим величину нагрузки F_i , которую несёт на себе рассматриваемая микронеровность. При этом общая нагрузка на сопряжённые поверхности F_R при рассматриваемом их сближении будет равняться сумме всех сил, воспринимаемых пятнами контакта во всех

состояниях:

$$F_R = \sum_{i=1}^{N_p} F_p + \sum_{i=1}^{N_e} F_e .$$

5. Если заданная нагрузка F , приложенная к сопряжённым поверхностям, превышает расчётную F_R , то это означает, что сближение будет увеличиваться (нагрузочная способность опорной поверхности шероховатого слоя при данном сближении не в состоянии выдержать заданную нагрузку), и следует увеличить сближение и получить новый набор площадей пятен контакта. При меньшей заданной нагрузке сближение следует, наоборот, уменьшить. Процедуру прохода (машинного эксперимента) повторяем до соблюдения условия (ε – заданная ошибка):

$$\frac{|F_M - F|}{F} \leq \varepsilon .$$

С помощью представленного алгоритма и разработанной программы можно провести различные вычислительные эксперименты на трёхмерных картах реальных поверхностей или их моделей. В таблице 3.5 представлены зависимости фактической площади контакта от нагрузки для сочетания моделей поверхностей с разной фрактальной размерностью.

Таблица 3.5

Зависимости ФПК от нагрузки

R_q , мкм	D	G , мм	r_c (радиус в мкм, соотв. переходу от пластичес- кого состояния к упругому)	Зависимость A_r (в мкм ²) от F_N (в Н)
2,5	1,491	$1,011^{-6}$	67	$A_r = 1,143F_N^{2/(3-1.491)}$
3,2	1,476	$1,212^{-6}$	104	$A_r = 3,298F_N^{2/(3-1.476)}$
6,3	1,435	$2,180^{-6}$	406	$A_r = 6,210F_N^{2/(3-1.435)}$

График зависимости фактической площади контакта от нагрузки при разных значениях фрактальной размерности представлен на рис. 3.30.

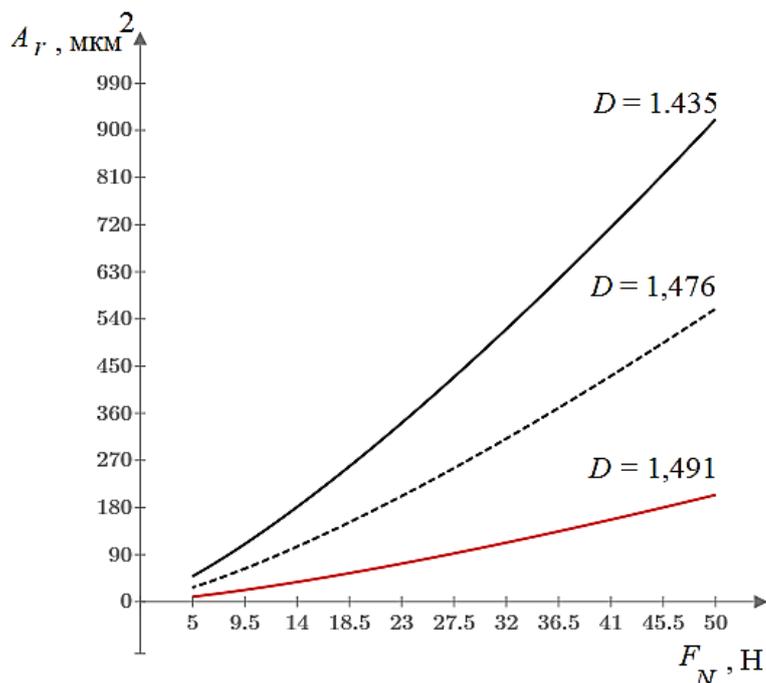


Рис. 3.30. Зависимость фактической площади контакта от нагрузки

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3.30, показывает некоторую нелинейность соотношений. Кроме того, при одной и той же нагрузке фактическая площадь имеет большее значение при уменьшении (в рассматриваемом диапазоне) фрактальной размерности. Рост фактической площади контакта связан с ростом нагрузки $A_r \propto F_N^n, n > 1$.

Дополнительно покажем влияние фрактальной размерности на отношение относительной площади пятен контакта A_r / A_a от максимальной площади пятна контакта. Зависимость относительной площади (опорная площадь) A_r/A_a от сближения определяется выражением

$$\frac{A_r}{A_a} = 0,5 \operatorname{erfc}\left(\frac{\omega}{\sqrt{2}R_q}\right),$$

где A_r – фактическая площадь контакта; A_a – номинальная (геометрическая) площадь; $\operatorname{erfc}(\dots)$ – функция ошибок; ω – расстояние между средними линиями поверхностей; R_q – среднее квадратическое отклонение ординат профиля.

При уменьшении ω (увеличении сближения δ) опорная площадь растет. При $\omega = 0$ функция $erfc(0) = 1$ и $A_a = 2A_r$. Фактическая площадь, состоящая из отдельных пятен, определяется приведенным ранее выражением

$$A_r = \frac{a_{max}^{(1+D/2)}}{a_{min}^{D/2}} \left(\frac{1-\alpha}{2-\alpha} \right), \quad 1 < D < 2.$$

Здесь α – показатель степени функции распределения пятен контакта.

Максимальная площадь пятна контакта при $\omega = 0$ будет равна

$$a_{max} = \pi(R_p tg\theta)^2$$

Здесь R_p – высота сглаживания; $tg\theta = \Delta q$ – наклон неровности по отношению к средней линии.

С другой стороны, $a_{max} = \pi \left(\frac{S_m}{4} \right)^2$, где S_m – статистическая оценка шага неровностей по средней линии. Шаг неровностей по средней линии S_m определяется непосредственно по числу пересечений профиля со средней линией – по числу нулей $n(0)$, отнесенных к выделенной длине профиля

$$S_m = \frac{2}{n(0)}.$$

Экспериментальные данные, полученные при обследовании поверхностей после разных видов обработки [219], приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Параметры шероховатости поверхностей с разной обработкой

Вид обработки	R_q , мкм	R_a , мкм	R_{max} , мкм	$n(0)$, мм ⁻¹	S_m , мкм
Плоское шлифование	3,25	2,51	11,19	15	133,32
	1,70	1,37	4,25	27	74,08
	1,19	0,89	2,42	34	58,82
	0,73	0,56	1,66	51	39,22
Круглое шлифование	0,29	0,23	0,79	140	14,28
	0,14	0,11	0,34	163	12,26
Доводка	0,13	0,11	0,38	183	10,92

Зависимости (по Я.А. Рудзиту [112]) для среднего шага имеют вид

$$S_m = \begin{cases} \frac{2}{200 - 278R_a}, & R_a \leq 0,63 \text{ мкм}; \\ \frac{2}{43 - 11R_a}, & R_a > 0,63 \text{ мкм}. \end{cases}$$

Приняв $a_{min} = 10^{-3}a_{max}$, $\alpha = 0,5$; $D = 1,5$, получим следующее соотношение, позволяющее связать относительную площадь с выбранным видом обработки – плоским шлифованием (табл. 3.7).

$$\frac{A_r}{A_a} = 10^{3D/2} \frac{a_{max}}{3}.$$

Таблица 3.7

Номинальная площадь контакта для фрактальной модели

Вид обработки	R_a , мкм	S_m , мкм	a_{max} , мм ²	A_a , мм ²
Плоское шлифование	2,51	133,32	$3,49 \cdot 10^{-3}$	0,414
	1,37	74,08	$1,07 \cdot 10^{-3}$	0,126
	0,89	58,82	$6,79 \cdot 10^{-4}$	0,080
	0,56	39,22	$3,13 \cdot 10^{-4}$	0,040

На рис. 3.31 представлен график зависимости относительной площади от максимальной площади пятна контакта (для поверхности с разной фрактальной размерностью и $R_a = 1,37$ мкм; $\alpha = 0,5$).

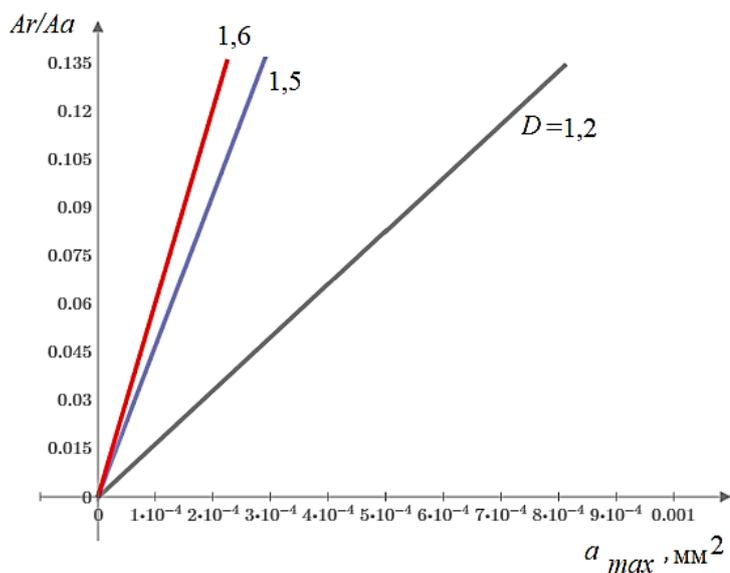


Рис. 3.31. Зависимость относительной площади от макс. пятна контакта

Результат моделирования оказался ожидаемым и подтвердил правильность принятой модели – снижение фрактальной размерности приводит к увеличению размера максимального пятна контакта при прочих равных условиях.

3.4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Экспериментальная оценка параметров контактного взаимодействия проводилась на установке, представленной на рис. 3.32.

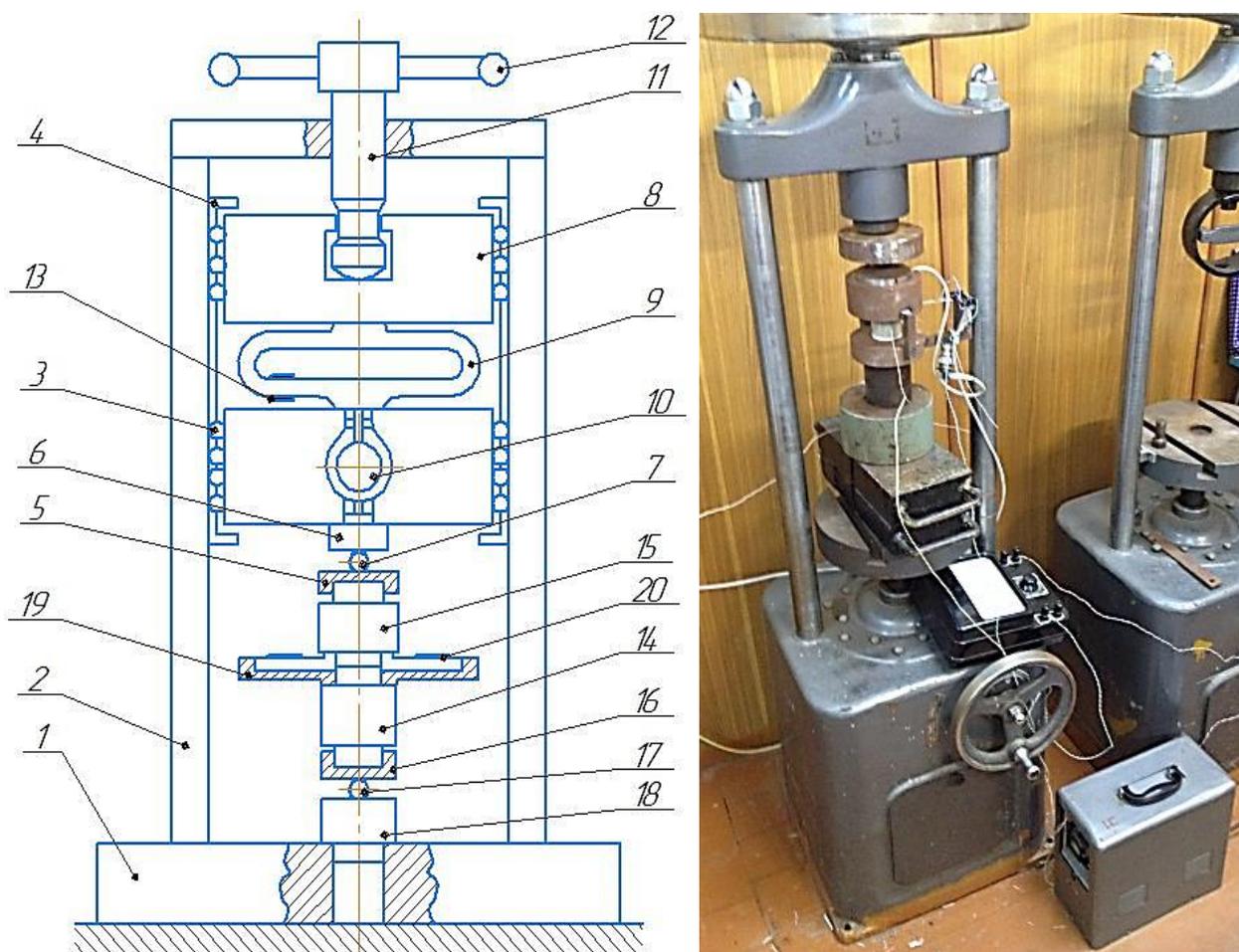


Рис. 3.32. Установка для исследования контактного взаимодействия

Установка представляет собой специальный пресс с массивной нижней плитой 1, направляющими стойками 2, с V-образными пазами для шариков качения 3, удерживаемых сепаратором 4. Нагрузка на образцы передается

через промежуточные тела 5 и 6, шарик 7, промежуточные нажимные элементы 8 с встроенным динамометром 9, индикатором 10, винтом 11, вращаемым ручкой 12. Измерение нагрузки производилось тензодатчиками сопротивления 13, наклеенными на плечи динамометра. Дополнительный контроль нагрузки осуществлялся по индикатору часового типа 10.

При испытании между нижним и верхним образцами 14 и 15 устанавливаются шарики. Образцы, устанавливаются в обоймы 5 и 16, которые через шарик 17 контактируют с промежуточным телом 18, с базированным по центральному отверстию нижней плиты. На нижний образец устанавливается крестовина 19, на упругие балочки которой наклеены тензодатчики 20.

В качестве объектов исследования использовались образцы, рабочие поверхности которых обрабатывались фрезерованием и шлифованием. Образцы представляли собой плоские шайбы с наружным диаметром 20 мм. С помощью автоматизированной информационной системы, включающей профилограф-профилометр, вычислительный комплекс, согласующее устройство и соответствующее программное обеспечение, определялись основные параметры шероховатости и волнистости в двух взаимно перпендикулярных направлениях: поперек и вдоль следов обработки. Разные режимы обработки позволили обеспечить достаточно широкий диапазон изменения входных параметров поверхности, которые представлены в таблице 3.8. Разные режимы обработки позволили обеспечить достаточно широкий диапазон изменения входных параметров поверхности. Так, среднее арифметическое отклонение профиля в продольном и поперечном направлениях составило $Ra_{np} \in [0,31; 0,90]$, $Ra_{non} \in [0,64; 2,30]$, радиусы закругления высот выступов неровностей – $r_{np} \in [44; 704]$, $r_{non} \in [28; 114]$, радиусы волн – $r_{w np} \in [2460; 7640]$, $r_{w non} \in [2190; 9830]$, высоты волн – $Wmax_{np} \in [1,6; 9,1]$, $Wmax_{non} \in [3,0; 9,1]$, твердость всех стальных образцов была одинаковой и равнялась $HB 230... 250$.

Выбор сопряжений производился таким образом, чтобы их параметры

качественно отличались друг от друга. С этой целью был применен кластерный анализ. Проведенный кластерный анализ, используемый как метод классификации многомерных объектов, показал, какие образцы относятся к одной группе (кластеру) по схожести признаков. Анализ проводился с помощью программы *ProClus* [220]. Классификационными признаками являлись все параметры, приведенные в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Геометрические характеристики поверхностей образцов

Номер образца	Ra_{non} , МКМ	Rp_{non} , МКМ	r_{non} , МКМ	r_{wnon} , МКМ	$Wmax_{non}$, МКМ	Ra_{np} , МКМ	Rp_{np} , МКМ	r_{np} , МКМ	r_{wnp} , МКМ	$Wmax_{np}$, МКМ
1	1,94	6,82	64	3080	3,4	0,61	3,11	98	4590	3,4
2	1,51	6,41	64	3680	7,9	0,61	2,41	204	5780	3,0
3	2,30	7,82	35	7540	8,9	0,49	2,73	310	7640	9,1
4	2,15	6,30	50	8980	8,2	0,82	2,78	72	5680	2,9
5	1,59	5,01	114	3600	6,5	0,86	3,06	230	3600	4,0
6	1,57	4,74	55	6170	8,4	0,68	2,91	96	4950	3,3
7	1,25	5,05	29	5830	7,6	0,90	2,83	704	3700	4,6
8	1,91	7,14	33	9830	8,6	0,86	2,65	279	3840	2,9
9	1,51	2,83	33	3510	5,7	0,88	1,38	165	5470	3,7
10	1,37	3,82	28	2670	7,3	0,45	2,11	55	2910	3,9
11	0,64	2,76	59	6290	3,6	0,35	1,57	131	2460	8,2
12	0,82	2,15	26	3000	6,6	0,76	1,69	310	3630	3,4
13	0,78	2,68	37	2190	3,0	0,35	1,18	44	3560	6,0
14	0,75	2,98	34	2590	4,9	0,31	1,86	146	7050	2,2
15	0,82	3,41	96	3670	7,8	0,56	1,92	108	3180	8,5
16	0,89	3,46	51	3180	4,0	0,45	1,23	242	3480	1,6
17	1,32	3,41	54	3740	6,0	0,58	1,37	499	6440	4,8
18	1,30	4,51	37	4360	7,4	0,61	1,85	67	4200	4,5
19	1,31	3,89	88	4430	5,2	0,83	1,53	328	5010	5,8
20	1,20	1,27	40	3700	9,1	0,36	1,81	45	3600	9,0

Результаты кластерного анализа представлены в табл. 3.9. Используя эти данные, были выбраны сочетания образцов, принадлежащих к разным

кластерам, а именно: 5/6 (1С); 4/14 (2С); 8/9 (3С); 3/11 (4С); 1/7 (5С); 10/17 (6С); 2/13 (7С). Зависимость сближения от давления для принятых сочетаний представлена на рис. 3.33.

Таблица 3.9.

Классификация образцов

Кластеры	1	2	3	4
Номера образцов	3,4,6,7,8	1,2,5,9,12,17,19	11,13,14,16	10,15,18,20

Результаты контактного взаимодействия принятых сочетаний и их эквивалентные параметры качества (для модели применялся контакт гладкой поверхности с эквивалентной шероховатой и эквивалентной волнистой) представлены в табл. 3.10.

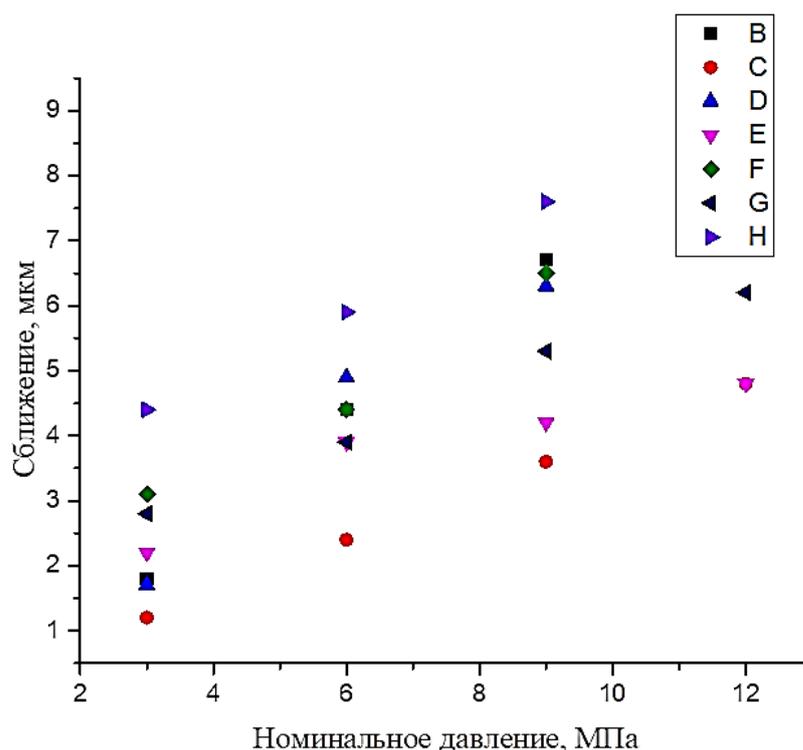


Рис. 3.33. Зависимость сближения от номинального давления для разных сочетаний: В-1С; С-2С; D-3С; E-4С; F-5С; G-6С; H-7С

Приведенные параметры определялись для каждой поверхности сопряжения, а потом значения среднего арифметического отклонения

профиля поверхности, радиуса закругления неровностей и радиуса волны с учетом взаимно перпендикулярных (поперечного и продольного) направлений вычислялись по известным формулам:

$$R_{av} = \max(R_{a\text{поп}}, R_{a\text{пр}}), \quad W_{maxv} = \max(W_{max\text{поп}}, W_{max\text{пр}}),$$

$$r_v = \sqrt{r_{non}r_{np}}, \quad r_{wv} = \sqrt{r_{wnon}r_{wnp}}$$

Таблица 3.10

Сближение поверхностей

Условный номер (сочетание образцов)	Параметры эквивалентной поверхности			Номинальное давление p_a , МПа				
	R_{req} , МКМ	r_{weq} , МКМ	R_{req} , МКМ	3	6	9	12	$\langle K_N \rangle$, Н/МКМ
1С (5/6)	2,80	2180	9,75	$\frac{1,8}{523}$	$\frac{4,4}{428}$	$\frac{6,7}{422}$	$\frac{7,5}{502}$	469
2С (4/14)	2,85	2670	6,20	$\frac{1,2}{785}$	$\frac{2,4}{785}$	$\frac{3,6}{785}$	$\frac{4,8}{785}$	785
3С (8/9)	3,05	2560	9,95	$\frac{1,7}{554}$	$\frac{4,9}{384}$	$\frac{6,3}{448}$	$\frac{7,2}{523}$	477
4С (3/11)	2,99	2590	8,57	$\frac{2,2}{428}$	$\frac{3,9}{483}$	$\frac{4,2}{673}$	$\frac{4,8}{785}$	592
5С (1/7)	2,89	2240	11,85	$\frac{3,1}{304}$	$\frac{4,4}{428}$	$\frac{6,5}{435}$	$\frac{7,8}{483}$	412
6С (10/17)	2,38	1780	7,25	$\frac{2,8}{336}$	$\frac{3,9}{483}$	$\frac{5,3}{533}$	$\frac{6,2}{608}$	490
7С (2/13)	2,13	1740	9,10	$\frac{4,4}{214}$	$\frac{5,9}{319}$	$\frac{7,6}{372}$	$\frac{8,8}{428}$	333

Представленный график дает наглядное представление зависимости сближения твердых тел при наличии шероховатости и волнистости. Как видно из графика, различные сочетания образцов дают широкий разброс экспериментальных данных при довольно близких значениях параметров шероховатости и волнистости. О степени влияния параметров качества сопряженных поверхностей и сближения свидетельствует корреляционная таблица, построенная на основании экспериментальных данных (табл. 3.11).

Парная корреляционная матрица

(в скобках приведены данные при пятом повторном нагружении)

Фактор	Сближение a	Высота сглаживания R_p	Высота волны W_{max}	Радиус волны r_w
a	1,000	-0,154 (-0,465)	-0,040 (0,008)	-0,500 (-0,429)
R_p	-0,154 (-0,465)	1,000	0,324 (0,324)	0,544 (0,544)
W_{max}	-0,040 (0,008)	0,324 (0,324)	1,000	0,268 (0,268)
r_w	-0,500 (-0,429)	0,544 (0,544)	0,268 (0,268)	1,000

Соотношение между экспериментальными и расчетными данными (моделирование контактного взаимодействия моделей поверхностей с эквивалентными параметрами из табл. 3.10 с плоскостью по представленной выше методике) приведены на рис. 3.34.

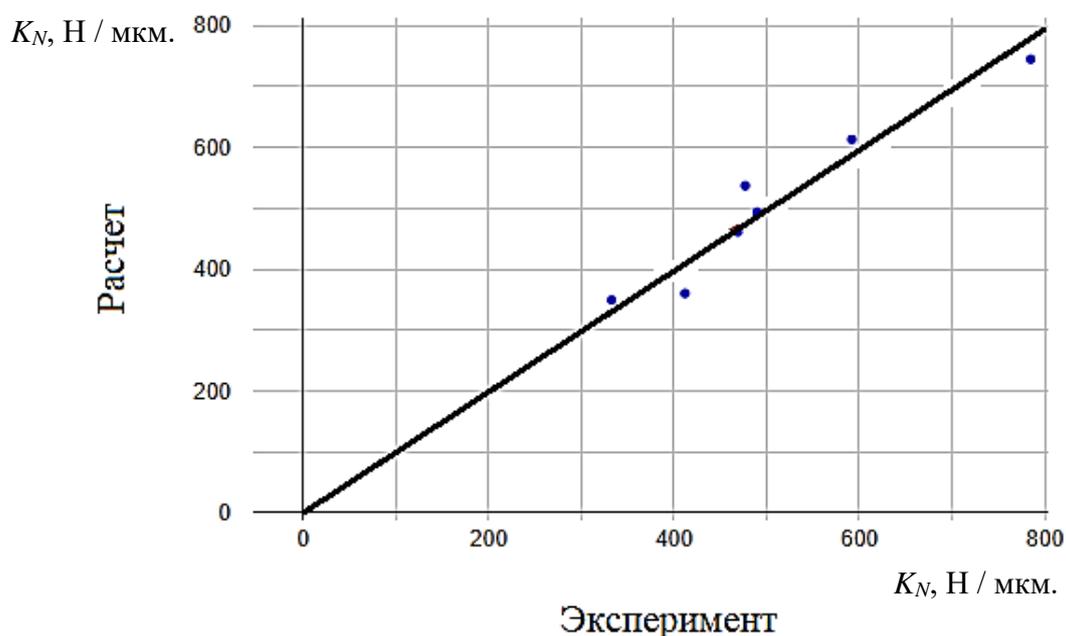


Рис. 3.34. Соотношение между расчетом и экспериментальными данными значений контактной жесткости

Анализ парной корреляции показал практически отсутствие связи между сближением и высотой волны. Относительно радиуса волн отметим

отрицательную корреляционную связь между сближением и радиусом волн. Другие факторы шероховатости для рассматриваемых поверхностей при повышенных давлениях не существенно влияют на выходные параметры контактного взаимодействия. Шероховатый слой, представляемый в виде фрактального объекта, при малых нагрузках определяет зависимость между сближением и нагрузкой.

Анализ результатов показал, что коэффициент линейной парной корреляции между экспериментом (ε) и расчетом (p) равен $r_{\varepsilon p} \approx 0,9313$. Адекватность уравнения регрессии проверялась по критерию Фишера:

- фактическое значение $F_{fact} = \frac{r_{\varepsilon p}^2}{1-r_{\varepsilon p}^2} = \frac{0,9313}{1-0,9313} = 67,8223$;
- критическое (табличное) значение критерия $F_{tabl} = 6,6079$ при $\alpha = 0,05$; $k_1 = 1$; $k_2 = n - 2 = 7 - 2 = 5$.

Так как $F_{fact} > F_{tabl}$, то уравнение регрессии адекватно описывает зависимость контактной жесткости от параметров качества сопряженных поверхностей. Связь между нагрузкой и деформацией δ поверхностного слоя для представленной модели можно выразить следующей регрессионной зависимостью:

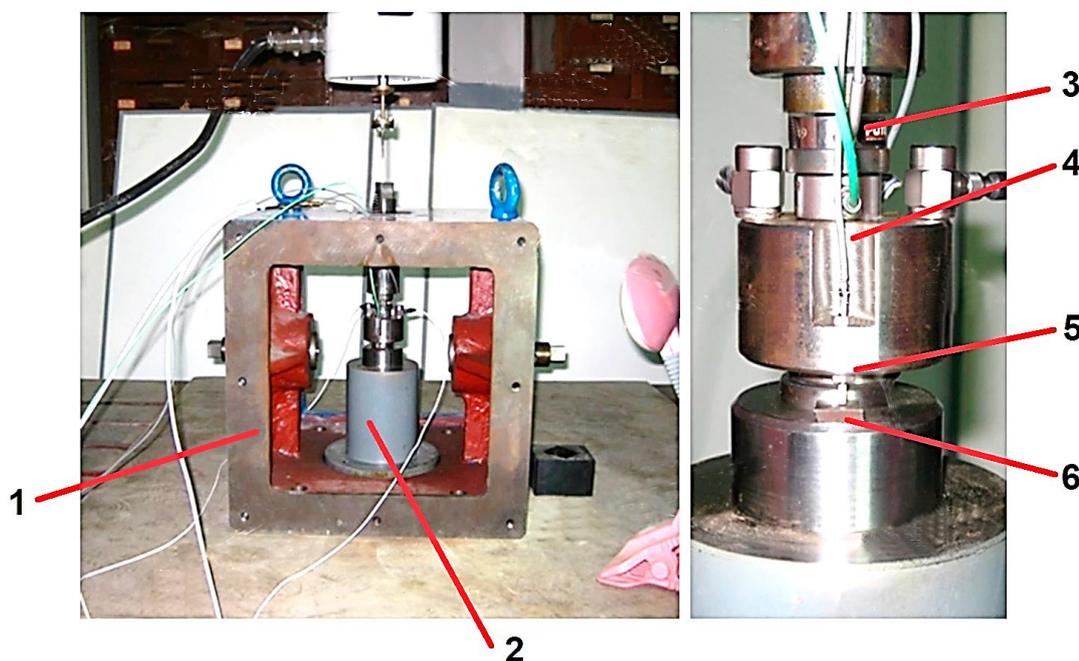
$$F = (350 + 128R_{qeq} + 0,146r_{Weq} - 58R_{peq})\delta.$$

Кроме того, было выполнено сравнение данных модели и эксперимента по оценке сближения шероховатых поверхностей в области малых контактных давлений. Данные эксперимента были получены исследователями Сианьского технологического университета (Китай) на гидравлическом прессе с регистрацией сближения и нагрузки [221]. В качестве образцов использовались плоские шайбы с параметрами микрогеометрии, представленными в таблице 3.12, которые были изготовлены из Стали Q235 (Китай), ближайшим точным аналогом которой является Сталь Ст3кп ГОСТ 380-2005. Физико-механические параметры материала образцов приняты следующими: твёрдость объёмная НВ 66,3, приведенный модуль упругости $E_{np} = 2 \cdot 10^6$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Приведенные характеристики микрогеометрии образцов

Параметр	Образец 1	Образец 2
Ra , мкм.	0.403	1.194
Rq , мкм.	0.417	1.315
D	2.6045	2.5307
G , м	$2.65 \cdot 10^9$	$9.76 \cdot 10^9$

В эксперименте были взяты 2 образца с грубой шероховатостью ($Ra = 1.2$) и относительно гладкой ($Ra = 0.4$); данные о микрогеометрии поверхности образцов были получены на оптическом профилографе *Leica DCM 3D*. Эксперимент по сближению образцов проводился на гидравлическом прессе, представленном на рис. 3.35 с измерением величины нагрузки и сближения.



3.35. Общий вид испытательной установки: 1 – пресс, 2 – гидравлический домкрат, 3 – датчик нагрузки, 4 – датчик сближения, 5 и 6 – образцы.

По исходным данным образцов были смоделированы их фрактальные модели, на которых строился вычислительный эксперимент по сближению

моделей с определением параметров контакта. Результаты сравнения данных эксперимента [221] с моделированием представлено на рис. 3.36.

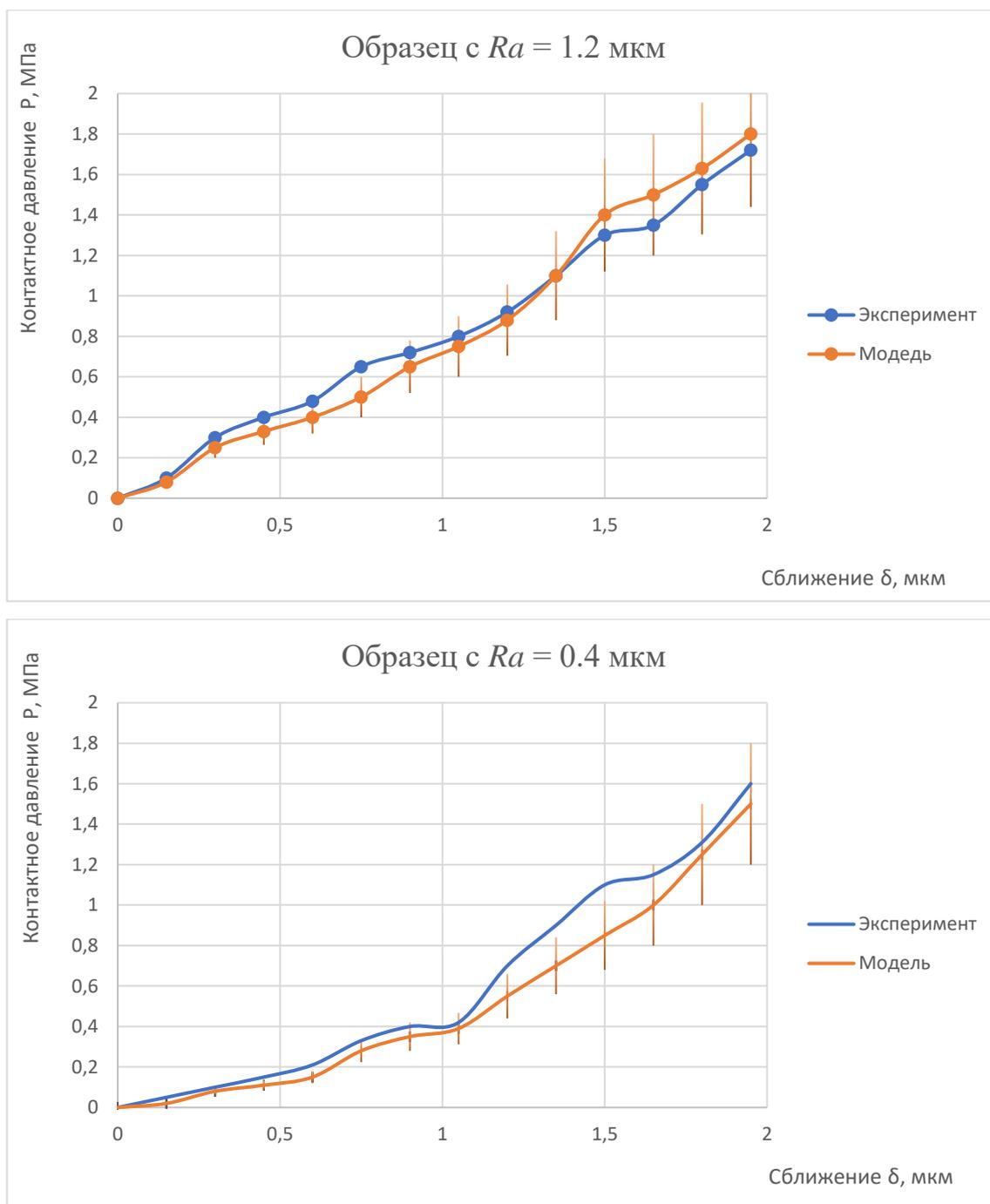


Рис. 3.36. Сравнение данных эксперимента и модели

Результаты сравнения зависимости сближения от контактного давления для реальных образцов и их моделей, представленные на графиках 3.36, дают близкие результаты с погрешностью не более 22%, говоря об адекватности предложенной модели.

3.5. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ

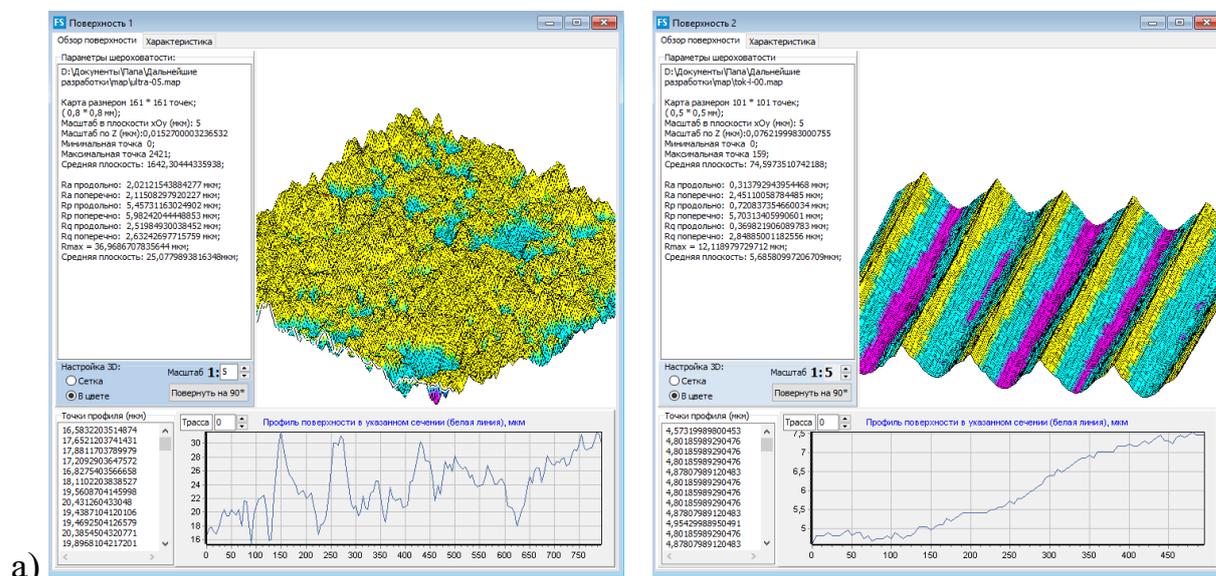
Выше представленные зависимости позволяют определить параметры контактного взаимодействия шероховатых поверхностей при их контактировании. При этом становятся известными величина сближения сопряжённых поверхностей, размер пятен контакта и нагрузка, воспринимаемая микронеровностями. Но гораздо проще решать задачу контактного взаимодействия не двух шероховатых поверхностей, а некоторой эквивалентной поверхности с плоской при адекватной замене последней. В данной работе эта задача была решена своеобразным образом, описанным ниже.

Вопросу оценки эквивалентных параметров поверхности, контакт которой с плоскостью даёт те же характеристики контактного взаимодействия, что и исходные поверхности, посвящено много работ. Но в основном все эти работы основаны на различных математических методиках расчёта эквивалентных параметров или разработки определённой формулы, по которой можно получить эквивалентные параметры поверхности. Очевидно, что такой подход даёт некоторую средне-статистическую оценку эквивалентных параметров и не является геометрически точным при замене конкретных поверхностей, у каждой из которых могут быть свои геометрические особенности. Кроме того, при использовании одних и тех же анизотропных поверхностей, но повернутых друг относительно друга на 90° , мы получим совершенно разную картину контактного взаимодействия, что никак не учитывается предлагаемыми методиками оценки эквивалентных параметров.

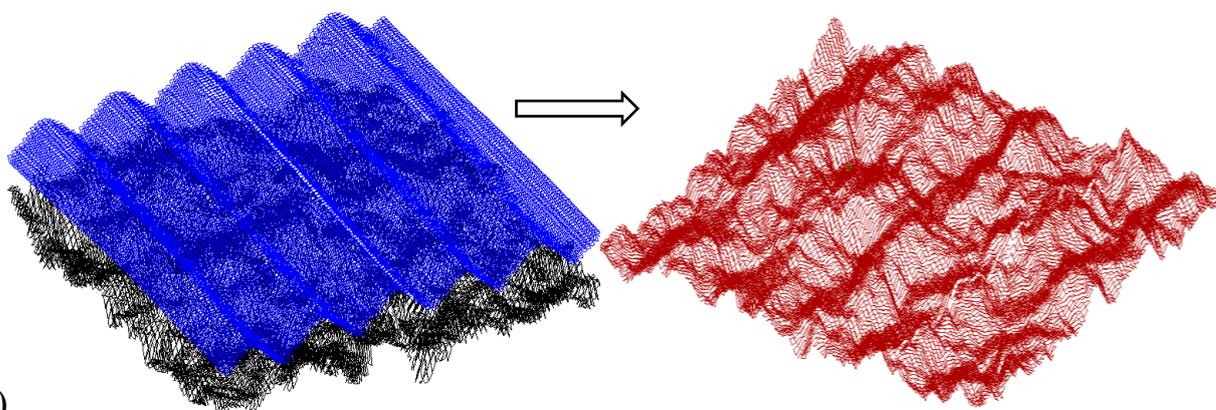
Считается, что если значения высотных параметров сопряженных поверхностей отличаются на порядок, то задача контактного взаимодействия упрощается: рассматривается контакт гладкой поверхности с той шероховатой, у которой высотные параметры существенно выше, чем у сопряженной поверхности. В случае, когда параметры шероховатости сопряженных поверхностей примерно одинаковы, то существуют разные

способы определения параметров эквивалентной поверхности, взаимодействующей с гладкой. В настоящей работе предлагается определять фрактальную размерность эквивалентной поверхности по трёхмерной модели, построение которой показано ниже.

При контакте фрактальных поверхностей возникает сложная геометрическая структура, состоящая как сверху, так и снизу плоскости контакта из микронеровностей, которые соприкасаются друг с другом на разных уровнях, деформируются и образуют в плоскости контакта пятна фактического взаимодействия сложных форм. Для примера на рис. 3.37 а) представлены исходные поверхности, а на рис. 3.37 б) показано их контактное взаимодействие (слева) и модель эквивалентной поверхности (справа).



а)



б)

Рис. 3.37. Исходные шероховатые поверхности а), а также их контактное взаимодействие б) слева и эквивалентная им поверхность б) справа

Контакт модели эквивалентной поверхности с плоской поверхностью полностью адекватно сопряжению исходных поверхностей. Определение параметров эквивалентной поверхности выполнялось двумя особенными способами.

1. *Способ 1.* Исходные модели, используя программное обеспечение в виде трёхмерных карт реальных поверхностей или их моделей, приводились к контакту до сближения, при котором образовывалось наибольшее число отдельных пятен контакта. Применяв подход определения фрактальной размерности «периметр-площадь» описанный в 1 главе, можно по карте пятен контакта найти фрактальную размерность, которой должна соответствовать эквивалентная поверхность. Затем необходимо смоделировать эквивалентную поверхность с этой эквивалентной фрактальной размерностью и рассматривать уже задачу контактного взаимодействия гладкой поверхности с найденной эквивалентной.

Этот способ, как и исследования других учёных, не даёт геометрически точной замены двух исходных поверхностей на контакт эквивалентной с гладкой, но полученное значение эквивалентной размерности учитывает особенности микрогеометрии двух сопрягаемых поверхностей и их взаимное расположение, так как определяется по пятнам фактического контакта, полученных при их контактировании.

2. *Способ 2.* Как и в первом способе, оценка эквивалентных параметров поверхности начинается с построения картины контактного взаимодействия исходных поверхностей. Но в этом случае сближение поверхностей не проводится – поверхности остаются в начальном положении, при котором вторая загруженная поверхность перевернута и размещена над первой в положении, при котором она впервые коснулась другой поверхности (своими микровыступами). При этом мы знаем начальный размер зазора H_{max} , который равен расстоянию от самой глубокой впадины нижней поверхности и самой глубокой впадины верхней поверхности в момент первого касания поверхностей. Далее создаётся новая карта, где будет находится уже

эквивалентная поверхность, и каждая точка новой (эквивалентной) поверхности будет иметь высоту как сумму высот обеих поверхностей в этой точке. При этом получим эквивалентную поверхность, которая при взаимодействии с плоскостью при первоначальном зазоре H_{max} даст картину контактного взаимодействия абсолютно такую же, как и исходные поверхности (рис. 3.38).

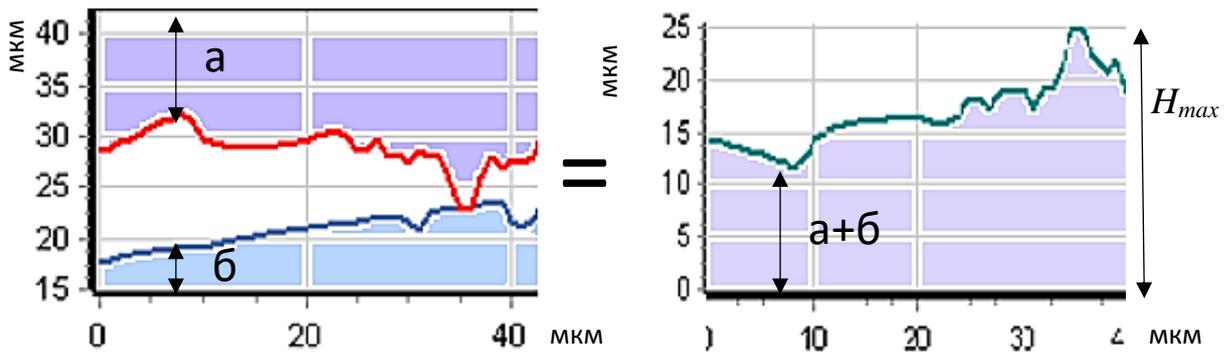


Рис. 3.38. Построение эквивалентной поверхности

На рис. 3.39 показано контактное взаимодействие исходных поверхностей и контакт эквивалентной поверхности с плоскостью.

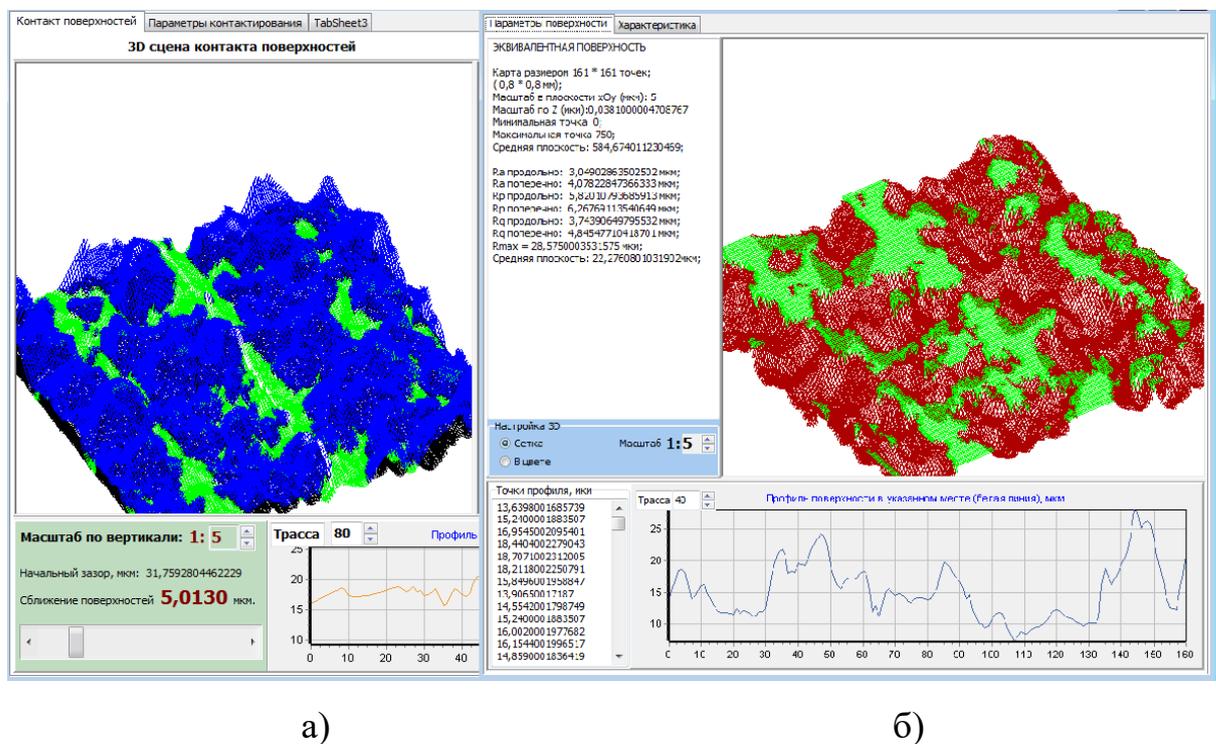


Рис. 3.39. Контактное взаимодействие поверхностей: а) – исходные поверхности; б) – эквивалентная поверхность с плоскостью

По рис. 3.39 совершенно очевидно, что контакт эквивалентной поверхности с плоскостью даёт картину пятен контакта точно такую же, как и контактное взаимодействие исходных поверхностей (из-за ракурса картины и высоты пиков микронеровностей, которые частично перекрывают пятна контакта, создаётся видимость небольшого отличия, но вид сверху даёт абсолютно одинаковые картины пятен контакта). При этом эквивалентная поверхность была построена по 2 способу. После построения эквивалентной поверхности, по ней можно найти стандартными способами (описанными в главе 1) как стандартные параметры шероховатости по ГОСТ 2789-73, так и фрактальные.

Таким образом, используя современные компьютерные технологии, представляется возможным смоделировать эквивалентную фрактальную шероховатую поверхность, геометрически идентичную контакту исходных инженерных поверхностей, и по ней определить параметры, необходимые для расчёта контактного взаимодействия.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Таким образом, по результатам работы, изложенной в главе 3, можно сделать следующие выводы.

- 1. Предложена процедура имитационного моделирования контактного взаимодействия волнистых поверхностей для оценки параметров контактирования на основе разработанных моделей. С помощью планирования факторного эксперимента и разработанного в этой работе программного обеспечения получены регрессионные зависимости для оценки контурной площади контакта и воспринимаемой нагрузки, а также приведено сравнение полученного результата с экспериментом и литературными данными, показавшими адекватность модели.*
- 2. Установлено, что для слабонагруженных сопряжений первичный*

контакт возникает в преимущественно пластическом режиме и хорошо описывается фрактальной моделью, а при переходе большинства пятен контакта в упругое состояние следует применять модель Герца. Кроме того, найдено условие перехода из пластического состояния в упругое, которое определяется критическим размером пятна контакта. Для рассматриваемых поверхностей переход от фрактальной модели к модели Герца происходил при контактном давлении около 2 МПа.

- 3. На основе предложенной методики моделирования контактного взаимодействия фрактальных поверхностей и найденного критерия применимости фрактальной модели и модели Герца, разработана компьютерная программа оценки параметров контактирования поверхностей при одновременном наличии пятен контакта, находящихся в пластическом и упругом состоянии. Сравнение данных модели с экспериментальными данными показало удовлетворительную сходимость результатов и возможность её применения.*
- 4. С помощью моделирования контакта 3D моделей инженерных поверхностей предложены принципы определения параметров эквивалентной поверхности, позволяющей упростить без потери точности расчетов задачу оценки параметров нагруженного контакта двух шероховатых поверхностей путем замены на контакт гладкой поверхности с поверхностью, имеющую эквивалентную шероховатость.*

ГЛАВА 4. ТРЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Коэффициент трения, предсказуемый существующими теориями трения (в частности, теорией Томлинсона (1929 г.), в которой коэффициент трения снижается с ростом нормальной нагрузки и зависит от объемных свойств материалов пары трения – модуля упругости и сдвига, т.е. $f \propto 1 / \sqrt[3]{F}$), имеет большое расхождение с экспериментальными данными. Это означает, что у этих «классических» теорий есть некоторый общий недостаток. Так, современный подход к оценке коэффициента трения, основанной на молекулярно-механической теории, предложенной И.В. Крагельским и его учениками и учитывающей не только физико-механические свойства элементов пары трения, но и качество поверхности, дает в условиях упругого контакта снижение коэффициента трения при росте нагрузки.

Рассмотрение поверхности и процессов, протекающих на микро- и нано уровне, свидетельствуют о том, что их трибологические аспекты являются доминирующими при оценке функциональных свойств поверхности и самого изделия над процессами, которые присущи макроскопической поверхности. В отличие от микросистем, для трибосистем на макроуровне справедливы классические законы трения (пропорциональность силы трения нормальной нагрузке, независимость силы трения при одной и той же нормальной нагрузке от номинальной площади контакта и т.д). Последние достижения касаются применения трибологических принципов для совершенствования процессов микро-производства, разработки методов и оборудования для изучения характеристик трения и износа микроскопических деталей. Применение перспективной технологии проектирования микроскопических систем и слабонагруженных узлов трения будет эффективным, если трибологические принципы, отражающие поведение пары трения на микро- и нано уровне, четко сформулированы и практически реализованы. Особенностью процессов трения и изнашивания, протекающих в микро трибосистемах, является близкое соответствие фактической и номинальной площадей контакта, причём

превалирующая роль отводится адгезионным явлениям. Во всех случаях остаются в силе основные трибологические принципы, которые помогают нам оптимизировать макроскопические трибосистемы и повысить стабильность их характеристик. При повышенных нагрузках процессы контактного взаимодействия определяются макро топографическими параметрами, которые хорошо изучены и отражены в работах И.В. Крагельского, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Дж. Гринвуда, И.Г. Горячевой и др.

При малых нагрузках наблюдается нелинейное увеличение коэффициента трения с ростом нагрузки. Этот факт не объясняется молекулярно-механической теорией. При малых нагрузках механической составляющей коэффициента трения можно пренебречь, и сопротивление относительно движению определяется в основном молекулярным (адгезионным) взаимодействием сопряженных поверхностей. В настоящей работе рассматривается задача идентификации слабонагруженных узлов трения с учетом фрактальной структуры поверхности и особенностей контактного взаимодействия на нанометровом уровне. Решение этой задачи позволит повысить эффективность технологии проектирования слабонагруженных устройств и прогнозировать их поведение в условиях эксплуатации.

Таким образом, в 4 главе рассматривается задача идентификации трения слабонагруженных узлов с учетом фрактальной структуры поверхности и особенностей контактного взаимодействия на нанометровом уровне. Поставленную задачу можно представить в следующих пунктах:

- 1. Рассмотреть трение поверхностей на макроуровне.*
- 2. Разработать методику оценки полного коэффициента трения фрактальных поверхностей для малых нагрузок на микроуровне (шероховатость) при идентификации вида упруго-пластического состояния фактических пятен контакта, на который оказывает влияние микрогеометрия сопряжённых поверхностей.*

3. Разработать методику оценки коэффициента трения на наноуровне (субшероховатость) с помощью применения атомно-силового микроскопа для более точной оценки удельного сопротивления среза фрикционных связей τ_0 .
4. Провести сравнение данных моделирования с экспериментальными значениями для подтверждения правильности моделей.

Решение этих задач позволит повысить эффективность технологии проектирования подобных слабоагруженных устройств и прогнозировать их поведение в условиях эксплуатации.

4.1. ТРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МАКРОУРОВНЕ

На макроскопическом уровне применяется закон Амонтона – сила трения F_f прямо пропорциональна нормальной силе F_N

$$F_f = fF_N,$$

где f – коэффициент трения.

На этом уровне сила трения зависит от природы материалов пары трения. Закон Амонтона широко используют в инженерной практике, принимая средние приближенные оценки коэффициента трения, представленные в таблице 4.1.

Относительно трения без смазочного материала были сформулированы следующие законы трения:

1. Сила трения всегда противодействует движению груза, которое скользит по плоскости.
2. Сила трения пропорциональна нормальному усилию, оказываемому плоскостью на груз.
3. Сила трения не зависит от кажущейся площади контакта.

Позже французский ученый Кулон добавил к законам трения еще одно утверждение:

4. Сила трения не зависит от скорости относительного движения.

Значения коэффициента трения разных материалов

Сочетание материалов	Коэффициент трения скольжения f
Сталь по стали	0,15-0,20
Дерево по стали	0,20-0,50
Сталь по стали при смазке	0,07-0,10
Бронза по чугуну	0,16
Бронза по стали	0,19
Дуб по стали	0,62
Дерево по льду	0,035
Сталь по льду	0,020
Сталь (коньки) по льду	0,015
Резина по пластику	0,20
Шина по сухому асфальту	0,50-0,75
Шина по мокрому асфальту	0,35 - 0,45
Шина по сухому грунту	0,40-0,50
Подшипники скольжения смазанные	0,02-0,08

В зависимости от относительного перемещения между соприкасающимися поверхностями мы можем рассмотреть два вида сил трения. Если между обеими поверхностями нет движения, то существует статическая сила трения F_S (сила трения-покоя), которая предотвращает относительное скольжение груза. Если между обеими поверхностями происходит относительное перемещение, то будет существовать кинетическая сила трения F_k , которая противодействует скольжению тел друг по другу. Сила трения скольжения меньше, чем сила трения покоя $F_k < F_s$.

Предельная сила трения груза, расположенного на наклонной плоскости под углом α , превышение которой приводит к скольжению, определяется зависимостью

$$F_f = f_s G \cos \rho.$$

Здесь f_s – коэффициент трения покоя; G – вес груза; ρ – угол трения.

Так как сила смещения груза $F = F_f$, то можно записать, что

$G \sin \rho = f_s G \cos \rho$. Тогда

$$f_s = \operatorname{tg} \rho.$$

Угол трения ρ определяет половину угла при вершине так называемого конуса трения, в пределах которого действие любой внешней силы F не приводит к началу скольжения. При постоянной скорости скольжения одного тела относительно другого измерение силы трения соответствует кинетической силе, а при ускоренном движении с ускорением a кинетическая сила трения определяется с помощью следующего соотношения

$$f_k = \operatorname{tg} \rho - \frac{a}{g \cos \rho}.$$

Здесь a – ускорение движения; g – ускорение силы тяжести. Например, при ускорении $a = 5,4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ и $\operatorname{tg} \rho = 0,34$ (при скольжении стального блока по стальной наклонной плоскости) получим $f_k = 0,28$.

Результаты проведенных испытаний подтверждают, что динамический коэффициент трения зависит от нескольких факторов. В любом случае при анализе данных следует учитывать, что значения коэффициента трения зависят от веса тела, его относительной скорости и природы материала.

4.2. ТРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА МИКРОУРОВНЕ

Макроскопические исследования, представленные в п. 4.1, обычно не рассматривают влияние шероховатости поверхности трения. Учет волнистости и шероховатости позволяет оценить контурную и фактическую площади контакта. Для пар трения фактическая площадь контакта оказывается намного меньше, чем номинальная (геометрическая) область контакта. Фактическую площадь контакта сложно измерить и для ее оценки используют те или иные приближенные модели контактного взаимодействия. Другие факторы, такие как изнашивание, наличие третьего тела и трибохимические процессы ещё больше усложняют картину трения.

Сила трения определяется реакцией трибологической системы на внешнюю сдвиговую нагрузку и направлена в противоположную сторону.

Учитывая дискретность контакта сопряженных поверхностей, полагаем, что сила трения трибосистемы равна сумме сил трения на отдельных пятнах контакта F_f^0 . Отметим, что состояние пятен контакта может быть разным: упругим, упругопластическим, пластическим. В этом случае можно записать

$$F_f = \sum_{i=1}^{n_e} F_{fei}^0 + \sum_{j=1}^{n_{ep}} F_{fepj}^0 + \sum_{k=1}^{n_p} F_{fpi}^0.$$

При оценке силы трения, кроме таких параметров шероховатого слоя, как арифметическое среднее ординат поверхности (профиля), радиус верхней части выступа и др., а также физико-механических свойств деформируемого полупространства, необходимо знать закон распределения высот выступов.

В соответствии с молекулярно-механической теорией, предложенной И.В. Крагельским (1939 г.) и развиваемой его учениками, коэффициент трения определяется зависимостью

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{мех}}$$

где молекулярная составляющая при упругом и пластическом контакте представляется в виде

$$f_{\text{мол}}^e = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta; \quad f_{\text{мол}}^p = \frac{\tau_0}{HB} + \beta,$$

а механическая составляющая коэффициента трения равна

$$f_{\text{мех}} = k\sqrt{h/r}$$

Здесь τ_0 – удельное сопротивление срезу фрикционных связей при нулевом контактном давлении; p_r – фактическое давление; β – коэффициент, определяющий упрочнение фрикционных связей; HB – твердость по Бринеллю; k – коэффициент, зависящий от состояния пятна контакта; h – глубина внедрения в деформируемое полупространство; r – радиус шара индентора.

В 1 главе было показано, что в области малых нагрузок представленные уравнения И.В. Крагельского дают ошибочные результаты, т.е. при стремящемся контактном давлении $p_r \rightarrow 0$ коэффициент трения $f \rightarrow \infty$.

Очевидно, что в этой области действуют иные законы трения, которые установим на основе разработанных фрактальных моделей поверхностей.

Рассмотрим модель элементарного взаимодействия неровностей фрактальных шероховатых поверхностей (рис. 4.1).

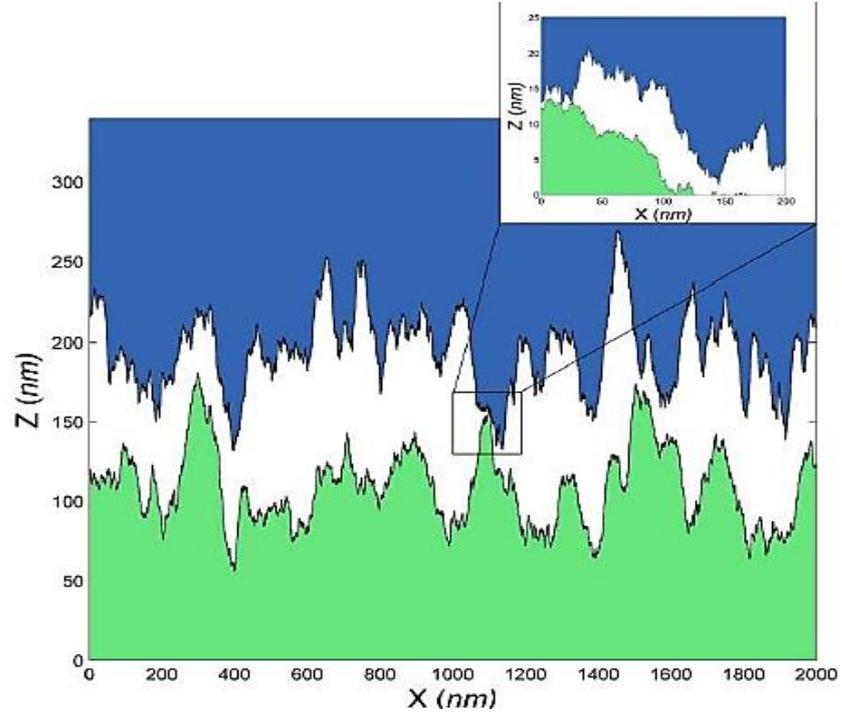


Рис. 4.1. Контактное взаимодействие фрактальных поверхностей

Схема контакта микровыступов шероховатых поверхностей и их силовые взаимодействия представлены на рис. 4.2.

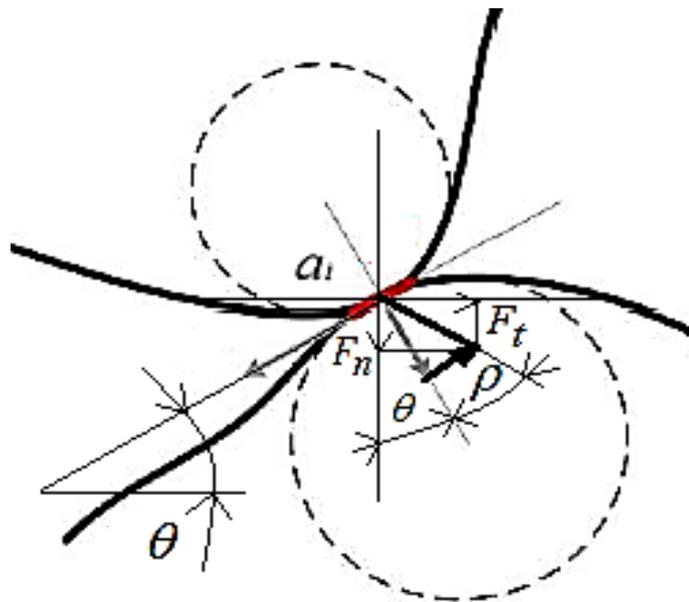


Рис. 4.2. Схема контактного взаимодействия неровностей

Здесь a_i - площадь пятна, которая предполагается равноценной с ее проекцией ввиду малого угла наклона неровностей θ . В соответствии с балансом сил (рис. 4.2), действующих на один контакт микронеровностей, и учитывая, что в согласии с законом Амонтона $F_f = f \cdot F_N$, запишем:

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

где θ – угол наклона неровностей; ρ - угол трения, под которым подразумевается молекулярная составляющая коэффициента трения.

Рассматривая множественный контакт микронеровностей, найдём фактический коэффициент трения как средний по всем пятнам контакта

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ni} \frac{tg \theta_i + tg\rho}{1 - tg\theta_i \cdot tg\rho}}{\sum_{i=1}^n F_{ni}} = \frac{tg\theta_{cp} + tg\rho}{1 - tg\theta_{cp} \cdot tg\rho}$$

Профиль отдельной неровности [221] можно описать следующим выражением

$$z(x) = G^{D-1} l^{2-D} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right), \quad -\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}, \quad 1 < D < 2.$$

Наклон неровности можно найти так

$$\theta = \left. \frac{dz}{dx} \right|_{x=-l/2} = \pi G^{D-1} l^{1-D}.$$

Полагая, что $l \cong a^{\frac{1}{2}}$, окончательно запишем

$$\theta = \pi G^{D-1} a^{(1-D)/2}.$$

Угол θ для типичных шероховатых поверхностей, сформированных после разных видов обработки (шлифование, фрезерование, ...), обычно не превышает 10° . Расчет дает оценку деформационной составляющей, равной $f_d = 0,037$, что примерно на порядок меньше адгезионной составляющей коэффициента трения. На рисунке 4.3 представлена зависимость среднего угла наклона микронеровностей от фрактальной размерности для поверхностей со средней арифметической высотой микронеровностей $R_a = 0,4$ мкм. и $R_a = 1,2$ мкм. для площадки размером $a = 50$ мкм² и $G = 10^{-4}$ мкм.

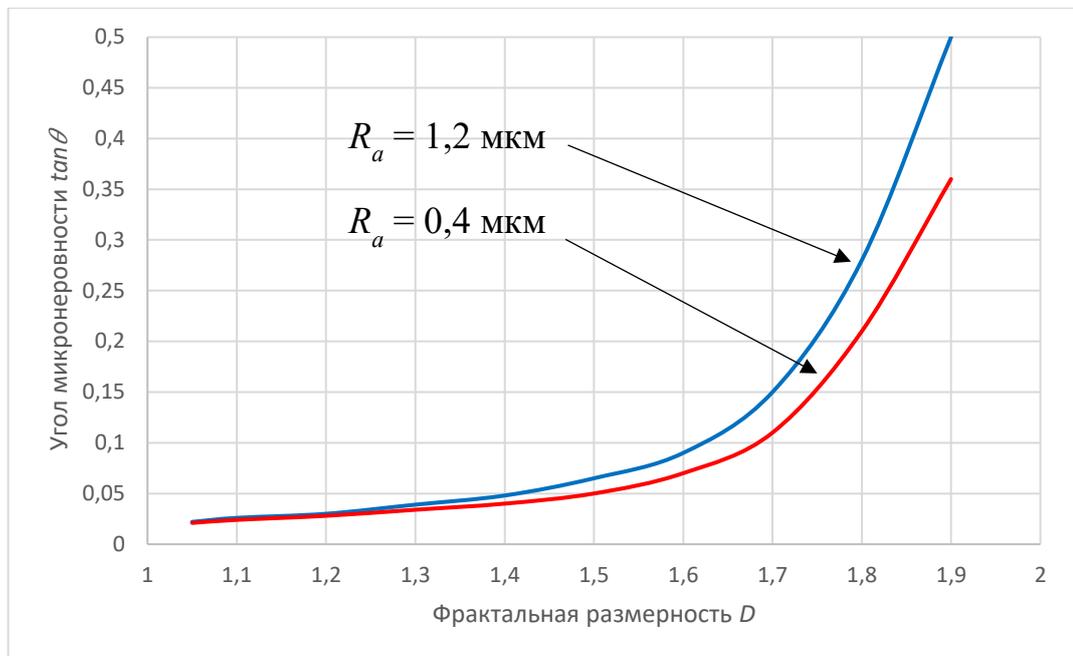


Рис. 4.3. Зависимость угла θ от фрактальной размерности D

Анализируя представленные зависимости можно сделать вывод, что для поверхностей с фрактальной размерностью до $D < 1.4 \dots 1.5$ средний угол наклона микрошероховатостей является небольшим (для данных поверхностей до 4°) и растёт медленно с ростом D , что говорит о том, что в этом случае вклад деформационной составляющей коэффициента трения в общую сумму незначителен. Для поверхностей с фрактальной размерностью профиля больше $D > 1.5$ угол наклона микрошероховатостей резко увеличивается, из-за чего деформационная составляющая коэффициента трения начинает преобладать над адгезионной.

Учитывая полученную зависимость угла наклона от фрактальной размерности, а также то, что под углом трения ρ подразумевается молекулярная составляющая коэффициента трения в согласии с теорией Крагельского, перепишем выражение для коэффициента трения как

$$f_i = \frac{\operatorname{tg} \left[\pi G^{D-1} a_i^{(1-D)/2} \right] + f_a}{1 - \operatorname{tg} \left[\pi G^{D-1} a_i^{(1-D)/2} \right] f_a}.$$

Молекулярная составляющая коэффициента трения оказывает существенное влияние на полный коэффициент трения для поверхностей с

фрактальной размерностью $D < 1.4 \dots 1.5$, где микровыступы находятся преимущественно в упругом состоянии. Для этого случая найдем молекулярную составляющую коэффициента трения с помощью выражения

$$f_a = \frac{A_r \tau_0}{F_e} + \beta.$$

Здесь τ_0 – удельное сопротивление срезу фрикционных связей при нулевом контактном давлении (в расчетах принято значение $\tau_0 = H/8$); β – коэффициент, учитывающий упрочнение адгезионных связей в результате приложения контактной нагрузки ($\beta = 0,05$ [222]).

Для получения количественной зависимости коэффициента трения от параметров контакта примем следующие допущения:

- для всех структурных составляющих (по глубине поверхностного слоя) модуль упругости один и тот же;
- при оценке фактической площади не учитывается площадь пластически деформируемых пятен;
- в качестве величины удельного сопротивления срезу фрикционных связей при действии сдвига взята доля предела текучести, зависимой от нагрузки и макро-твердости материала основы.

Тогда коэффициент трения без учета механической составляющей будет

$$f_a = \frac{A_r(F_N)\tau}{F_N}.$$

В соответствии с моделью Маджумдара-Бхушана [221] запишем

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

где A_r – фактическая площадь контакта; D – фрактальная размерность ($1 < D < 2$); a_L – площадь максимального пятна контакта.

Нагрузка на пятно контакта с площадью a' определяется после некоторых преобразований с помощью выражения

$$F_N = \int_0^{a_L} \frac{2E}{3\pi} G^{D-1} a'^{(1-D)/2} da' = \frac{4EG^{D-1}}{3\pi(3-D)} \left(\frac{2-D}{D}\right)^{2/(3-D)} A_r^{(3-D)/2}.$$

Здесь E – модуль упругости; G – параметр фрактальной шероховатости.

Фактическая площадь равна

$$A_r = \left[\frac{3\pi(3-D)}{4EG^{D-1}} \left(\frac{D}{2-D} \right)^{2/(2-D)} \right]^{2/(3-D)} F_N^{2/(3-D)}.$$

Тогда молекулярную составляющую определим с помощью выражения

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

Например, при $R_a = 0,63$ мкм. молекулярная составляющая коэффициента трения оказалась равной $f_a = 0,011$, а при $R_a = 1,25$ мкм. она увеличилась до $f_a = 0,014$. Для фрактальной размерности $D > 1,5$ молекулярная составляющая коэффициента трения с ростом фрактальной размерности падает (табл. 4.2).

Покажем зависимость коэффициента трения от фрактальной размерности на примере контакта моделей поверхностей. Для примеров были взяты фрактальные модели поверхностей из Стали 45 ($E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0.3$), $G = 7,2 \cdot 10^{-6}$ мм; $\tau_0 = 100$ МПа, $\beta = 0,07$, размер площадки моделирования 0.8×0.8 мм, $R_a = 0,4$ мкм.

Таблица 4.2

Коэффициент трения между фрактальными поверхностями

R_a , мкм	D	f_a
0,63	1,563	0,026
1,25	1,520	0,029
2,50	1,477	0,031

На основе представленных выше зависимостей и разработанного программного обеспечения проводилось моделирование контакта фрактальных поверхностей с указанными параметрами и оценивался полный коэффициент трения с учётом контактного взаимодействия поверхностей. На рис. 4.4 показана зависимость коэффициента трения от фрактальной размерности для преимущественно упругого контакта при $D = 1.1 \dots 1.5$.



Рис. 4.4. Зависимость коэффициента трения f от размерности $D < 1.5$

В расчёте каждый раз создавались фрактальные поверхности с переменной фрактальной размерностью и неизменными остальными факторами. Здесь из-за малого угла наклона микронеровностей фактически $tg(\theta) = \text{const}$, и поэтому деформационная составляющая коэффициента трения практически не оказывает влияние на полный коэффициент трения. Адгезионная (молекулярная) составляющая определялась по формуле

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

Для поверхностей с фрактальной размерностью $D > 1.5$ ситуация кардинально меняется (рис. 4.5). С ростом фрактальной размерности увеличивается изрезанность поверхности, из-за чего размер максимального пятна фактического контакта продолжает уменьшаться, но не так интенсивно, как для участка $D < 1.5$, поэтому адгезионная составляющая коэффициента трения практически не изменяется, и условно можно принять $f_a = \text{const}$. Но с ростом угла наклона микронеровностей (довольно резко) растёт деформационная составляющая коэффициента трения, поэтому на этом участке полный коэффициент трения растёт, причём более интенсивно, чем

снижался на предыдущем участке.

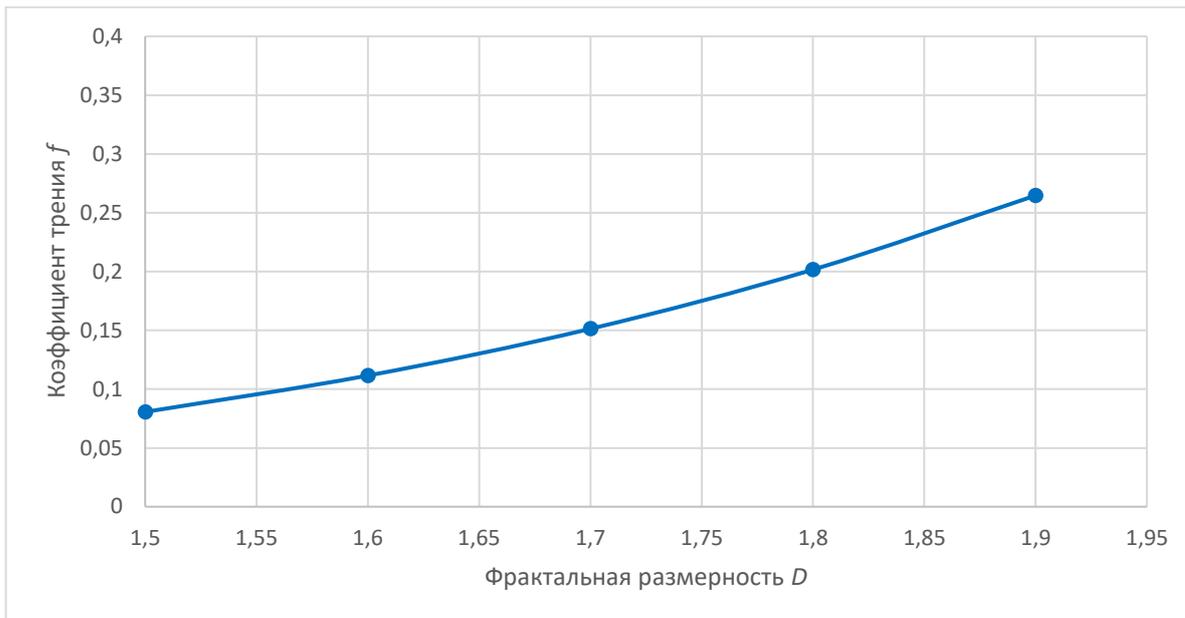


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента трения f от фрактальной размерности $D > 1.5$

Например, аппроксимирующая функция роста среднего угла наклона микронеровностей поверхностей (рис. 4.3) имеет вид

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

Проведём сравнение значений коэффициента трения на отдельном пятне контакта для модели Герца и фрактальной модели. Для этого рассмотрим контакт плоского штампа с отдельным выступом в виде сферического гладкого сегмента (модель Герца) и выступа, имеющего фрактальной очертание. Коэффициент трения (адгезионная составляющая) определяется зависимостью:

- По Герцу

$$f_{a\ hz} = \frac{\tau a}{F_N^0} = \frac{\pi\tau \left(\frac{3r'}{4E}\right)^{2/3}}{(F_N^0)^{1/3}};$$

- фрактальная модель

$$f_{a\ fr} = \tau \left(\frac{3}{4E\sqrt{\pi}G^{D-1}}\right)^{\frac{2}{3-D}} (F_N^0)^{\frac{D-1}{3-D}}.$$

При равенстве исходных факторов сравним значения коэффициента трения, рассчитанные по разным моделям (рис. 4.6).

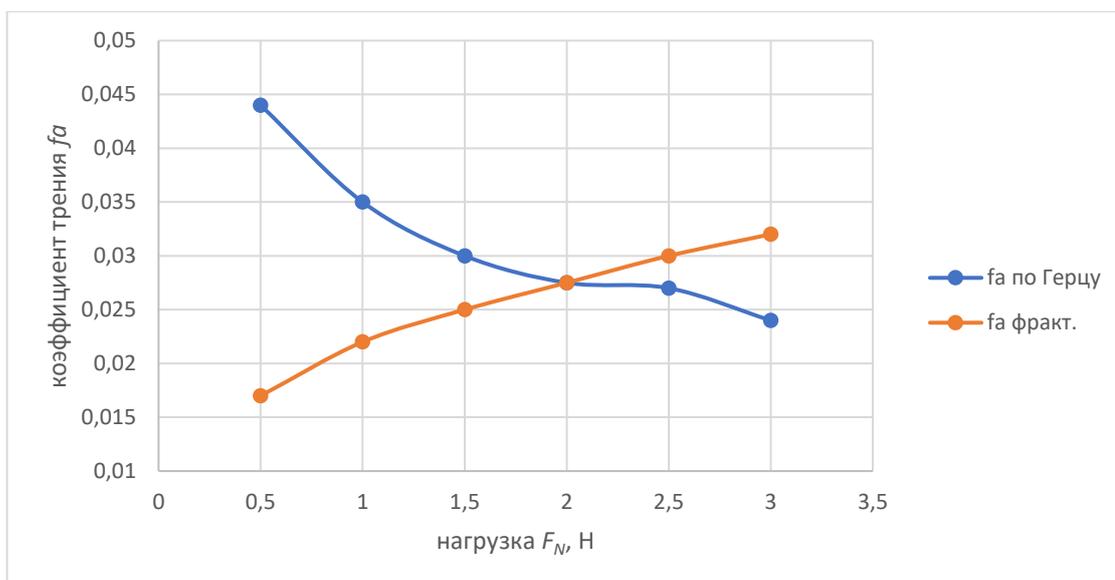


Рис. 4.6. Сравнение зависимостей коэффициента трения f_a от нагрузки F_N для модели Герца и фрактальной модели

В сравнительных расчетах принято: фрактальная размерность $D = 1,52$; $G = 7.451 \cdot 10^{-3}$ мкм; радиус верхней части неровностей для сравниваемых моделей равен $r' = 78$ мкм. Анализ зависимостей на рис. 4.6 показывает, что молекулярная составляющая коэффициента трения, согласно модели Герца, падает с ростом нагрузки, а для фрактальной модели, наоборот, происходит рост с увеличением нагрузки. Для модели Герца нагрузка находится в знаменателе, а для фрактальной модели – в числителе. С физической точки зрения характер этих зависимостей можно объяснить следующим образом: для фрактальной модели темп роста фактической площади контакта превышает рост нагрузки (вогнутая кривая графического изображения зависимости силы трения от нагрузки), а для модели Герца характерна выпуклая кривая зависимости.

Таким образом можно сделать вывод, что до нагрузки примерно в 2 Н коэффициент трения подчиняется фрактальной модели, а после – модели Герца. При малых нагрузках фрактальная модель для оценки коэффициента

трения является справедливой, а при повышенных нагрузках следует использовать модели, основанные на теории Герца, в частности приемлемой является модель Гринвуда-Вильямсона.

Адекватность модели трения фрактальных поверхностей.

Рассматривая многоуровневую структуру поверхностного слоя, подверженного процессам трения и изнашивания, существуют разные подходы при оценке параметров трения на нано-уровне и на уровне шероховатости. Полученные в этой работе результаты показывают, что коэффициент трения растет с увеличением нагрузки, в то время как результаты исследований на нано уровне и шероховатости показывают обратное соотношение. С физической точки зрения рост коэффициента трения происходит потому, что при увеличении нагрузки приращение площади контакта происходит интенсивнее, чем приращение нагрузки.

Эффект масштаба сказывается на характере изменения коэффициента трения. В общем виде зависимость между силой трения и нагрузкой на трибосистему можно представить так:

$$F_f \propto F_N^n$$

Если контактное взаимодействие возникает на нано-уровне, то для этого случая характерен показатель степени $n < 1$, а для фрактальной шероховатости (микро-уровень) характерно $n > 1$. Трибологические характеристики мульти-масштабного контактного взаимодействия можно представить так:

- Нано-уровень (рис. 4.7 а). При постоянном удельном сопротивлении срезу τ молекулярных связей и зависимости $A_r \propto F_n^m$, $m < 1$, получим

$$f \propto \tau \frac{dA_r}{dF_n} \quad \text{и} \quad f \propto F_n^{m'}, \quad m' < 0.$$

На этом уровне нагрузка выражается в нН, а площадь в нм².

- Микроуровень (рис. 4.7 б). Трение фрактальных поверхностей характеризуется следующими соотношениями: $A_r \propto F_n^m$, $m > 1$. Тогда

$$f \propto \tau \frac{dA_r}{dF_n} \quad \text{и} \quad f \propto F_n^{m'}, \quad m' > 0.$$

На этом уровне нагрузка выражается в мН, а площадь в мкм².

- Макроуровень, включая волнистость (рис. 4.7 в). Изменение площадей контакта (фактической и контурной) и коэффициента трения качественно не отличается от трибологических процессов, протекающих на наноуровне. Нагрузка на этом уровне выражается в мН, а площадь в мкм².

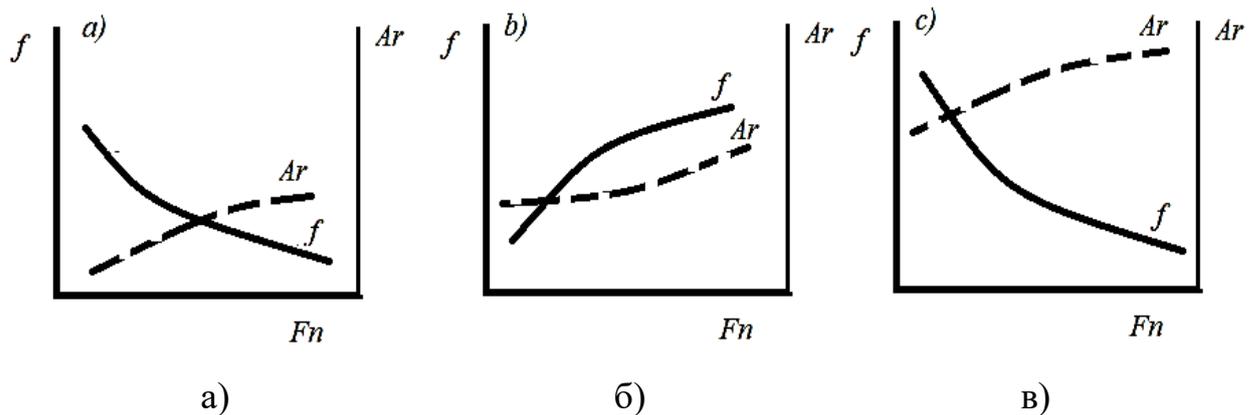


Рис. 4.7. Типичные зависимости площади контакта и коэффициента трения от нагрузки при упругом мульти масштабном взаимодействии поверхностей

Подтверждение тому, что трибологические характеристики зависят от масштаба рассмотрения поверхности, можно найти в работе [223]. Зависимости коэффициента трения от нагрузки для разных условий испытаний показаны на рис. 4.8 (копия графика из работы [223]). Испытания проводились на машине трения на образцах в виде зубчатых колёс с параметрами: модуль $m = 6$ мм., число зубьев $z = 24$, материал – сталь 34 ХНМ с термообработкой поверхностей до HRC 56 ... 61. Контробразец имел зубья, полированные до $R_a = 0,08$ мкм, а поверхности зубьев образцов были $R_a = 2.15, 0.78, 0.26, 0.16, 0.045$ и 0.02 мкм. При этом эксперименты проводились при фиксированных скоростях ($V = 0.5, 1.9$ и 3.2 м/с) и плавно меняющейся нагрузке. Анализ экспериментальных данных (рис. 4.8) показал, что при всех скоростях относительного скольжения коэффициент трения оказался меньше для более гладкой поверхности.

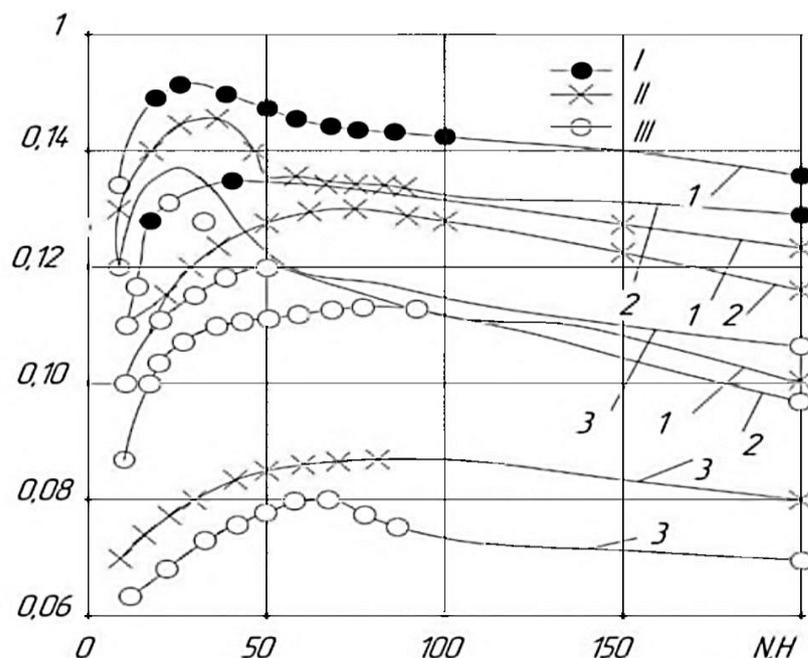


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента трения-скольжения от нагрузки при $V = 0.5$ м/с (I), 1.9 м/с (II), 3.2 м/с (III) для образцов с $Ra = 0.8$ мкм. (1), 0.16 мкм. (2), 0.02 мкм. (3)

Учитывая, что с уменьшением среднего арифметического отклонения ординат профиля поверхности растет фрактальная размерность, можно подтвердить ранее полученный вывод о том, что рост фрактальной размерности приводит к снижению коэффициента трения для упругого контакта поверхностей. Также данный эксперимент подтверждает, что при малых нагрузках коэффициент трения растет аналогично предлагаемому в данной работе подходу к оценке трения.

Математическая обработка результатов экспериментальных исследований позволила авторам (А.Н. Шелковой и др.) установить, что нагрузка, соответствующая максимальному значению коэффициента трения, на 49 % коррелирована с шероховатостью поверхности трения и на 30 % со скоростью скольжения. На рис. 4.9 представлен график сравнения данных фрактальной модели и модели Герца по оценке полного коэффициента трения в зависимости от нагрузки с данными эксперимента из работы [223]. Данные эксперимента показаны сплошной линией с точками данных, а данные

моделирования представлены для фрактальной модели и модели Герца линиями, переходящими в штриховые для областей, где они дают ошибочные результаты.

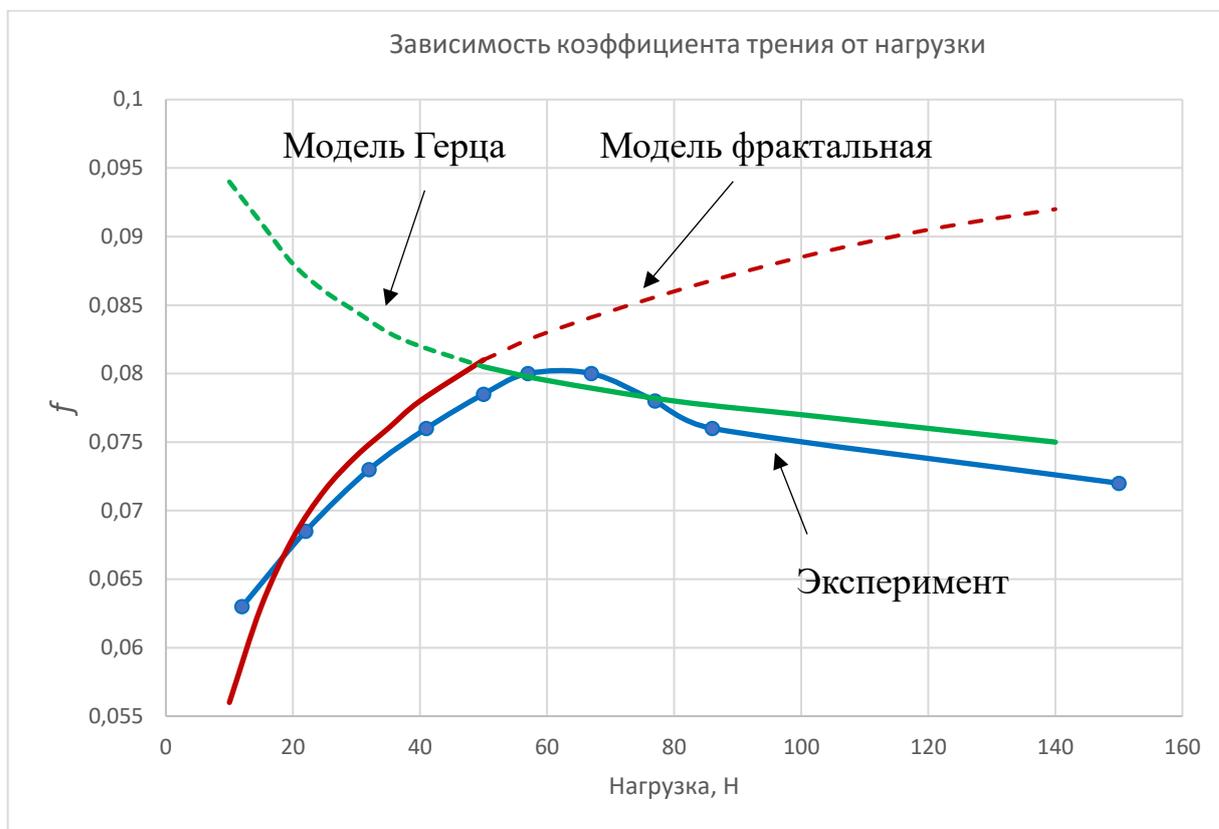


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента трения f от нагрузки F_N , Н для данных эксперимента и моделей по Герцу и фрактальной модели

До нагрузки в 50 Н для указанных образцов адекватное поведение показывает фрактальная модель, а после – модель Герца. При оценке коэффициента трения фрактальных поверхностей при малых нагрузках учитывались молекулярная составляющая и наклон неровностей.

Таким образом, для микроуровня приведена процедура определения составляющих коэффициента трения, зависящих, в свою очередь, от параметров фрактальной шероховатости, и получены количественные результаты коэффициента трения для фрактальных поверхностей:

- Трение фрактальных поверхностей реализуется на уровне фрактальной шероховатости при сравнительно малых нагрузках и определяется особенностями структуры поверхности. Природа трения на

разных масштабах рассмотрения деталей поверхности – молекулярно-механическая, поэтому коэффициент трения, определяющий сопротивление относительно смещению элементов пары трения, является аддитивной величиной.

- Для фрактальных поверхностей скорость роста фактической площади контакта превышает рост нормальной нагрузки и, вследствие этого, наблюдается увеличение коэффициента трения с ростом нагрузки.

- Кроме того, расчеты показывают, что с ростом фрактальной размерности общий коэффициент трения снижается. Так, при изменении фрактальной размерности с 1,25 до 1,55 коэффициент трения снижается примерно в 2-3 раза, что является существенным и требует учёта при оценке триботехнических параметров на этом уровне.

4.3. ТРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА НАНО-УРОВНЕ

Анализ процесса трения на нано-уровне будет напрямую связан с методикой определения фрикционных параметров τ_0 и β молекулярной составляющей коэффициента трения. Установлено, что в согласии с моделью Гринвуда-Вильямсона (G-W) фактическая площадь контакта примерно пропорциональна нормальной силе. Поэтому, если удельное сопротивление срезу молекулярных связей τ постоянное, то сила трения будет пропорциональна реальной области контакта, и следовательно сила трения будет примерно пропорциональна нормальной силе:

$$F_f = \tau A_r; \quad A_r \propto F_N.$$

Однако экспериментальные данные показывают, что при размере фактического контакта в микро- или нано-масштабе эти утверждения не работают, и сила трения может быть непропорциональна нормальной силе. Для оценки коэффициента трения на нано-уровне рассмотрим контакт зонда атомно-силового микроскопа AFM с гладкой исследуемой поверхностью образца. Типичный радиус скругления зонда микроскопа AFM оценивается

величиной ≤ 25 нм, тогда как измерение шероховатости инженерных поверхностей производится зондом (щупом) радиусом 5...10 мкм. На рис. 4.10 показаны профили поверхности, измеренные разными способами (с разными размерами зонда) [224]. Так как модели поверхности строятся на основании анализа топографических параметров, то использование данных измерения поверхности зондами разных размеров при решении задач контактной механики приводит к получению неверных результатов.

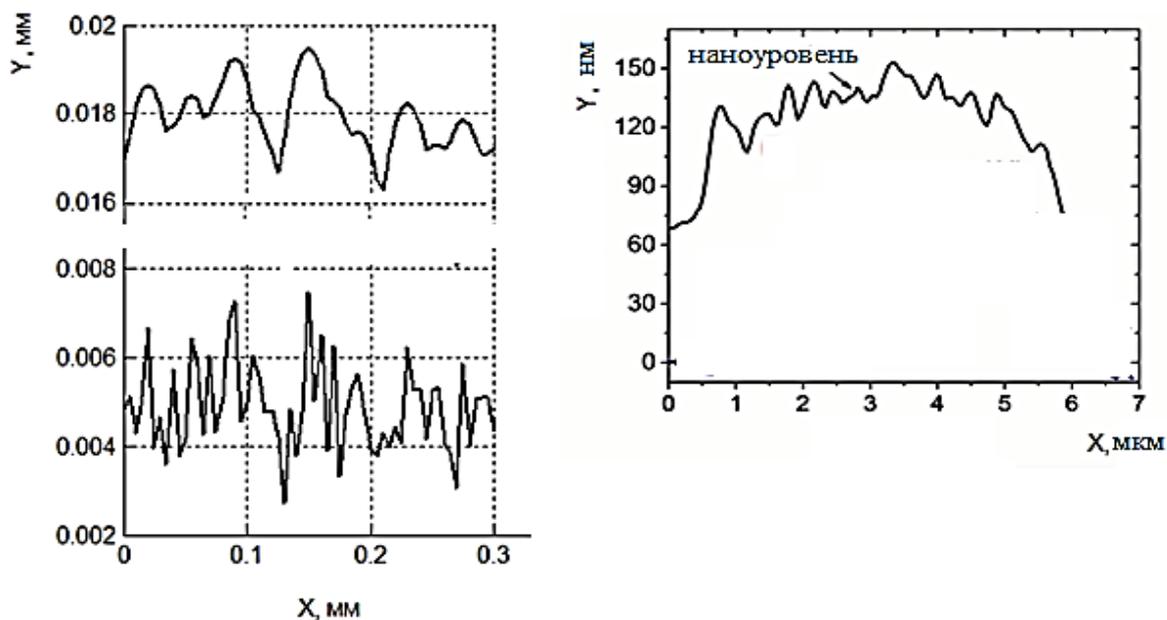


Рис. 4.10. Профилограммы образцов при измерении щупом с радиусом 5 мкм (слева внизу), 100 мкм (слева вверху), и профиль иглы 30нм (справа)

На рисунке 4.11 показана модель микровзаимодействия отдельных неровностей (вверху) и взаимодействие между зондом атомного силового микроскопа (AFM) и исследуемой поверхностью на нано-уровне (внизу). Целью исследования было установить сдвиговую прочность молекулярных соединений и зависимость трения от нагрузки. Зонд атомного силового микроскопа действует как силовой датчик для измерения, в частности, нормальной нагрузки. Изменение силы, прикладываемой к кантилеверу (рис. 4.12) [63], при известной жесткости и величине деформации стержня кантилевера, изменяет нагрузку и на зонд (в данном примере нагрузка на зонд составляла 1,0 нН). Для оценки молекулярной составляющей силы трения

выбиралась трасса самой «гладкой» поверхности.

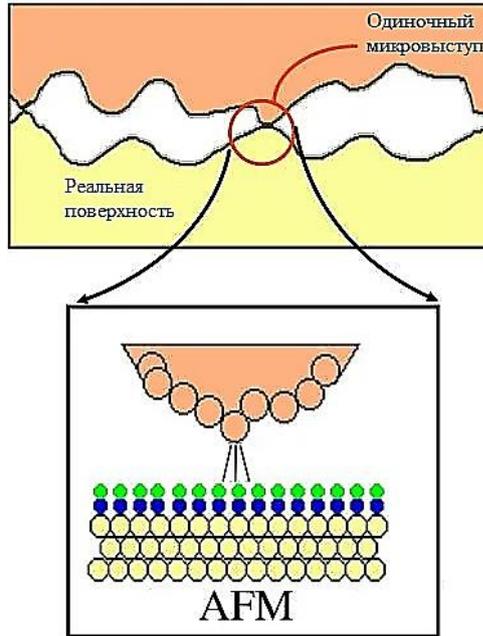


Рис. 4.11. Разный уровень взаимодействия твердых тел

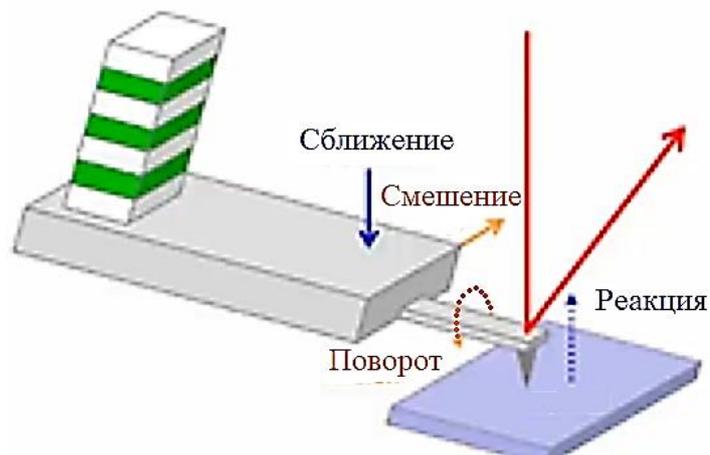
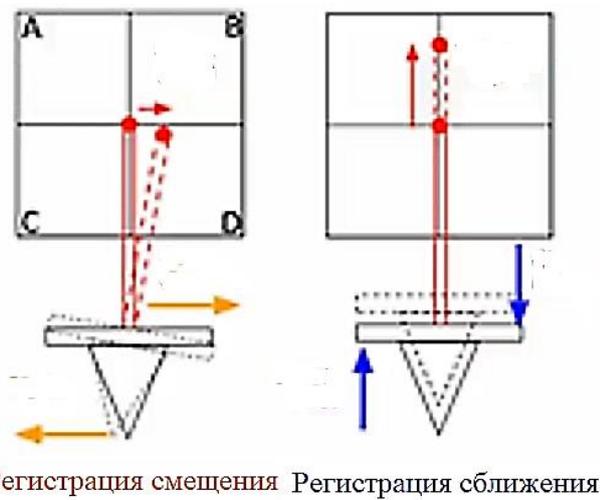


Рис. 4.12. Силовые нагрузки на иглу кантилевера в процессе измерения

Эксперименты проводились с помощью атомно-силового микроскопа в БГУ имени академика И.Г. Петровского, г. Брянск, на кафедре химии. Управляется микроскоп с помощью программного обеспечения *FemtoScan* фирмы АТС Центра перспективных технологий, г. Москва. Сила трения измерялась за счет фиксации величины отклонения кантилевера от начального положения во время прохождения зонда по поверхности в прямом и обратном направлениях (рис. 4.13).



Рис. 4.13. Результат измерения силы трения

Атомно-силовой микроскоп AFM «FemtoScan» представлен на рис. 4.14.

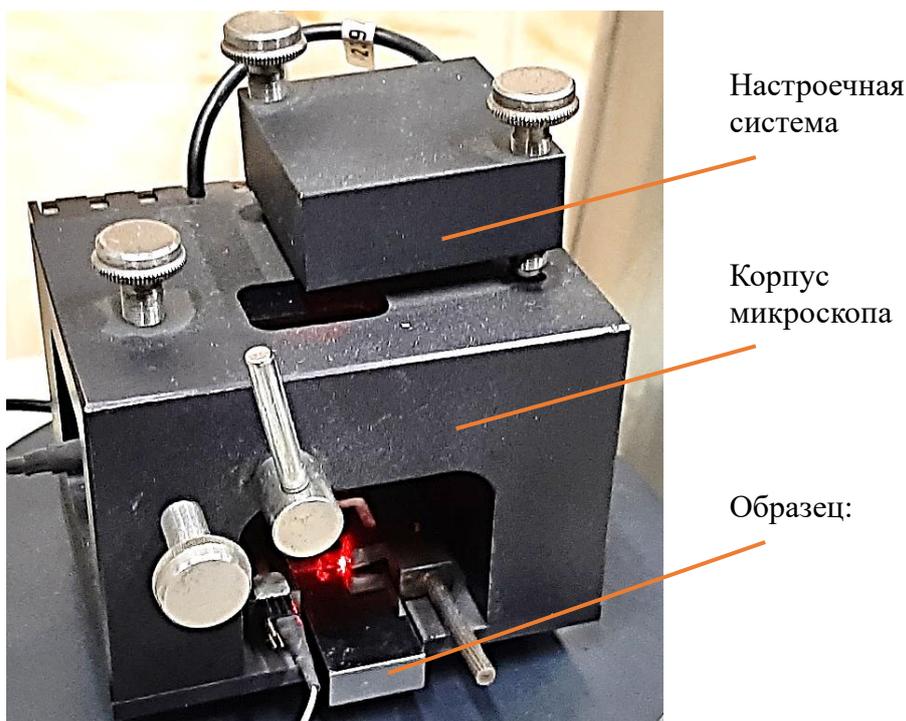


Рис. 4.14. Атомно-силовой микроскоп AFM «FemtoScan»

Образец помещается в микроскоп на подвижный стол и подводится вверх к неподвижной игле кантилевера из нитрида кремния с радиусом закругления 20 нм. При заданной нагрузке на кантилевер, например, как при исследованиях в этой работе - в 1,0 нН, происходило сканирование поверхности образца и запись его трёхмерной топографии на уровне субмикрощероховатости на участке размером 9,5 x 9,5 мкм с шагом в 20 нм с регистрацией силы трения в виде отклонения иглы кантилевера при прямом и обратном проходе.

С помощью атомного силового микроскопа можно получить топографию любого участка исследуемой поверхности образца и провести анализ результатов. Характеристика зонда и нагрузочного на кантилевер режима были следующими: радиус зонда равен 20 нм; материал зонда – нитрид кремния; нагрузка на зонд составляла 1,0 нН. На рис. 4.15 показан участок 3D поверхности.

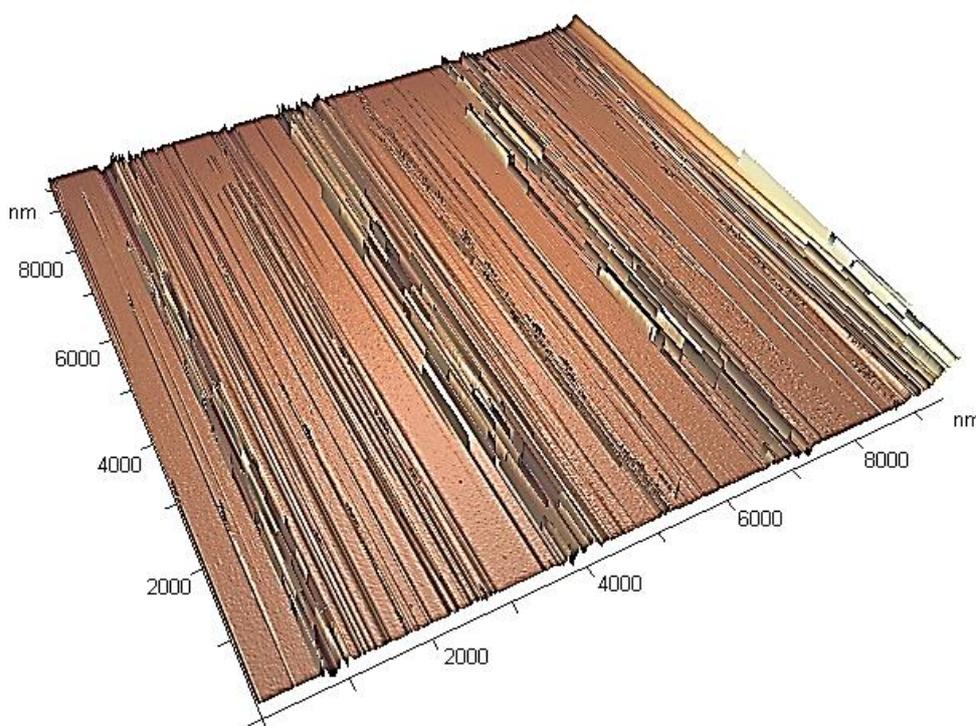


Рис. 4.15. Топография участка поверхности

Профиль поверхности (рис. 4.16) дает возможность оценить параметры нано-шероховатости.

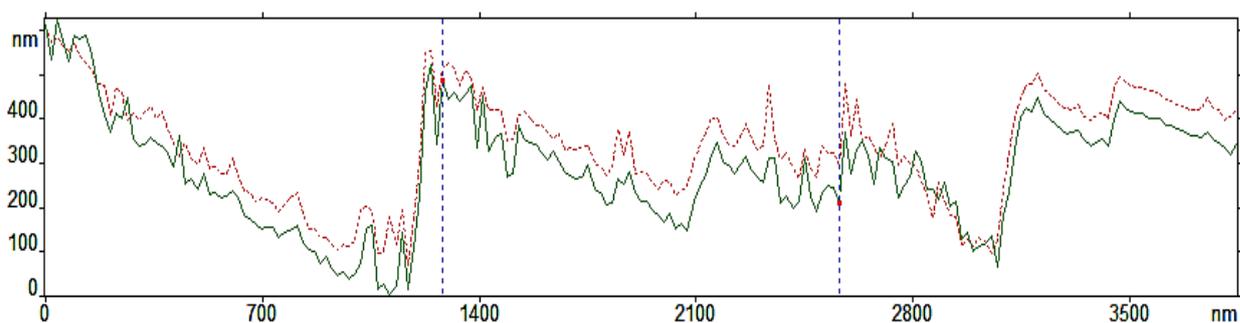


Рис. 4.16. Профиль поверхности

Испытания были проведены с образцом из стали 45 после полирования до $R_a = 0.4$ мкм. В результате была получена картина изменения силы трения (рис. 4.17) при движении в прямом (верхняя кривая) и обратном направлениях (гистерезис). Здесь рассматривается контактное взаимодействие поверхности из стали 45 и иглы, изготовленной из нитрида кремния. Физико-механические характеристики материалов иглы и поверхности приняты в соответствии с табл. 4.3. Модель контактного взаимодействия представлена на рис. 4.18.

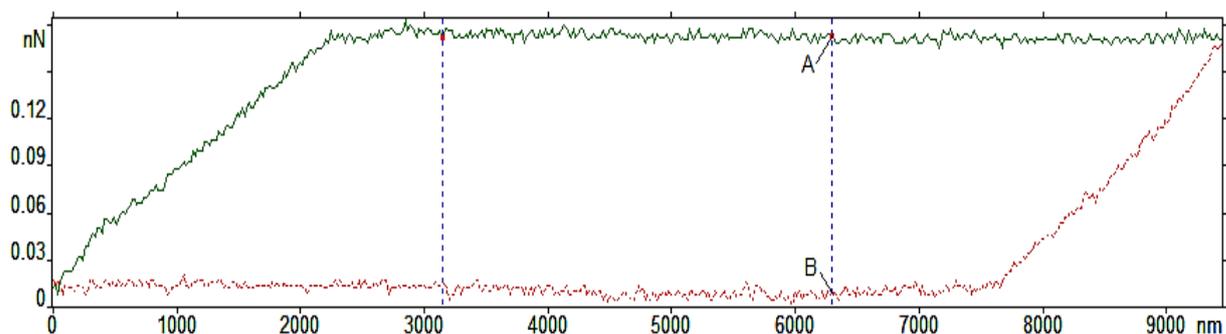


Рис. 4.17. Зависимость силы трения в прямом и обратном направлениях (сила трения равна половине отрезка АВ и составляет 0,078 нН)

Таблица 4.3

Физико-механические характеристики

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэфф. Пуассона μ
Сталь	$2,0 \cdot 10^5$	0,3
Нитрид кремния Si_3N_4	$3,4 \cdot 10^5$	0,3

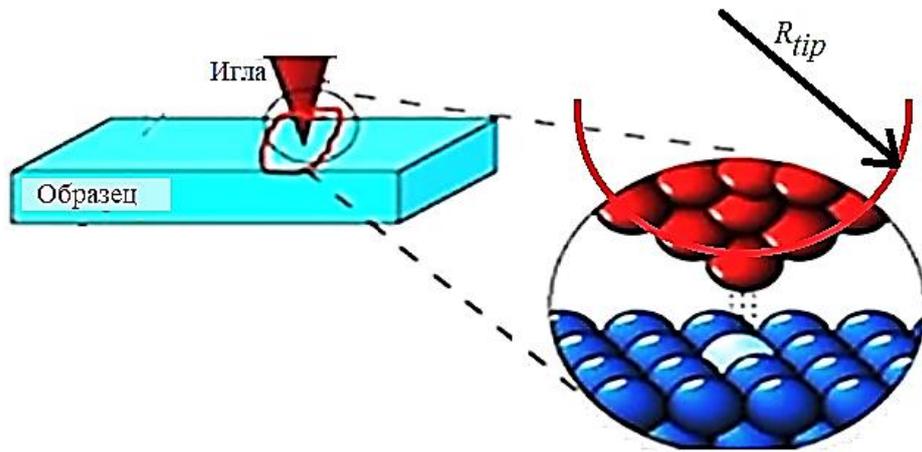


Рис. 4.18. Модель взаимодействия

Дадим оценку параметров контактного взаимодействия иглы кантилевера с упругим полупространством. Исходные данные для расчёта приняты следующими: радиус иглы $R_{tip} = 20$ нм; нагрузка на иглу $F_N = 1,0$ нН. Приведем результаты расчета, основанные на упругом контактном взаимодействии иглы кантилевера и поверхности образца:

- приведенный модуль упругости

$$E_{tot} = \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1 - 0,3^2}{2,0 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,3^2}{3,4 \cdot 10^5} \right) \right]^{-1} = 1,845 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2;$$

- радиус площадки контакта по Герцу

$$r_{Hertz} = \left(\frac{R_{tip} F_N}{E_{tot}} \right)^{1/3} = \left(\frac{20 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}{1,845 \cdot 10^{11}} \right)^{1/3} = 4,767 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

$$= 0,4768 \text{ нм};$$

- величина сближения

$$\delta_{Hertz} = \frac{r_{Hertz}^2}{R_{tip}} = \frac{0,4768^2}{20} = 0,011 \text{ нм};$$

- контактное давление

$$p = \frac{F_N}{\pi r_{Hertz}^2} = \frac{1 \cdot 10^{-9}}{\pi \cdot 0,4768^2} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Н/нм}^2 = 1400 \text{ МПа};$$

- площадь «пятна» контакта

$$a_{nano} = \pi r_{Hertz}^2 = \pi \cdot 0,4768^2 = 0,714 \text{ нм}^2;$$

- удельное сопротивление срезу молекулярных связей

$$\tau = \frac{F_f}{a_{nano}} = \frac{0,078 \cdot 10^{-9}}{0,714 \cdot 10^{-12}} = 109 \text{ МПа.}$$

Коэффициент трения [225], как аддитивная величина, определяется выражением:

$$f = \frac{\tau}{p} + \text{tg}\theta_{nano}.$$

Результаты проведенного эксперимента на атомно-силовом микроскопе по измерению силы трения между образцом и иглой при разной нагрузке на иглу кантилевера представлены на рис. 4.19. Результаты расчёта по представленными выше зависимостям для приведенного образца даны пунктирной линией для упругого режима контактного взаимодействия. Анализ полученного выражения показывает, что с ростом нагрузки коэффициент нано-трения падает (при условии, что наклон неровностей, относящихся к субшероховатости, остается постоянным).

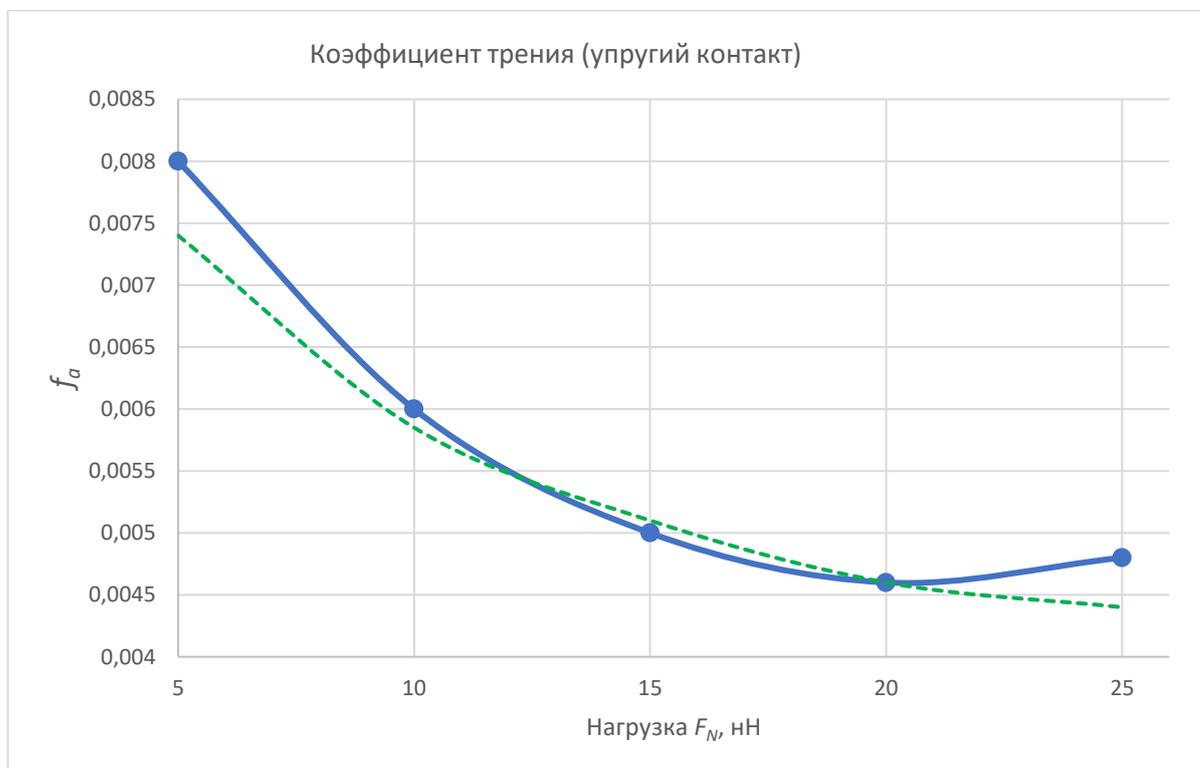


Рис. 4.19. Зависимость коэффициента трения от нагрузки на наноуровне для упругого режима контакта

Таким образом, в работе рассмотрена процедура экспериментального определения удельного сопротивления срезу молекулярных связей и показано, что с ростом нагрузки на контакт в упругом режиме на нано-уровне коэффициент трения снижается, что подтверждается экспериментальными данными.

Сравним полученный результат с расчетом в соответствии с известной методикой определения фрикционных параметров τ_0 и β молекулярной составляющей коэффициента трения. Определение фрикционных параметров осуществлялось с помощью одношарикового трибометра (рис. 4.20). В работе [64] рассмотрена методика определения фрикционных показателей методом разгрузки. Сначала определяют радиус отпечатка ($r_{от}$) при нагрузке, приводящей к пластической деформации в зоне контакта, а затем незначительно (на 15...20 %) снижают нагрузку. Вычисление фактического давления производят по формуле $p_r = F_N / (\pi r_{от}^2)$.

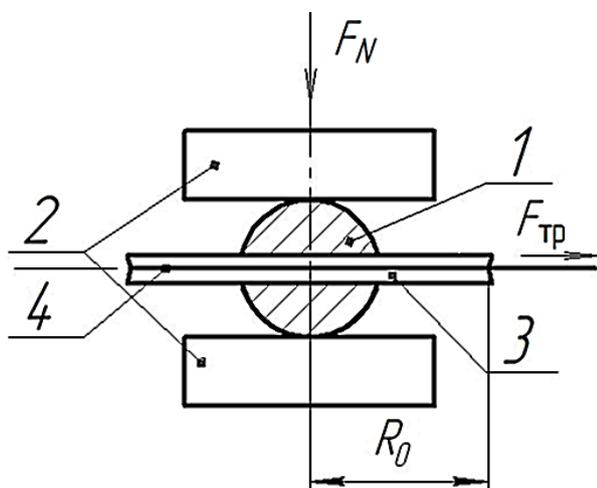


Рис. 4.20. Одношариковый трибометр: 1 - шаровой индентор запрессован в оправку 3 и сдавливается между плоскопараллельными образцами 2 силой F_N

По найденным значениям τ_n и p_r фрикционные параметры τ_0 и β определяют из графика $\tau_n = f(p_r)$. Погрешность при измерении касательной силы (F) складывается из следующих частных погрешностей: погрешности измерения проволочных тензорезисторов ($\Delta 1 \approx 1\%$); погрешности, вносимой

соединительными проводами ($\Delta 2 \approx 1\%$); погрешности, анализатора спектра ($\Delta 3 \approx 1\%$) и погрешности обработки осциллограмм ($\Delta 4 \approx 1,5\%$). Таким образом, погрешность измерения силы, приложенной к оправке шарика, составила 2,29 %. Нагрузка на шарик измерялась динамометром и при испытаниях принималась равной $N = 13, 23$ и 33 Н. Шар изготовлен из закаленной стали ШХ 15. Плоские образцы прямоугольного сечения изготовлены из стали 45 (параметр шероховатости $Ra = 0,8$ мкм). Перед испытанием образцы обезжиривались и удалялись возможные загрязнения сопрягаемых поверхностей.

Пик силы соответствует срыву фрикционных связей (их срезу). Эта максимальная сила, умноженная на радиус оправки, дает внешний момент, который соответствует максимальному моменту трения вращения шара в лунке, образованной при внедрении шара в полупространство. Внешний момент определялся произведением силы, равной среднему значению трех опытов, на радиус оправки:

$$T_{tr} = F \cdot R_{оп}$$

Результаты испытаний сведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты испытаний на одношариковом трибометре

Нагрузка на шарик N , Н	Внешний момент T_{tr} , Н мм
13	0,267
23	0,484
33	0,719

Для стальных поверхностей (модуль упругости $E = 2 \times 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$) найдем, учитывая результаты испытаний, величину τ_0 по формуле, приведенной в работе [64] при $(1 - \mu^2)^{1/3} \cong 1$:

$$\tau_0 = \frac{E}{\pi R} \left\{ \frac{T_{tr2}}{N_2} - \left[\frac{R^{2/3} E^{1/3} - 0.6 N_2^{1/3}}{R^{2/3} E^{1/3} - 0.6 (N_3^{1/3} - N_2^{1/3})} \right] \right\}$$

$$\left. \frac{(T_{tr3}N_2 - T_{tr2}N_3)(N_3^{1/3} - N_2^{1/3})}{N_2^{4/3}N_3} \right\}$$

Здесь $N_2 = 23$ Н, $N_3 = 33$ Н и силы $F_2 = 0,0155$ Н, $F_3 = 0,0230$ Н. Подставив данные табл. 4.4, получим $\tau_0 = 98$ МПа. Оценка коэффициента β , равного тангенсу угла наклона прямой линии к оси абсцисс $\tau_n = f(p_r)$, дает значение $\beta = 0,024$.

Ошибки при определении фрикционных параметров τ_0 и β с помощью одношарикового трибометра связаны с погрешностями измерения и принятыми допущениями, которые принимались во внимание при проведении как самого эксперимента, так и при анализе полученных данных.

Результат, полученный с помощью атомного силового микроскопа (АСМ), дает величину сдвигового напряжения $\tau_0 = 109$ МПа. Погрешность составила примерно 11 %. Таким образом, предложенный способ можно эффективно использовать при определении фрикционных параметров τ_0 и β .

4.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ

Трение слабонагруженных поверхностей характеризуется тем, что контактное взаимодействие определяется структурными особенностями так называемой первичной извлеченной фрактальной поверхности, параметры которой лежат в нано диапазоне. Ввиду малого значения радиусов верхней части субмикронеровностей контактное взаимодействие сопровождается их пластической деформацией. При увеличении контактной нагрузки или вследствие износа происходит рост пятен контакта и переход неровностей в упругое состояние. Модель трения представляется в виде взаимодействия микронеровностей изнашиваемого элемента пары с более твердым и гладким контртелом.

Коэффициент трения покоя определяется зависимостью

$$f = \frac{\tau A_r}{F_n}.$$

Здесь $\tau = \tau_0 + \beta F_n/A_r$, где τ_0 – удельное напряжение сдвигу (срезу молекулярных связей) при отсутствии контактного давления; β – коэффициент, учитывающий упрочнение фрикционных связей; A_r – фактическая площадь контакта; F_n – нормальная нагрузка.

При относительном скольжении твердых тел происходит трансформация механической энергии в тепловую. Если предположить, что вся механическая энергия превратится в тепловую, то тогда можно записать

$$f \frac{F_n u}{A_r} = \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial y},$$

где u – скорость скольжения, м/с; λ – коэффициент теплопроводности, Нм/(с·м·°С); Θ – температура, °С; y – нормаль к поверхности трения, м.

Таким образом, на трение скольжения оказывают влияние факторы:

- 1) коэффициент трения f ;
- 2) коэффициент теплопередачи λ ;
- 3) температура Θ ;
- 4) нормаль к поверхности трения y ;
- 5) контактное давление $p = F_n/A_r$;
- 6) скорость u .

В качестве основных единиц примем:

1. Сила F ; 2. Длина L ; 3. Время T ; 4. Температура K .

В соответствии с π -теоремой (Букингема) количество критериев подобия равно разности числа факторов и число основных единиц: $6 - 4 = 2$. Проверим выбор факторов p , u , Θ , λ , для чего выразим выбранные факторы через размерности основных единиц и найдем определитель матрицы 4x4:

	F	L	T	K
p	1	-2	0	0
u	0	1	-1	0
Θ	0	0	0	1
λ	1	0	-1	-1

Определитель матрицы равен -1. Так как определитель не равен нулю, то выбор четырех факторов считается приемлемым. Найдём критерии подобия.

Первый критерий подобия $\pi_1 = f$ (безразмерный).

Второй критерий найдем из соотношения

$$\pi_2 = \frac{y}{p^a u^b \Theta^c \lambda^d}$$

Перепишем это соотношение в размерностях

$$L = F^0 L^0 T^0 K^0 (FL^{-2})^a (LT^{-1})^b K^c (FT^{-1}K^{-1})^d.$$

Приравняем показатели степени при одинаковых размерностях:

- при F : $0 = c - d$;
- при L : $1 = -2a + b$;
- при T : $0 = -b - d$;
- при K : $0 = c - d$.

Решая систему линейных алгебраических уравнений относительно d , получим

$$a = -d; b = -d; c = d.$$

Второй критерий при условии, что $y = b_{eff}$, запишем так

$$\pi_2 = b_{eff} \left(\frac{pu}{\lambda\Theta} \right)^d$$

или, учитывая, что $b_{eff} = 1,73\sqrt{Fo}$, где критерий Фурье равен $Fo = at$ (здесь a – коэффициент теплопроводности; t – время), перепишем критерий в следующем виде:

$$\pi_2' = \frac{\lambda\Theta}{1,73\sqrt{Fo} pu}.$$

Запишем с точностью до постоянной C критериальное уравнение, приняв во внимание $d = 1$ из условия, что критерий π_2 имеет размерность $F^0 L^0 T^0 K^0$ ($[\pi_2] = [-]$), в виде

$$\pi_1 = \varphi(\pi_2'); \quad f = C \frac{\lambda\Theta}{1,73\sqrt{at} pu}.$$

Постоянную C можно определить из эксперимента. На этом поиск

критериев закончим из-за ненадобности.

Имитационное моделирование и эксперимент. Исследование проводилось по схеме «палец-диск» (рис. 4,21) для пары трения сталь-сталь на образцах с разной шероховатостью.

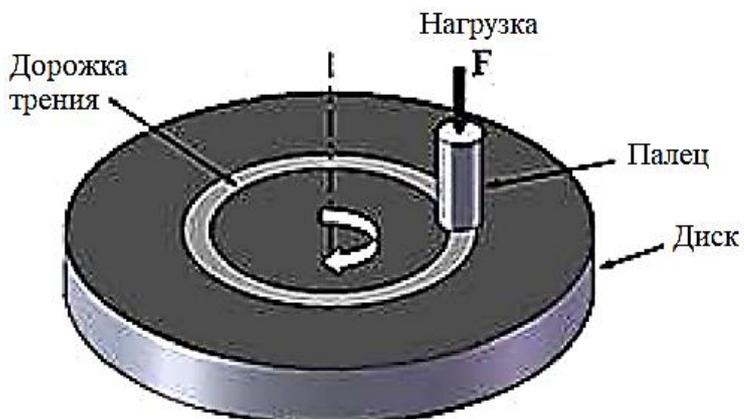


Рис. 4.21. Схема испытания «палец-диск»

На рис. 4.22 представлена лабораторная установка, позволяющая проводить испытания на трение и износ по стандарту ASTM G99 (ООО «Modengy», г. Брянск).

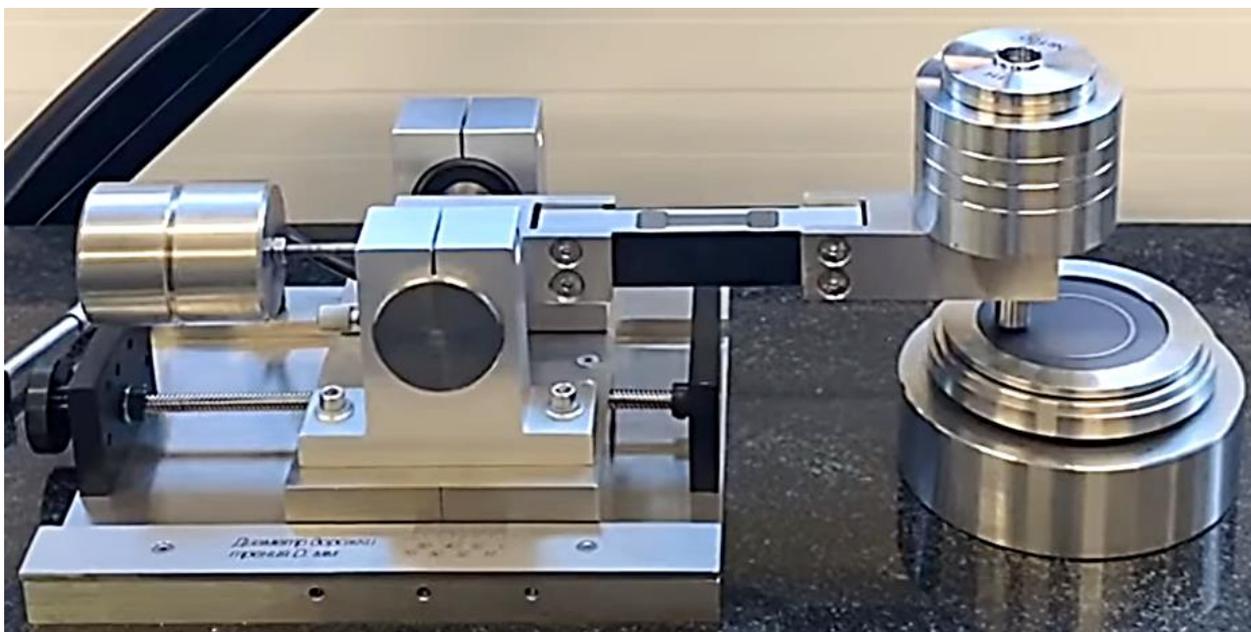


Рис. 4.22. Испытательная установка по стандарту ASTM G99

Для проведения описываемых испытаний был изготовлен специальный держатель образца со сферическим коленом, позволяющий исключить перекося

сопряжённых поверхностей при испытаниях (рис. 4.23), а также образцы к нему. Нагрузка изменялась дискретно от 1 до 100 Н. Скорость скольжения принималась одной и той же, равной 0,5 м/с. Твердость изнашиваемого образца (пальца) составляла 2,5 ГПа.



Рис. 4.23. Держатель с образцами для испытательной установки

Результаты эксперимента показали, что в рассматриваемом диапазоне изменения нормальной нагрузки на палец, коэффициент трения пары сталь-сталь при малых нагрузках сначала растет с ростом нагрузки, а затем падает (рис. 4.24).

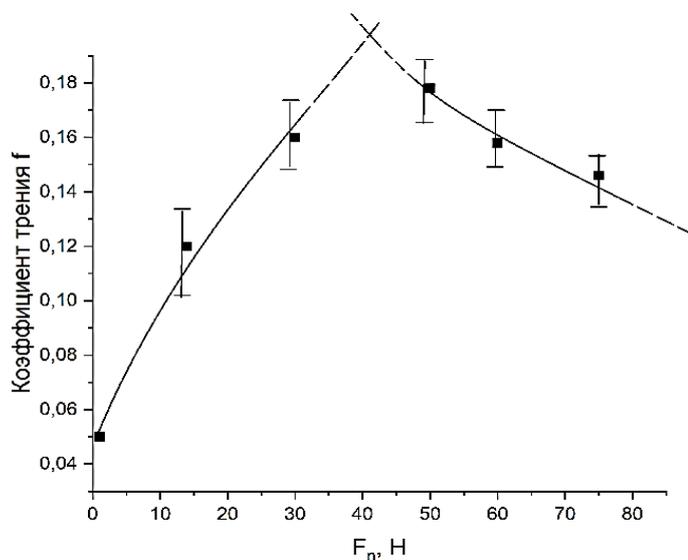


Рис. 4.24. Зависимость коэффициента трения от нагрузки

Переход от роста коэффициента трения к падающей кривой наблюдается в диапазоне от 35 Н до 45 Н (в данном случае давление составляет около 0,1 МПа). Такие же данные при контактном давлении $q = 0,16$ МПа для пары трения сталь-сталь на трибометре «палец-диск» получены С.Г. Волоховым [234].

Рост коэффициента трения объясняется фрактальной структурой поверхностного слоя, и при низком уровне нагрузки превалирует влияние пластически деформируемых микровыступов, которые по мере увеличения нормальной нагрузки формируют пятна контакта в упругом состоянии, способные её воспринимать. Максимум коэффициента трения, показанный на рис. 4.24, характеризует условие перехода от фрактальной модели к моделям, предложенным И.В. Крагельским, Н.Б. Демкиным, Н. М. Михиным, Гринвудом и Вильямсоном и др. для случая упругого контакта.

Оценка температуры проводилась с помощью программы, разработанной на подходе, изложенном в работе [233]. Основной вклад в температуру трения вносит температура вспышки. При данной скорости скольжения объемная температура не превышала 3°C во всем диапазоне принятого изменения нагрузки. На рис. 4.25 показан фрагмент работы программы по оценке температурного режима трения.

Contact temperature pin-on-disk

Calculation of the contact temperature as a result of frictional heating.

F	30	N	r	4	10^{-3} m	K_1	45	W/mK
V	0.5	m/s	L	12	10^{-3} m	K_2	45	W/mK
μ	0.15		HB	6.5	GPa	k_2	13	10^{-6} m ²

Solve Reset (default value of ball bearing steel)

A_r/A_n	0.00009182	r_j	15.3846153	10^{-6} m	dT_{bulk}	0.43693394	$^{\circ}\text{C}$
					dT_{flash}	73.8522437	$^{\circ}\text{C}$
Temperature increase					dT	74.2891325	$^{\circ}\text{C}$

Рис. 4.25. Контактная температура в паре трения «палец-диск»

На рис. 4.26 представлена зависимость температуры, генерируемой внешним трением, от нагрузки.

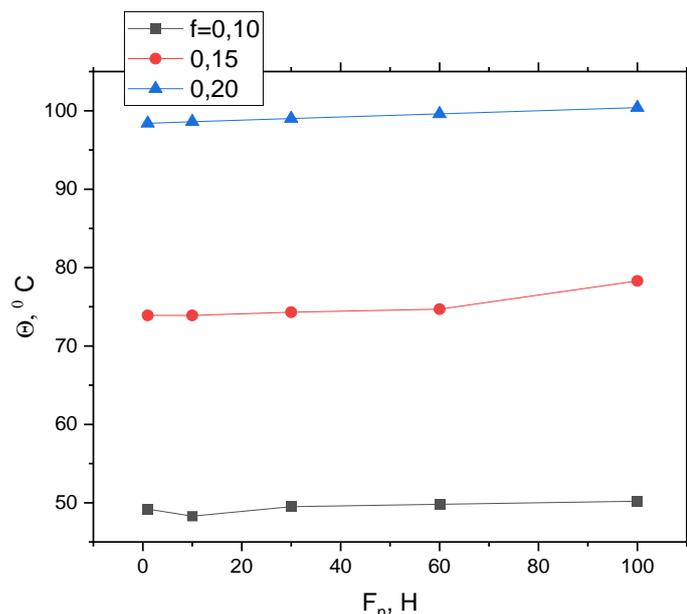


Рис. 4.26. Зависимость температуры θ от нагрузки F_n

По графику видно, что для всех рассматриваемых значений коэффициента трения температура трения остается практически постоянной в рассматриваемом диапазоне изменения нагрузки. Зависимость температуры от коэффициента трения при нагрузке 30 Н и скорости 0,5 м/с представлена на рис. 4.27. Обращает на себя внимание тот факт, что зависимость температуры θ от коэффициента трения f носит практически линейный характер.

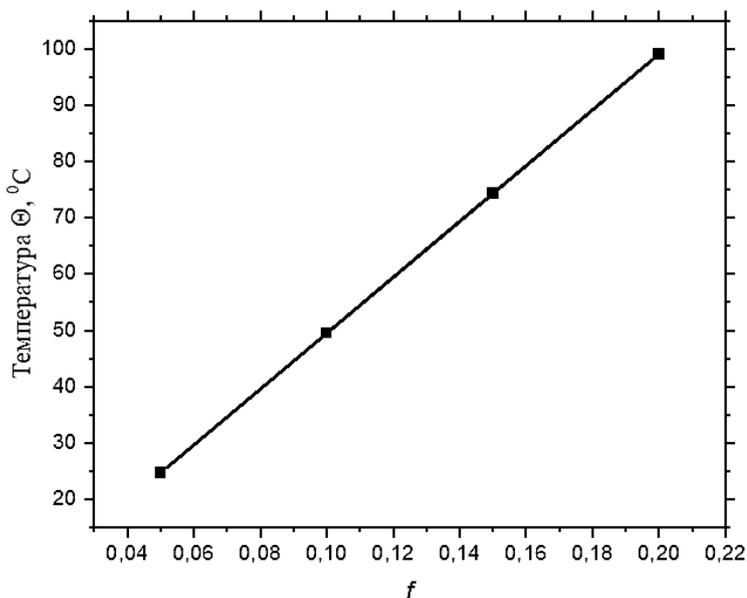


Рис. 4.27. Зависимость температуры от коэффициента трения (при $F_n = 30$ Н)

Размер пятна с радиусом r единичного контакта определим по формуле (Ashby)

$$r = \frac{0,1 \cdot 10^6}{H} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м (40 мкм)}.$$

При скорости скольжения $u = 0,5$ м/с. найдем время существования пятна контакта как

$$t = \frac{2r}{u} = \frac{8 \cdot 10^{-5}}{0,5} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Дадим оценку триботехнических параметров при следующих теплофизических данных материала: $\lambda = 45$ Вт/(м·°С); $a = 17,65 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Используя представленное выше уравнение (полученное при выводе критериев подобия π_1 и π'_2), подставим значения в формулу оценки коэффициента трения скольжения, используя экспериментальные данные:

$$0,15 = C \frac{45 \cdot 74,3}{1,73 \cdot \sqrt{17,65 \cdot 10^{-6} \cdot 2500 \cdot 10^6 \cdot 0,5}}.$$

Решая это уравнение, найдем значение коэффициента $C = 5,08$. Окончательно запишем

$$f_{\text{ск}} = 2,94 \frac{\lambda \theta}{\sqrt{at \rho u}}.$$

Зависимость полученного коэффициента трения от скорости скольжения представим в виде графика на рис. 4.28.

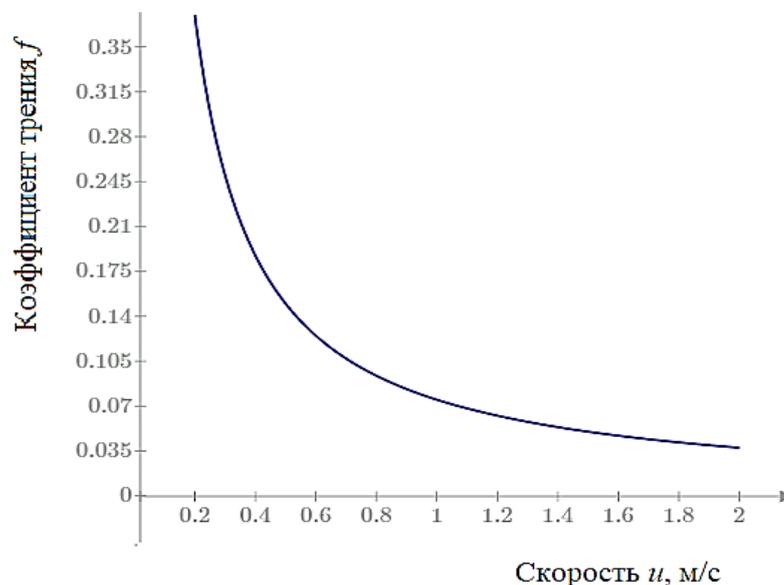


Рис. 4.28. Зависимость коэффициента трения от скорости

Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения носит падающий характер. Это связано с тем, что при росте скорости скольжения снижается время «жизни» пятна контакта и упрочнение фрикционных связей, связанное, как известно из экспериментальных данных, с эффектом роста силы трения от продолжительности неподвижного контакта. Для тяжело-нагруженных пар трения скольжения, когда доминирующим фактором становится температура, наблюдается снижение твердости поверхностного слоя, которое приводит к «правилу положительного градиента физико-механических свойств» по И. В. Крагельскому.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Таким образом, по результатам работы, изложенной в главе 4, можно сделать следующие выводы.

- 1. На основании идентификации вида упруго-пластического состояния фактических пятен контакта для малых нагрузок разработана методика оценки полного коэффициента трения фрактальных поверхностей на микро-уровне (шероховатость) как сумма молекулярной и механической составляющих. Для преимущественно пластического состояния пятен контакта следует применять фрактальную модель при оценке коэффициента трения, а после перехода в упругое состояние – модель Герца.*
- 2. Разработанная модель трения фрактальных поверхностей на микро-уровне позволила выявить некоторые особенности влияния микрогеометрии поверхности на коэффициент трения:*
 - Для поверхностей с $D < 1.5$ средний угол наклона микронеровностей небольшой (до 4°) и растёт медленно с ростом D , что делает влияние деформационной составляющей коэффициента трения незначительным, а адгезионная растёт при уменьшении D . Для поверхностей с $D > 1.5$ угол наклона микронеровностей резко возрастает, из-за чего деформационная*

составляющая тоже растёт и начинает преобладать над адгезионной. Минимум коэффициент трения имеет при $D \approx 1,5$.

- Для фрактальных поверхностей (пластический контакт) рост фактической площади контакта превышает рост нормальной нагрузки и, вследствие этого, наблюдается увеличение коэффициента трения с ростом нагрузки.

- Расчеты показывают, что с ростом фрактальной размерности общий коэффициент трения снижается. Так, при изменении фрактальной размерности с 1,25 до 1,55 коэффициент трения снижается примерно в 2-3 раза.

3. Разработана методика оценки коэффициента трения на нано-уровне (субшероховатость) и предложена более точная процедура экспериментального определения удельного сопротивления срезу молекулярных связей с помощью атомного силового микроскопа (АСМ). Приведено сравнение полученного с помощью АСМ результата с расчетом в соответствии с известной методикой определения фрикционных параметров τ_0 и β молекулярной составляющей коэффициента трения с помощью одношарикового трибометра, которое показало их удовлетворительное соответствие (отличие в 11%). Кроме того, было установлено, что с ростом нагрузки на контакт в упругом режиме на нано-уровне коэффициент трения снижается, что подтверждается экспериментальными данными.

ГЛАВА 5. ИЗНАШИВАНИЕ СЛАБОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

При создании износостойких пар трения возникает необходимость изучения геометрических характеристик поверхности на микро- и наноуровне и их влияние на трибологические показатели. В связи с этим встает вопрос обоснования выбора эффективного критерия оценки структуры поверхности на основе геометрического анализа шероховатости на микро- и наноуровне. Это подразумевает оценку параметров шероховатости микро- и наноструктуры поверхностного слоя на основе полученных данных о геометрии поверхности, исследований зависимости фрактальной размерности от масштаба для слабонагруженных пар трения. Обобщенный анализ изнашивания шероховатых поверхностей, учитывающий влияние адгезии, был рассмотрен для трехмерных фрактальных поверхностей. Особенностью процесса изнашивания при малых нагрузках является установление критической площади единичного контакта. Считается, что при значении площадей пятен контакта, меньших критического, эти пятна находятся в пластическом состоянии, так как рассматриваемые пятна имеют очень малые радиусы кривизны верхней части субмикровыступов, поэтому даже при малых нагрузках (по Маджумдару) пятна деформируются пластически. При росте нагрузки формируются площадки контакта, способные упруго воспринимать нагрузку. Результаты исследований, опубликованных в работах И.В. Крагельского, Н.М. Михина и др., относятся либо к упругому состоянию контактов, либо к пластическому (при этом принята модель поверхности в виде набора гладких сферических сегментов). Доля полностью пластичных контактов в процессе приработки, а также скорость изнашивания и коэффициент износа выражаются в зависимости от нормальной нагрузки (глобального взаимодействия), фрактальных параметров (топографии) и упругопластических свойств материала.

В настоящей работе решена задача определения параметров

изнашивания фрактальных поверхностей в случае одновременного протекания процессов упруго и пластически деформируемых пятен контакта. Каждый из этих процессов характеризуется своим коэффициентом износа, причем соотношение пластически и упруго деформируемых пятен меняется в процессе трения. Выявлены условия перехода от приработки к периоду нормального изнашивания. Численные результаты представлены для пары металл–металл, чтобы проиллюстрировать зависимость параметров изнашивания и коэффициента износа от глобального взаимодействия, шероховатости поверхности, фрактальной размерности, свойств материала и работы адгезии.

Так как в настоящее время не существует общей аналитической модели, позволяющей оценивать интенсивность изнашивания элементов пары трения на уровне фрактального шероховатого слоя при одновременном протекании процессов изнашивания как при упругом контактировании, так и при пластическом, которая подходит для широкого спектра технического применения, то в 5 главе будут решаться следующие вопросы:

- 1. Разработка основной модели (алгоритма) изнашивания фрактальных поверхностей при малых нагрузках.*
- 2. Оценка триботехнических показателей изнашивания фрактальных поверхностей при пластическом состоянии пятен контакта.*
- 3. Оценка триботехнических показателей изнашивания при упругом деформировании микронеровностей на основе уравнения Герца.*
- 4. Разработка методики прогнозирования работоспособного состояния узла трения при малых нагрузках с учётом наличия пятен контакта в пластическом и упругом состояниях.*
- 5. Апробация разрабатываемой методики на примере оценки ресурса предохранительной муфты стрелочного перевода.*

Разработка аналитической модели, включающей оценку поверхностной шероховатости, параметров контактного взаимодействия, коэффициента трения и объема изношенного материала во время процесса трения, позволила

бы осуществить значительный вклад в трибологию и могла бы быть адаптирована к использованию в широком спектре промышленного применения.

5.1. МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Интенсивность изнашивания сопряжённых поверхностей при малых нагрузках зависит от большого количества факторов, включая состояние контакта. В данной работе учитывалось влияние микрогеометрии фрактальных сопряжённых поверхностей на процесс трения и изнашивания. Это становится возможным при применении компьютерного моделирования контактного взаимодействия небольшого участка трёхмерных карт реальных поверхностей с оценкой параметров контактного взаимодействия и интерполирования результатов моделирования на всю поверхность. При этом для учёта случайного разброса геометрических параметров микрогеометрии реальных поверхностей при их изготовлении, предлагается проводить несколько статистически значимых компьютерных экспериментов на адекватных реальным поверхностям моделях с проверкой результатов на картах реальных поверхностей.

Представим алгоритм проведения оценки триботехнических характеристик, включая интенсивность изнашивания.

1. Для проведения компьютерного эксперимента по моделированию контактного взаимодействия поверхностей загрузим в память ЭВМ карты (рис. 5.1): 3D модели, адекватные реальным поверхностям, или 3D карты реальных поверхностей после трёхмерного сканирования.

2. Формируем контакт поверхностей под заданной нагрузкой. Это можно сделать двумя способами:

- первая загруженная поверхность занимает нижнее положение в 3D сцене контактного взаимодействия, а вторая поверхность переворачивается и располагается сверху на расстоянии H_{max} , при котором имеем одну (первую) точку контакта вершин поверхностей (начальное положение).

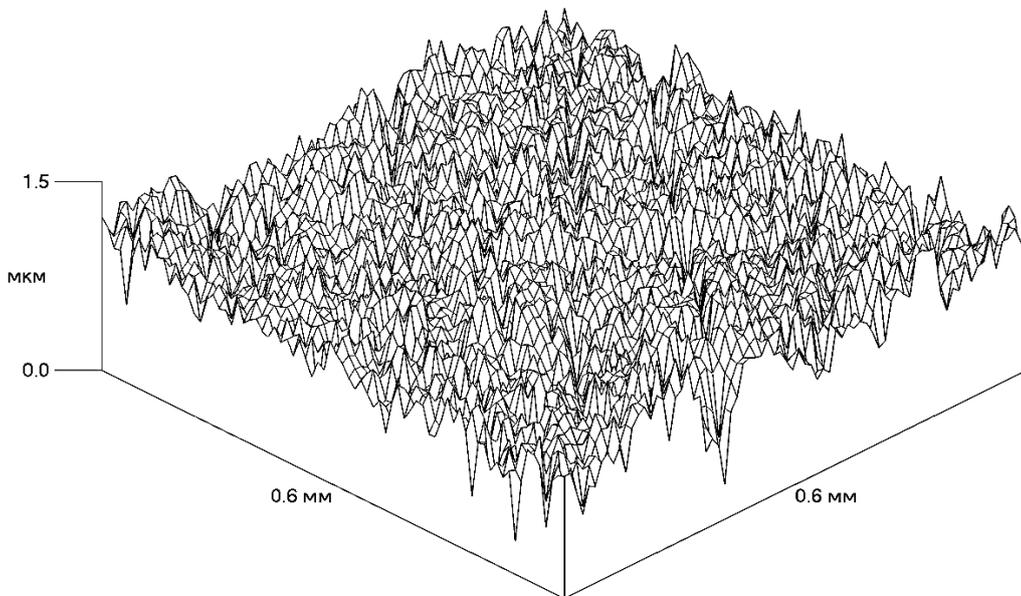


Рис. 5.1. Загруженные 3D карты поверхностей

Все дальнейшие манипуляции будут выполняться на этой сформированной 3D сцене (рис. 5.2, показан срез контакта поверхностей по 80-й трассе – примерно посередине 3D сцены);

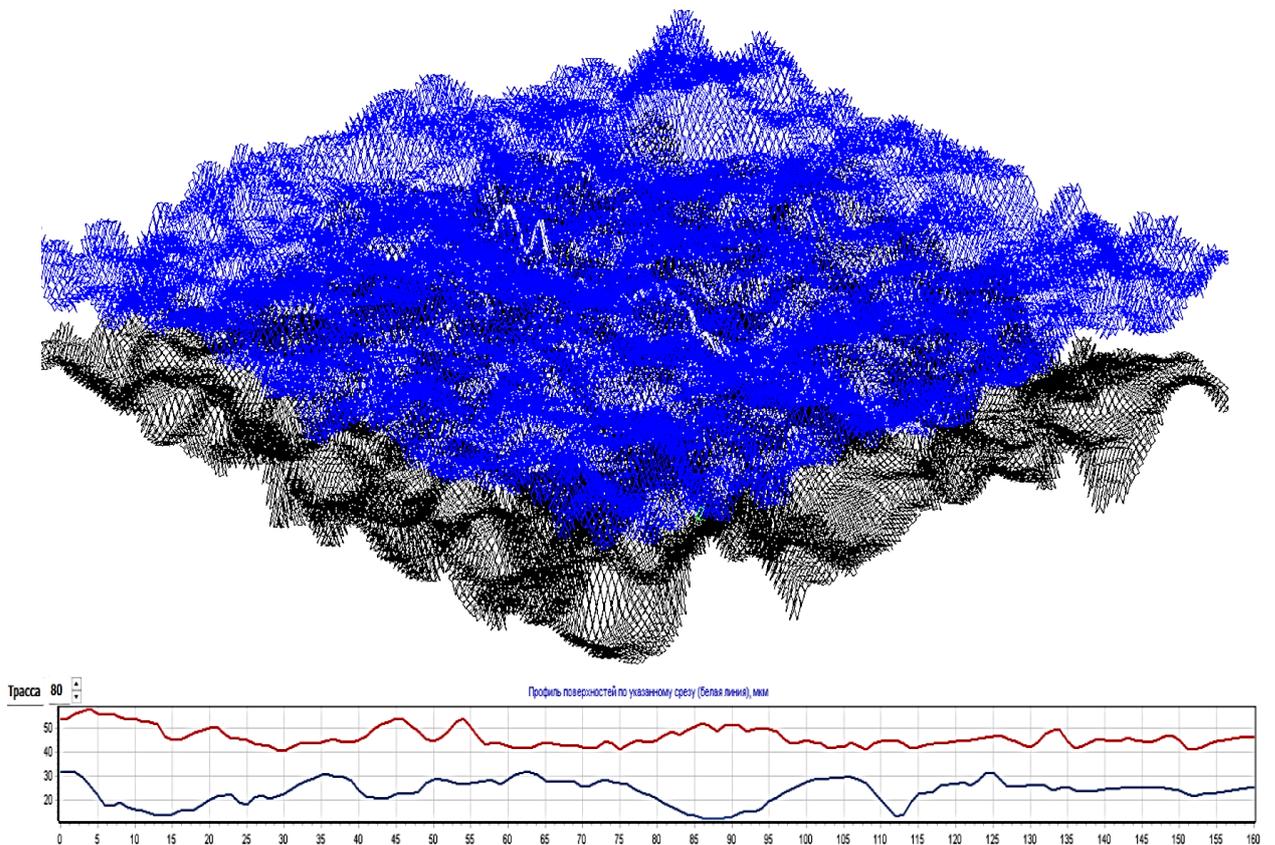


Рис. 5.2. Первоначальный контакт поверхностей с отрисовкой вертикального сечения 3D сцены на 80 трассе (примерно посередине)

- контакт двух поверхностей заменяется контактом эквивалентной поверхности с гладкой, как было описано ранее в настоящей работе. Этот алгоритм наиболее предпочтителен, так как он почти вдвое снижает количество вычислений для ЭВМ и даёт возможность параллельно провести аналитический расчёт по указанным в настоящей работе зависимостям на основе эквивалентных параметров, оцененных по построенной эквивалентной поверхности.

3. Проводим сближение сопряжённых поверхностей под заданной нагрузкой. Процедура сближения была описана в 3 главе настоящей работы и выполняется по двум алгоритмам – для пятен контакта, находящихся в пластическом режиме и в упругом. Для повышения точности расчётов сближение необходимо проводить поэтапно с оценкой пятен контакта.

Для пятен, находящихся в упругом режиме, «лишний» упруго деформируемый материал не учитываем, игнорируя перекрытие микровыступов. При уменьшении сближения микронеровности восстанавливают свою форму. Для микровыступов, находящихся в пластическом состоянии, «лишний» пластически деформированный материал распределяем по периметру контакта, симулируя расплющивание. В итоге, когда сумма нагрузок по всем фактическим пятнам контакта станет равной внешней (заданной) силе, сближение поверхностей прекращается. При этом для выбранного сочетания поверхностей мы имеем информацию об их величине сближения δ под заданной нагрузкой, числе фактических пятен контакта, их форме и размере, их упругопластическом состоянии и т.д. (рис. 5.3). При этом величина критической площади пятна контакта, соответствующего переходу от упругого состояния к пластическому, находим по формуле

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

Размерное распределение площадей пятен контакта относительно

максимальной площади, принимаемой в качестве постоянной величины, подчиняется зависимости

$$n(a) = \frac{dN(A > a)}{da'} = \frac{D_p}{2} a_L^{D_p/2} (a)^{-(2+D_p)/2}.$$

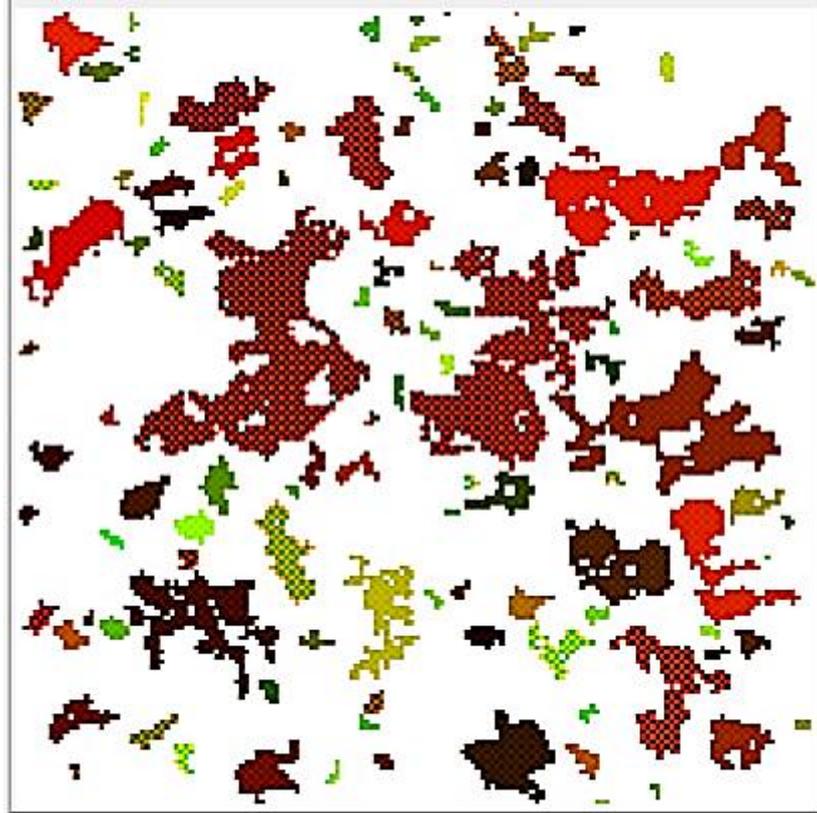


Рис. 5.3. Пятна контактного взаимодействия поверхностей

Фактическая площадь при пластическом состоянии пятен контакта ($a < a_c$) определяется выражением

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

При упругом контакте (при $a_L > a_c$) определяется выражением

$$A_{re} = \int_{a_c}^{a_L} an(a)da = \frac{D_p}{2 - D_p} \left(a_L - a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2} \right), 1 < D_p < 2.$$

Нагрузка, воспринимаемая пятнами фактического контакта, находящихся в пластическом состоянии, находим по формуле

$$F_{pi} = Ha$$

Нагрузка, воспринимаемая пятнами фактического контакта,

находящихся в упругом состоянии, находим по формуле

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

4. Имея подробную и точную информацию о состоянии контакта поверхностей, перейдём к определению основных триботехнических характеристик трибосопряжения:

- определяем коэффициент трения на каждом пятне контакта как

$$f_i = \frac{tg \left[\pi G^{D-1} a_i^{(1-D)/2} \right] + f_a}{1 - tg \left[\pi G^{D-1} a_i^{(1-D)/2} \right] f_a}$$

Здесь адгезионную составляющую коэффициента трения f_a определим в соответствии с предложенной в главе 4 процедуры с помощью атомно-силового микроскопа AFM «FemtoScan»;

- оценим фактическую силу трения как сумму сил по всем пятнам контакта:

$$F_{тр} = \sum f_{pi} \cdot F_{pi}$$

- оценим объём изнашиваемого материала V_i каждой микронеровности и число циклов воздействия n , приводящих к отделению микрообъёма материала в процессе трения. В зависимости от состояния микронеровности данные процедуры будут представлены ниже.

5. Моделируем износ поверхности путём среза изношенного материала по прошествии рассчитанного числа циклов n как показано на рис. 5.4. При малых нагрузках износ первичных микровыступов приводит к увеличению фактической площади контакта и переходу большинства пятен контакта в упругое состояние. Дальнейший рост площади контакта делает расчёт износа неэффективным при неизменных начальных условиях, так как зависимость между износом и путем трения становится линейной, перейдя в нормальный период изнашивания, который, в свою очередь, протекает с минимальными изменениями параметров шероховатости до предельного состояния.

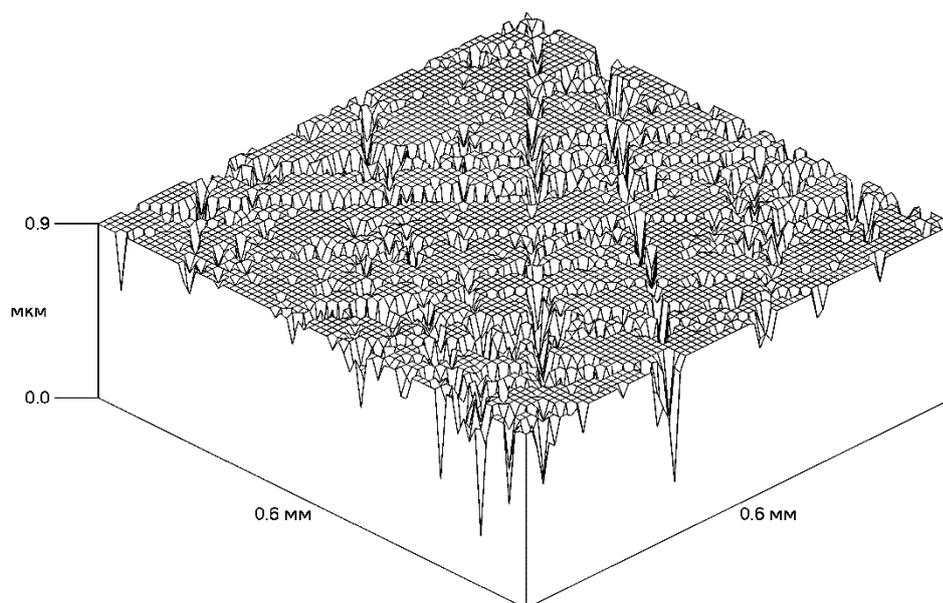


Рис. 5.4. Моделирование износа микронеровностей поверхности

5.2. ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ КОНТАКТЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В согласии с описанной ранее моделью первоначальный контакт относительно острых вершин микронеровностей возникает в пластическом состоянии. По мере увеличения деформации пятно контакта растёт, и при достижении критической площади контакта a_c наступает переход в упругое состояние. На рис. 5.5 представлено изменение топографии реальной поверхности при её изнашивании [226]. Одна из активно применяемых в настоящее время моделей изнашивания – модель Арчарда - основывается на следующем допущении: объемный износ равен произведению номинальной площади контакта на сближение поверхностей пары трения. Так, например, для схемы «палец-диск» номинальная площадь контакта равна πr^2 , где r – радиус пальца и h – линейный износ. В этом случае изношенный объем равен $w(t) = \pi r^2 h(t)$. В действительности, изнашивание происходит на фактических пятнах контакта, которые, как правило располагаются на отдельных микровыступах. Пятна контакта находятся в упругом, пластическом, или упруго - пластическом состояниях. Если принять во внимание мнение И.В. Крагельского о том, что коэффициент износа является

величиной, обратной числу циклов нагружения, приводящих к разрушению вследствие усталости, то коэффициент износа для данных условий работы не является постоянной величиной.

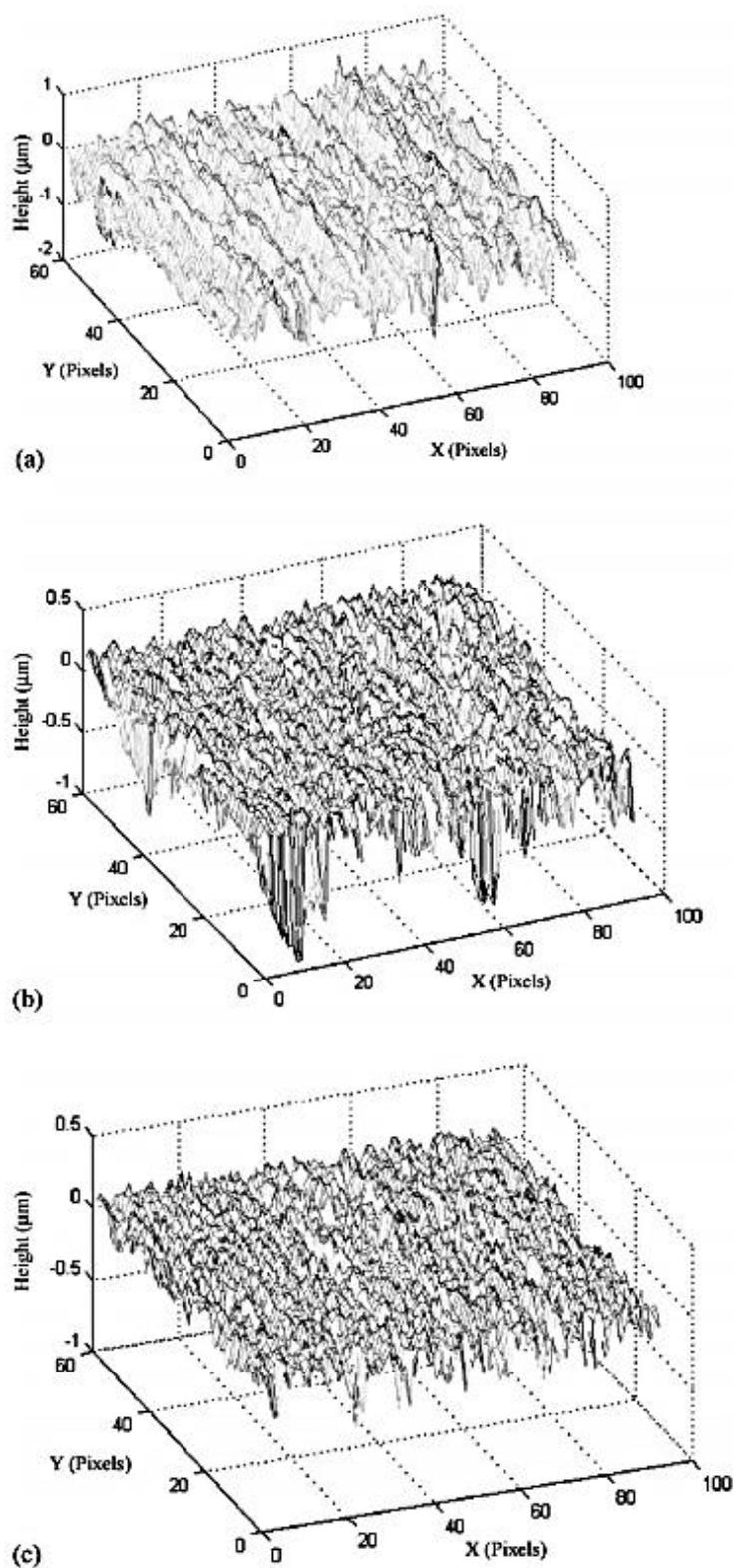


Рис. 5.5. Изменение исходной топографии поверхности при износе:
а – исходная поверхность; б – после 105 мин; с – после 250 мин работы

Известно, что износ пар трения зависит от нагрузки. В соответствии с формулой Арчарда износ выражается следующей зависимостью

$$h = \frac{k_w FL}{A_a H}$$

Здесь h – линейный износ; F – нагрузка; L – путь трения; A_a – номинальная площадь контакта; H – твердость изнашиваемой (менее твердой) детали; k_w – безразмерный коэффициент износа, характеризующий его темп.

С другой стороны, линейная интенсивность изнашивания I_h по И.В. Крагельскому и Н.М. Михину [64] определяется зависимостью

$$I_h = i_h A_r / A_a,$$

где i_h – удельная интенсивность изнашивания, которая выражается соотношением

$$i_h = \frac{2V_d \pi R}{A_r n \langle a \rangle}.$$

Здесь V_d – деформированный объем микронеровностей; n – число циклов нагружения, приводящих к износу неровностей; $\langle a \rangle$ – средний размер пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии; R – радиус закругления верхней части фрактальной неровности и A_r – фактическая площадь контакта (рис. 5.6).

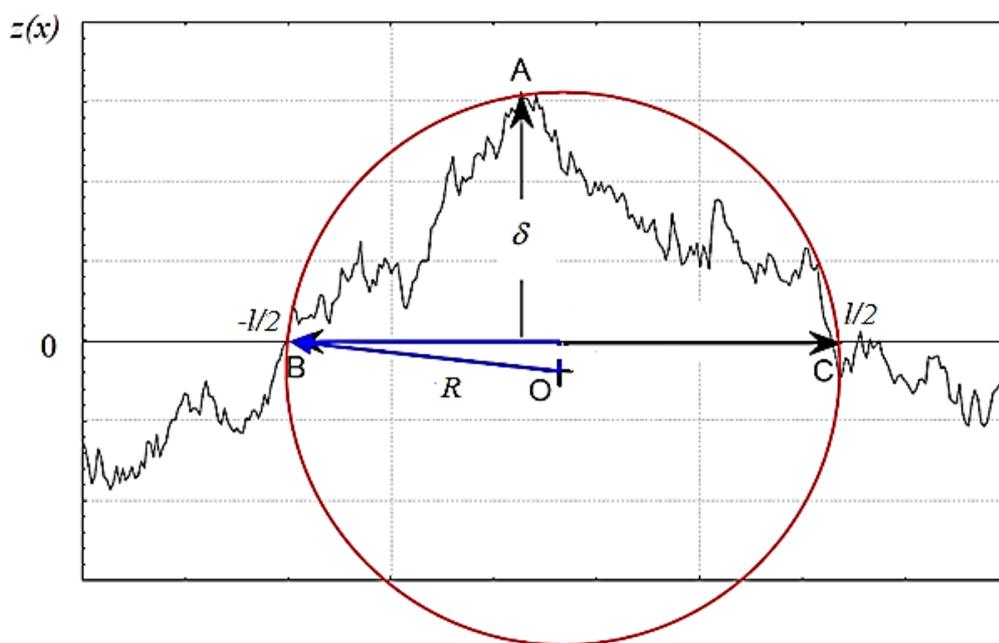


Рис. 5.8. Фрактальная модель микровыступа

Радиус закругления верхней части фрактальной неровности и фактическую площадь контакта (для пластического состояния) для фрактального выступа можно определить как

$$R = \frac{l^{(D-1)}}{4\pi^2 G^{(D-2)} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2}}}, \quad A_r = \frac{F_p}{H}.$$

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

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

где ε_p – относительное удлинение образца из рассматриваемого материала, приводящее к разрыву; ε_t – относительная деформация, связанная с трением и оцениваемая следующей зависимостью:

$$\varepsilon_t = c \cdot f \cdot tg\theta$$

Здесь c – коэффициент ($c = 0,01 \dots 0,05$), f – коэффициент трения; θ – угол наклона неровностей; t_p – показатель степени в уравнении кривой выносливости.

Например, для стальных элементов пары трения (на основе модели поверхности) примем: $c = 0,03$; $f = 0,15$; $\theta = 6^\circ$ ($tg\theta = 0,105$); $\varepsilon_p = 0,2$; $t_p = 1,3$.

Тогда

$$n = \left(\frac{2 \cdot 0,2}{0,03 \cdot 0,15 \cdot 0,105} \right)^{1,3} = 6,4 \cdot 10^3$$

Объем отдельной деформированной неровности, моделируемой в виде сферического сегмента (рис. 5.6) равна

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

Преобразуем это выражение, введя в него площадь контакта. Тогда можно записать

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

где

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

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

С учетом множественности пятен контакта запишем

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

После интегрирования получим (для $D_p \neq 1,5$)

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

Найдём связь между коэффициентом износа и интенсивностью изнашивания. Объем изношенного материала при адгезионном взаимодействии поверхностей подчиняется уравнению Арчарда и имеет вид

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

В первом приближении можно принять, что $V_d = h \cdot A_a$, тогда интенсивность изнашивания будет определяться следующим соотношением

$$I_h = \frac{dh}{dL} = k_w \frac{p_a}{H} = k_w \frac{A_r}{A_a}.$$

Ранее приводилась формула (по И.В. Крагельскому и Н.М. Михину)

$$I_h = i_h \frac{A_r}{A_a}.$$

Тогда можно записать, что коэффициент износа равен (при $a_s = 0$)

$$k_w = i_h = \frac{V_{dp}}{A_r n_p d_n} = \frac{\frac{1}{24} D_p A \left[\frac{3a_c^2}{\pi(2-D_p)} + \frac{B \cdot a_c^{3-2D_p}}{3-2D_p} \right]}{G^{(D_p-1)}(\ln \gamma)^{\frac{1}{2}} \cdot n \cdot \langle a \rangle}$$

Представим результаты компьютерного моделирования износа пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии. Исходные данные были приняты следующими: твердость изнашиваемой стальной детали $H = 2000$ МПа ($2 \cdot 10^9$ Па); Эквивалентный модуль упругости $E^* = 10^5$ МПа; число

циклов нагружения, как было показано ранее, $n_p = 6,4 \cdot 10^3$ (при $c = 0,03; f = 0,15; \theta = 6^0; \varepsilon_p = 0,2; t_p = 1,3$). Параметры микрогеометрии фрактальной эквивалентной поверхности при контакте с гладкой, которая заменяет собой две исходные шероховатые поверхности, представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметры микрогеометрии эквивалентной поверхности

R_q , мкм;	0,8	1,315	3,5	6
D_p	1,555	1,528	1,461	1,428
G , мкм;	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	0,0325	0,158

В процессе моделирования для упрощения расчётов считалось, что соотношение между R_q и фрактальной размерностью имеет вид [226]

$$D_p = \frac{1,548}{R_q^{0,041}}$$

Амплитуду фрактальной шероховатости можно определить из уравнения

$$R_q^2 = \frac{G^{2(D_p-1)} L_m^{2(2-D_p)}}{\sin \left[\frac{\pi(2D_p-3)}{2} \right] \Gamma(2D_p-3)}$$

где $L_m = 800$ мкм; $\Gamma(\dots)$ – гамма функция.

Влияние фрактальной шероховатости и размерности на величину коэффициента износа при прочих неизменных факторах представлено на рис. 5.7 и 5.8. Как видно из рис. 5.7 и 5.9, рост изрезанности поверхности (фрактальной размерности D_p) и среднего квадратического отклонения профиля R_q приводит к увеличению коэффициента износа k_w . Учитывая, что на начальном этапе изнашивания (приработке) происходит трансформация поверхности и, как правило, снижение среднего квадратического отклонения ординат профиля, то в период приработки темп изнашивания, как правило, переменный, и постепенно снижается с течением времени. Этот факт подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

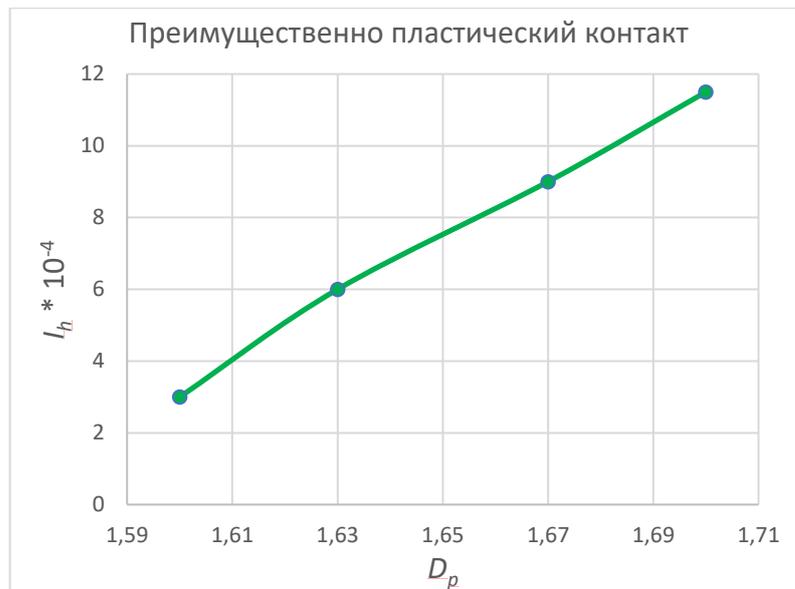


Рис. 5.7. Зависимость интенсивности износа от фрактальной размерности

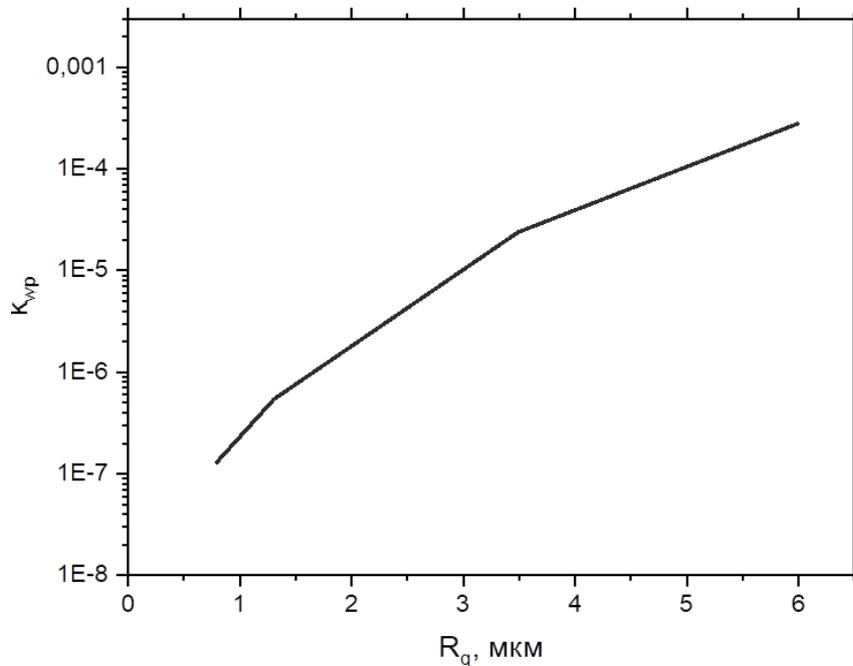


Рис. 5.8. Зависимость коэффициента износа от R_q .

Таким образом, моделируя контакт фрактальных поверхностей с оценкой параметров контактного взаимодействия, представляется возможным оценить объём пластически деформированного материала микровыступов и найти число циклов, приводящее к отделению (изнашиванию) этого материала, что приведёт к изменению микрогеометрии сопряжённых поверхностей и изменению интенсивности изнашивания.

Последовательно выполняя расчёт, можно смоделировать процесс изнашивания микровыступов, находящихся в пластическом состоянии.

Предложенный подход также позволяет прогнозировать продолжительность этапа приработки. Так, используя уравнение Арчарда, можно записать

$$h = k_w \frac{F_N L}{A_a H} = \frac{a_c}{\pi R},$$

Тогда путь трения, соответствующий окончанию приработки, будет

$$L = \frac{H a_c A_a}{\pi k_w F_N R}.$$

После приработки пятна контакта будут находиться в упругом состоянии.

5.3. ИЗНАШИВАНИЕ ПРИ УПРУГОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ НЕРОВНОСТЕЙ

Рассмотрим особенности оценки коэффициента изнашивания в условиях упругого состояния пятен контакта при сохранении принципов рассмотренного ранее подхода. При малых нагрузках несущая способность поверхности определяется структурными особенностями фрактально шероховатого слоя. При этом субмикронеровности, как было указано ранее, деформируются пластически, и износ происходит в условиях пластической деформации до тех пор, пока при заданной нагрузке с увеличением площади микроконтактов эти микронеровности не приобретут упругое состояние. Тогда процесс изнашивания будет происходить в условиях преимущественно упругого контакта. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что в этом случае интенсивность изнашивания и, следовательно, коэффициент износа, имеет постоянное значение, что характеризует период нормального изнашивания.

Анализ изношенных поверхностей позволяет определить, что ведущим видом изнашивания является адгезионный износ: отсутствуют следы пропахивания, характерные для абразивного износа, и вырывы из-за

схватывания, указывающие на когезионный износ. Модель изнашивания поверхности на уровне фрактальной шероховатости в условиях упругого контакта подразумевает по прошествии некоторого цикла напряжений простой срез вершины микровыступа, которую затрагивает упругая деформация при контактном взаимодействии поверхностей. Следует отметить, что площадь среза неровностей на высоте изнашивания для предлагаемой модели изнашивания и действительная площадь микровыступов после износа реальной поверхности несколько не совпадают. Измерение изношенной поверхности и площади среза неровностей на модели на том же уровне представлены на рис. 5.9 [227].

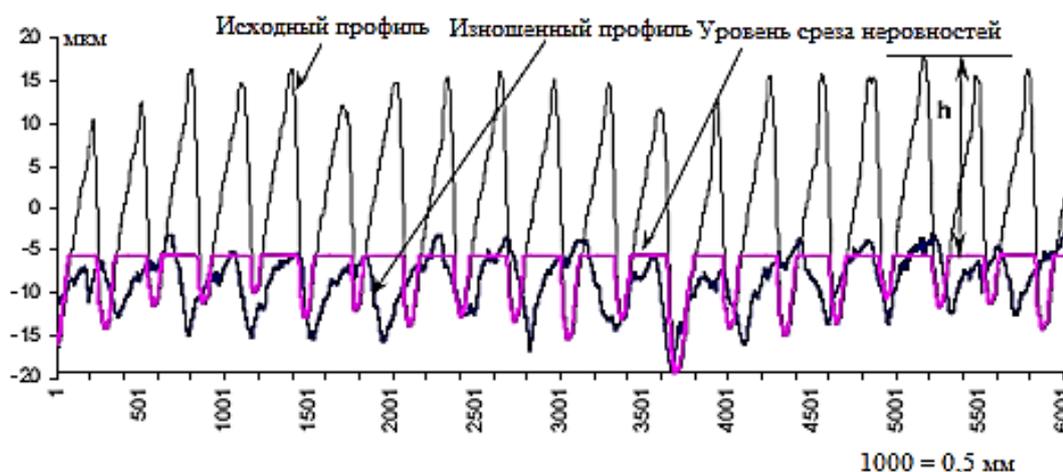


Рис. 5.9. Износ поверхности (профильная оценка)

В предлагаемой модели это различие не учитывается, полагая, что величина линейного износа сохраняется.

Представим модель изнашивания микронеровностей, находящихся в упругом состоянии. Фактическая площадь упругого контакта фрактальной шероховатой поверхности 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.

Определим объем отдельной упруго деформированной неровности через площадь упругого пятна контакта a как

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

Для множественного контакта объем изношенного материала найдём как сумму по всем пятнам контакта, находящимся в упругом состоянии:

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

Число циклов нагружения, приводящих к отделению материала от поверхности и образованию частиц износа оценим следующей известной зависимостью [64]

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

Здесь σ_B - временное сопротивление разрыву; k' - коэффициент, принимаемый для высокоэластичных материалов $k' = 3$ и для хрупких $k' = 5$; f_{min} - коэффициент трения, соответствующий установленному контактному давлению; p_r - фактическое давление, равное $p_r = F_N/A_r$; t_e - показатель степени в уравнении Веллера (для сталей принимают $t_e = 10...14$).

Например, число циклов нагружения, приводящих к отделению материала от поверхности и образованию частиц износа для стали 45 (образец подвержен закалке 850^0 , охлаждение в воде, отпуск при 500^0) с $\sigma_B = 830$ МПа при фактическом давлении 280 МПа будет

$$n_e = \left(\frac{830}{5 \cdot 0,2 \cdot 280} \right)^{12} = 0,46 \cdot 10^6,$$

Анализируя представленные выше зависимости, можно сделать вывод, что такие факторы, как деформированный объем неровностей и средняя площадь пятен контакта, зависят от выбранного значения a_L . Приняв во внимание результаты исследований, полученных в рамках усталостной гипотезы изнашивания, предложенной И.В. Крагельским и Н.М. Михиным [64], запишем выражение для линейной интенсивности изнашивания (или

коэффициента изнашивания) в виде

$$i_h = k_{we} = \frac{\sqrt{\pi/a_L} V_e}{2A_{re} n_e}$$

На рис. 5.10 представлен график зависимости линейной интенсивности изнашивания i_h (коэффициента износа) от площади максимального пятна контакта, находящегося в упругом состоянии.

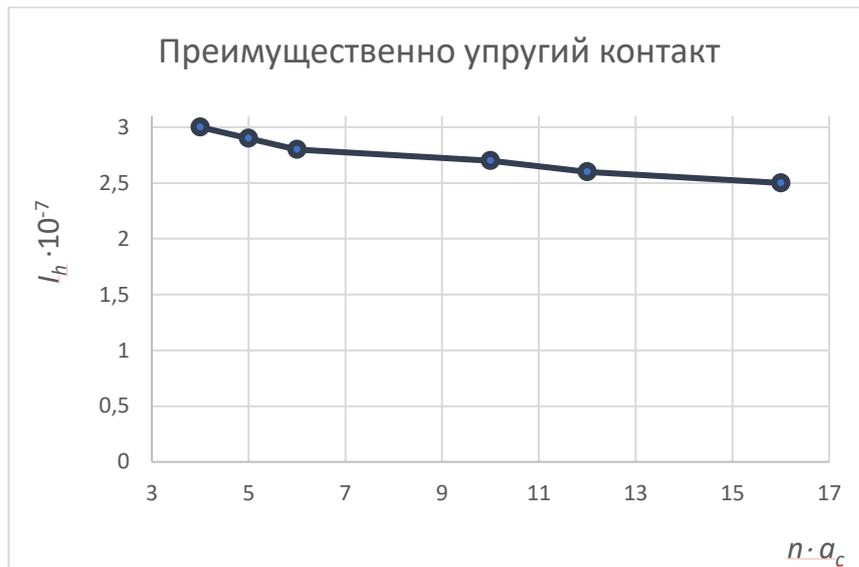


Рис. 5.10. Зависимость I_h от максимальной площади пятна контакта

График представлен в виде зависимости линейной интенсивности изнашивания i_h от произведения $n \cdot a_c$, при этом $n = 5; 6; 7; \dots; 15$. Как показывают результаты расчета коэффициент износа имеет практически постоянное значение при рассматриваемом увеличении площади пятен контакта. Это говорит о том, что в процессе нормального изнашивания коэффициент износа практически постоянен, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Таким образом, моделирование контактного взаимодействия фрактальных поверхностей дало возможность определить объём упруго деформированных микровыступов, а применение модели Герца для упругого контакта и гипотеза изнашивания И.В. Крагельского и Н.М. Михина позволила построить модель изнашивания фрактальных поверхностей при упругом состоянии пятен контакта для малых нагрузок.

5.4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛА ТРЕНИЯ

Прогнозирование работоспособности трибосопряжения возможно, если мы знаем величину допустимого износа и интенсивность изнашивания, т.е. скорость разрушения поверхностей. Представим процедуру оценки работоспособного состояния фрактальных поверхностей трения.

Если представить, что износ микронеровности величиной h_i происходит за 1 цикл, можно найти отношение приращения объема к приращению пути трения. В этом случае путь трения S будет равен диаметру пятна контакта – $2r$, на котором произошёл цикл изнашивания. Тогда, приняв за износ объем изношенного микровыступа в виде $w = \pi r^2 h / 3$, и отнеся его к пути трения S , можно записать

$$\frac{dw}{dS} = \frac{\frac{1}{3}\pi r^2 h}{2r} = \frac{1}{6}\pi r h.$$

Здесь S – путь трения ($S = 2r$); h – линейный износ выступа; r - радиус пятна контакта.

Используя представленные ранее формулы связи радиуса скругления сферического микровыступа с фрактальным, можно найти значение высоты износа h микронеровности при её основании S , которая, как было сказано ранее, равна единичному пути трения [228??]:

$$h = 2G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}S^{3-D_S}.$$

Подставив приведенное выражение для h в уравнение определения $\frac{dw}{dS}$, получим

$$\frac{dw}{dS} = \frac{\pi G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}S^{4-D_S}}{6}.$$

Объем изношенного материала отдельного выступа можно найти, проинтегрировав предыдущее дифференциальное уравнение:

$$w_i = \frac{\pi G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}}{6(5-D_S)} S_i^{5-D_S}.$$

Связь между диаметром площадки износа и ее площадью найдём как

$$a_i = \pi S_i^2 / 4.$$

Здесь в качестве диаметра выступает единичный путь трения $S = d = 2r$.

Тогда скорость изнашивания (темп износа) определим из соотношения

$$\frac{dw}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{1}{3} \pi r^2 dh \frac{1}{dt} \frac{dt}{ds} = \frac{1}{3} \pi r^2 \frac{dh}{dt} v^{-1}.$$

Здесь v – скорость скольжения.

В работе [229] приведена следующая зависимость для темпа износа, мм/ч:

$$\frac{dh}{dS} = \frac{8G^{D_S-2} (\ln \gamma)^{1/2} S^{-D_S} p v}{\pi \sigma_T}.$$

Здесь p - давление на пятне контакта; σ_T - предел текучести изнашиваемого материала (меньшая).

Полагаем, что процессы износа (темп износа) изнашиваемой поверхности отдельного микровыступа идентичны. В этом случае, используя подобие, можно записать:

$$\frac{d\delta}{dS} = \frac{h}{L} = \frac{hAa}{LAa} = \frac{\sum_{i=1}^{n_r} w_i}{LAa}$$

Здесь $\frac{d\delta}{dS}$ – темп износа отдельного микровыступа; h – линейный износ поверхности на некотором пути трения L , где $L < S$.

Учитывая, что

$$\frac{d\delta}{dS} = 2(3 - D_S) G^{D_S-2} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2}} S^{2-D_S}, \quad 2 < D_S < 3$$

получим

$$S = L^{1/(D_S-2)} \left[\frac{2(3 - D_S) G^{D_S-2} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2}} Aa}{\sum_{i=1}^{n_r} w_i} \right]^{1/(D_S-2)}.$$

Здесь $\sum_{i=1}^{n_r} w_i$ – сумма объёма изношенного материала всех микровыступов, которые составляют фактические площади контакта; n_r – число пятен фактического контакта, определяемое по фундаментальному закону Корчака относительно максимальной площади пятна контакта - a_L :

$$n_r = \left(\frac{a_L}{a}\right)^{D/2}.$$

Тогда, используя приведенные ранее зависимости, представляется возможным определить приведенный коэффициент износа:

$$K_w^* = \frac{2}{3} G^{D_S-2} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2}} \frac{f H A r}{\pi (4 - D_S) p_a A a S^{D_S-2}}.$$

Зависимость темпа износа от времени и кривая износа для разных по качеству поверхностей (разных D), представлены на рис. 5.11. и 5.12.

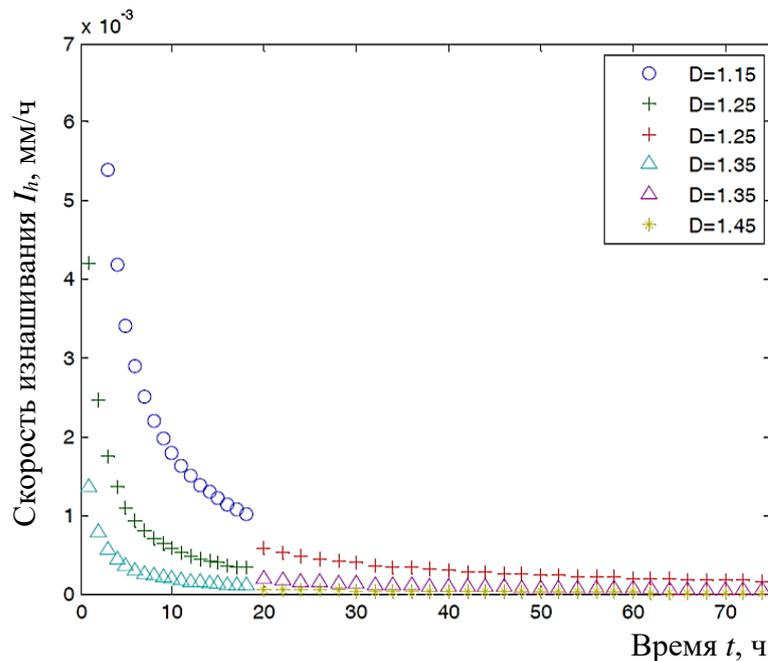


Рис. 5.11. Зависимость темпа износа от времени

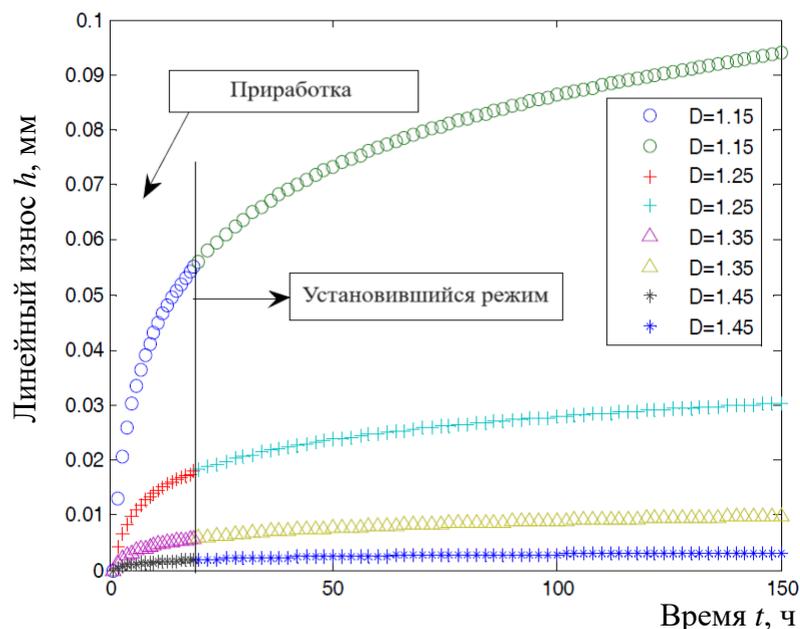


Рис. 5.12. Зависимость износа от времени

Если темп износа заменить на приведенный коэффициент износа, а время - на диаметр пятна, то получим зависимость, представленную на рис. 5.13. При изнашивании диаметр пятна касания растет, а коэффициент износа падает, что подтверждается экспериментально.

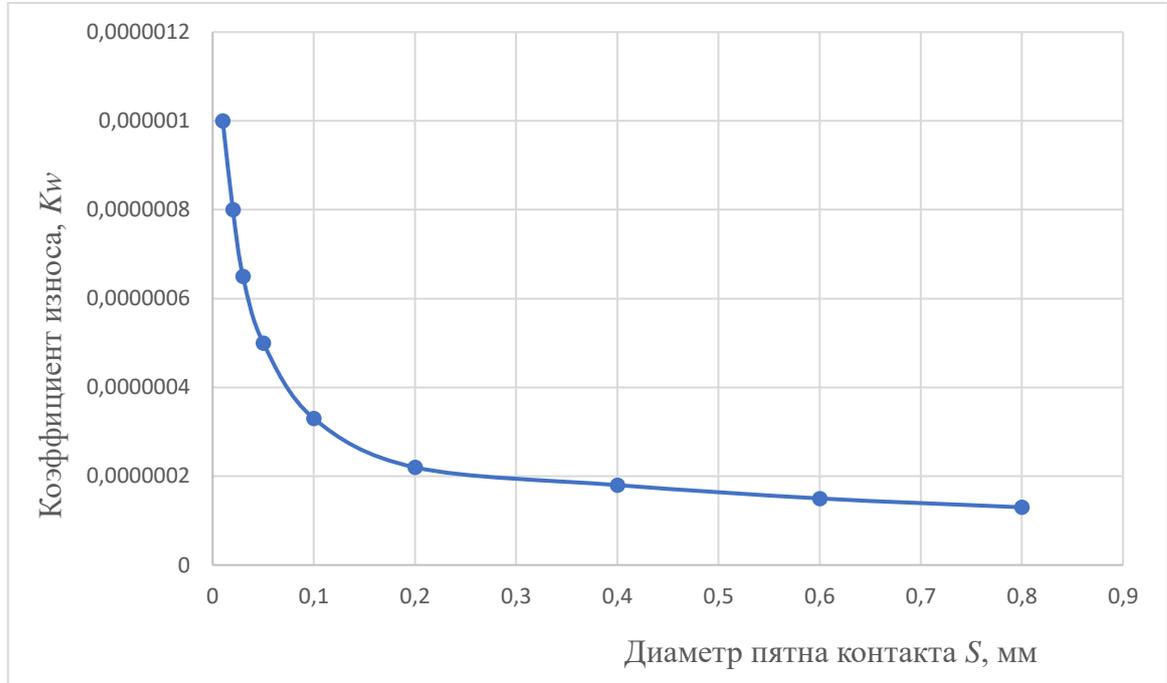


Рис. 5.13. Зависимость коэффициента износа от диаметра пятна контакта

При контактировании реальных поверхностей есть пятна контакта, находящиеся в пластическом состоянии, а есть и те, что находятся в упругом состоянии. Поэтому при оценке износа фрактальных моделей поверхностей с помощью моделирования трёхмерного контактного взаимодействия, нужно учитывать оба этих состояния, и тогда объёмный износ можно найти по формуле:

$$V = (k_{wp}A_{rp} + k_{we}A_{rt})L = \frac{D_p}{2 - D_p} \left[k_{wp} a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2} + k_{we} \left(a_L - a_L^{D_p/2} a_c^{(2-D_p)/2} \right) \right] L$$

Учётом того, что $a_L = \frac{2-D_p}{D_p} A_r$, запишем

$$V = A_r \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wp}) \cdot \left(\frac{2 - D_p}{D_p} A_r \right)^{\frac{D_p-2}{2}} \right]$$

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

На рис. 5.14 приведена зависимость коэффициента износа от времени для модели поверхности с параметрами: сталь 45 шлифование; $R_a = 0,4$ мкм; НВ 280; $\sigma_B = 830$ МПа, $D = 1,4$; $G^* = 10^{-7}$.

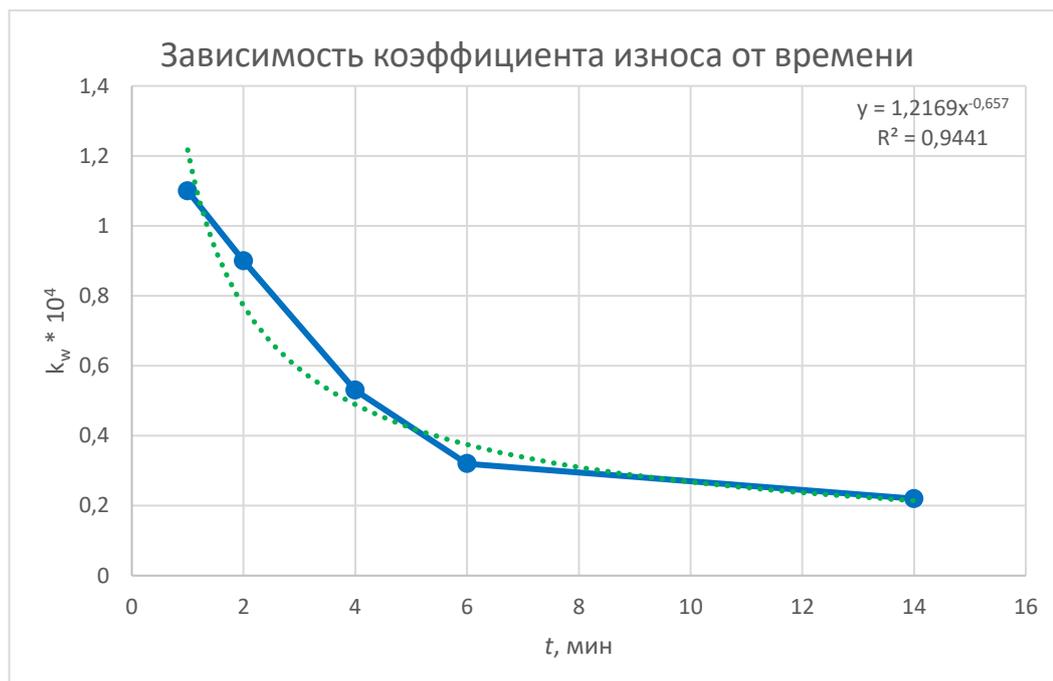


Рис. 5.14. Зависимость коэффициента износа от времени

Как видно из представленной зависимости, коэффициент износа в период приработки с ростом пути трения уменьшается. Этот факт подтверждается большим количеством экспериментов, а также расчетами, приведенными ранее. В общем случае зависимость коэффициента износа от времени можно выразить следующим степенным выражением:

$$k_w = at^{-b}$$

где a и b – параметры, характеризующие процесс изнашивания для конкретной пары трения и условий работы. С величиной достоверности результата $R^2 = 0,944$ уравнение регрессии для представленного примера примет вид

$$k_w = 1,217 t^{-0,657}$$

Наличие разных видов зависимостей коэффициента трения и износа в зависимости от разного состояния пятен контакта микровыступов говорит о том, что существует некоторая оптимальная шероховатость, для которой величина износа при прочих равных условиях будет минимальной. Рассмотрим последнее выражение для определения объёма изношенного материала по всем пятнам контакта (как в пластическом, так и в упругом):

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

Введем безразмерные факторы:

$$V^* = \frac{V}{A_a L}; \quad A_r^* = \frac{A_r}{A_a};$$

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

С учетом безразмерных факторов перепишем уравнение в виде

$$V^* = A_r^* \left[k_{we} - (k_{we} - k_{wp}) \left(\frac{D_p}{(2 - D_p) A_r^*} \frac{\pi^{3/(D_p - 1)}}{2,4^{1/(D_p - 1)}} \frac{G^*}{\psi^{2/(D_p - 1)}} \right)^{\frac{2 - D_p}{2}} \right].$$

По представленному уравнению можно оценить влияние фрактальной размерности на величину объема изношенного материала (рис. 5.15) при следующих данных: $\psi = 0,01$; $G^* = 10^{-7}$; $k_{we} = 10^{-6}$; $k_{wp} = 10^{-4}$. С увеличением фрактальной размерности величина износа проходит через минимум, при этом с уменьшением относительной фактической площади значение минимума снижается. В настоящей работе не рассматривается переход от адгезионного изнашивания к когезионному, связанному со схватыванием, и не проводился анализ критериев подобного перехода, известных в литературе. Уменьшение же на порядок относительной площади контакта приводит примерно к такому

же снижению износа, а минимум относительного износа для данных условий соответствует фрактальной размерности примерно равной 1,5.

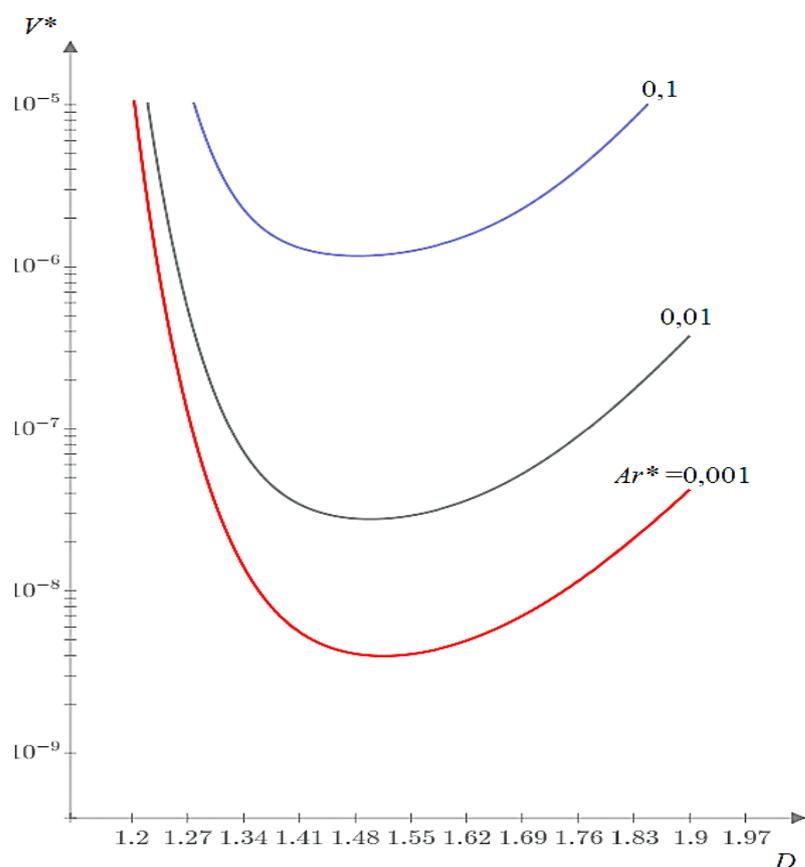


Рис. 5.15. Зависимость относительного объема износа от размерности D

Рисунок 5.16 отражает зависимости относительного объемного износа от соотношения коэффициентов износа при пластическом и упругом контактах. Можно отметить, что износ зависит от процесса с малой интенсивностью, а также от разности между интенсивностями изнашивания одновременно протекающих процессов. Так, при классе износостойкости КИ7 для ведущего вида изнашивания ($k_{we} = I_h = 10^{-7}$) и разности с сопутствующим видом изнашивания на два порядка (красная линия) наблюдается минимальный износ. При той же интенсивности $k_{we} = I_h = 10^{-7}$, но разности в три порядка имеем повышенный износ.

Таким образом, разработанная модель изнашивания фрактальных поверхностей позволяет из общего процесса выделить этап приработки (изнашивание происходит в преимущественно пластическом состоянии) и

период нормальной работы (большинство пятен контакта перешли в упругое состояние в процессе приработки) для заданных условий.

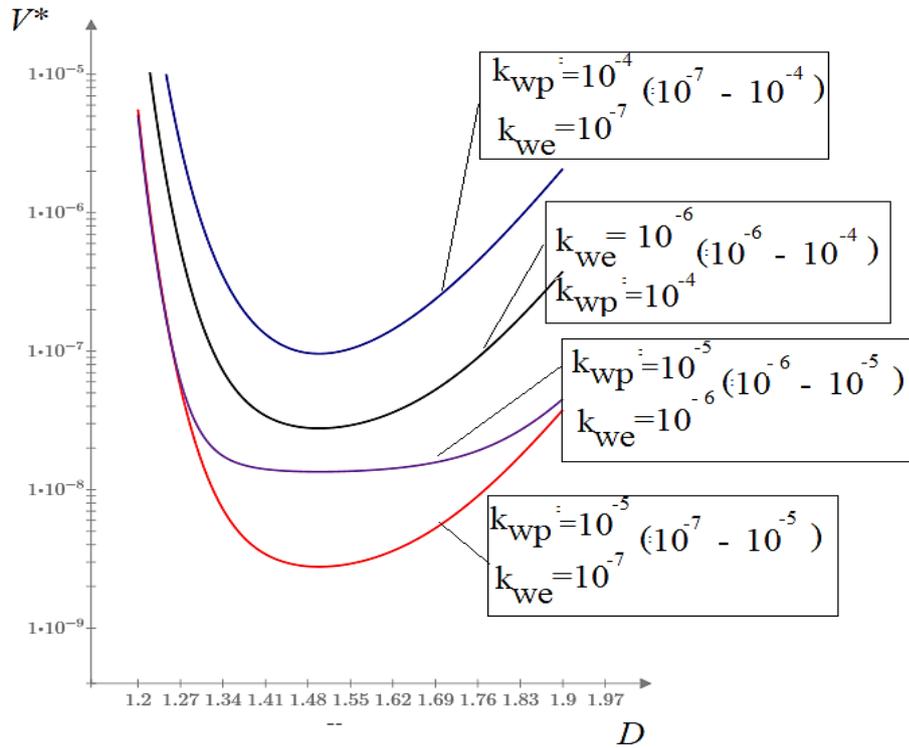


Рис. 5.16. Зависимость относительного объема износа от размерности D при разных коэффициентах износа для пластического и упругого контакта

Величина износа, кроме других влияющих на процесс факторов, зависит, в частности, от структурных особенностей взаимодействующих поверхностей и от разности интенсивностей изнашивания одновременно протекающих процессов износа в пластическом и упругом состоянии микровыступов. Кроме того, минимум износа соответствует поверхностям с фрактальной размерностью профиля $D \approx 1,5$.

5.5. ОЦЕНКА РЕСУРСА ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЙ МУФТЫ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

Применим полученные в работе результаты и оценим параметры предохранительной муфты стрелочного перевода как слабонагруженного узла трения. Железнодорожные стрелочные переводы представляют собой

сложные инженерные конструкции, неотъемлемые для обеспечения плавного и безопасного движения поездов на перекрестках путей. Начиная с момента их изобретения, стрелочные переводы продолжают развиваться и совершенствоваться, адаптируясь к современным технологиям и требованиям железнодорожной инфраструктуры. Стрелочные переводы претерпели множество изменений и улучшений, каждое из которых способствовало более эффективному, безопасному и устойчивому движению поездов. В частности, нашли применение новые спеченные порошковые фрикционные материалы, которые могут обеспечить надежную работу стрелочного перевода требуемый срок (около 5 лет). Расчет износостойкости фрикционных материалов предохранительной муфты и муфт сцепления требует нового подхода в связи с тем, что известные в настоящее время методики расчета основываются на экспериментальных данных только для некоторых пар трения (сталь-ретилак, сталь-ферродо, сталь-сталь), поэтому применение новых перспективных фрикционных материалов и использование приближенных значений факторов, которые определяют триботехнические показатели, приводит к существенным погрешностям при оценке износостойкости и сроке службы предохранительной муфты стрелочного перевода (рис. 5.17).

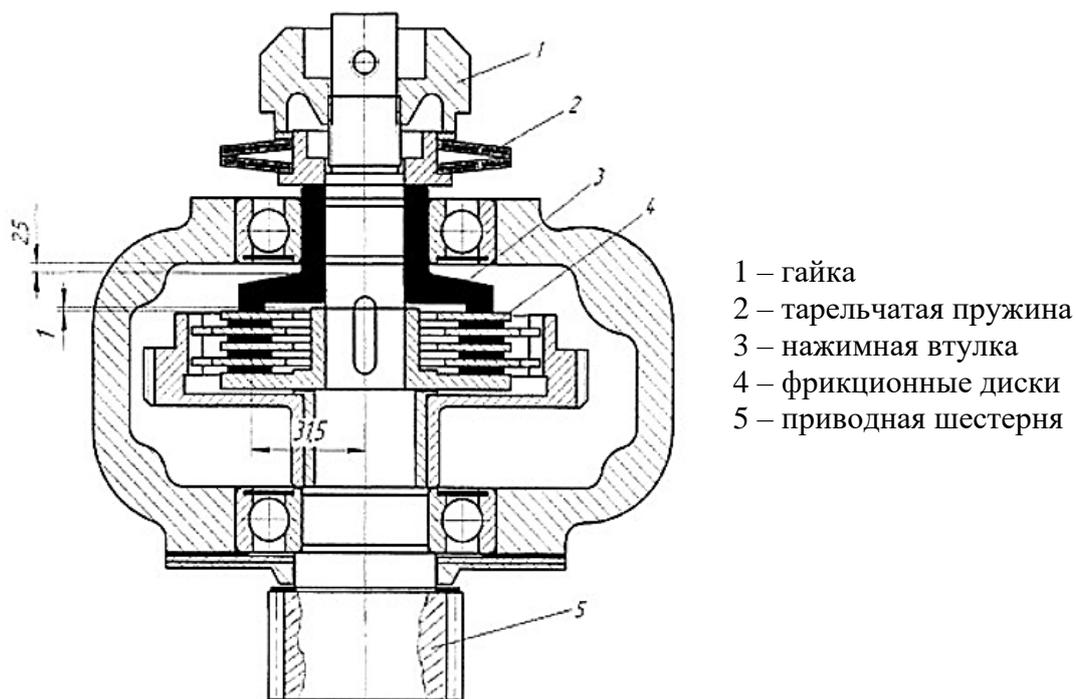


Рис. 5.17. Конструкция предохранительной муфты

Оценим долговечность фрикционной пары с накладками из спеченного порошкового материала (СПФМ), имеющего физико-механические и теплофизические характеристики, представленные в таблице 5.2. Для этого рассмотрим процесс *трения* фрикционных дисков. Оценка коэффициента трения важна при выборе требуемого фрикционного материала и определении температурного режима эксплуатации муфты и срока службы. Модель трения состоит из шероховатой стальной поверхности и гладкой металлокерамической (фрактальная размерность будет относиться к стальной поверхности).

Таблица 5.2

Физико-механические и теплофизические характеристики СПФМ

Состав мас. %	Твердость, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Коэфф. теплопроводности λ , Вт/(м·град)	Удельный вес γ , кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·град)	Коэфф. температуропроводности, м ² /с·10 ⁶
Сталь 45 ГОСТ 1050-2013	2000	2,1·10 ⁵	0,30	57,7	7800	503	17,65
СПФМ: Pb - 2; Sn-10; графит - 9; MoS ₂ - 2; SiO ₂ - 5; остальное железо	820	0,86·10 ⁴	0,25	34,4	5300	544	13,40

Учитывая установленную связь между фрактальной размерностью поверхности и параметрами шероховатости, найдем для стальной поверхности

$$D_S = \frac{2.459}{S_q^{0,0208}} = \frac{2,459}{0,852^{0,0208}} = 2,467.$$

Здесь $S_q = R_q = R_a \sqrt{\frac{\pi}{2}}$; для стального диска $R_a = 0.68$ мкм.

На ведущем диске действует номинальный момент $T_H = 14,76$ Н·м. Тогда расчетный момент муфты T_M^* определяют из выражения

$$T_M^* = \beta \cdot T_H = 1,2 \cdot 14,76 = 17,71 \text{ Н·м.}$$

где $\beta = 1,2$ – коэффициент запаса, который учитывает инерционность ведомой части, динамичность нагрузки и колебания коэффициента трения.

При числе пар трения $z = 1$ нажимное усилие определяется выражением

$$F = \frac{\beta \cdot M_H}{f \cdot R_{cp} \cdot z}$$

где f – коэффициент трения; R_{cp} – средний радиус кольцевой поверхности трения. Приняв нажимное усилие $F = 2000$ Н и $R_{cp} = 58$ мм, найдем требуемую величину коэффициента трения:

$$f = \frac{T_M^*}{FR_{cp}z} = \frac{17,71 \cdot 10^3}{2000 \cdot 58 \cdot 1} = 0,153$$

Определим параметры качества стальной поверхности, которые должны реализовать коэффициент трения, не меньше, чем $f = 0,153$. Используя результат теории трения фрактальных поверхностей, полученный в 4 главе, запишем следующее соотношение для коэффициента трения

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

где θ – угол наклона неровностей; ρ – угол трения (имеется виду молекулярная составляющая трения). Учитывая зависимость угла наклона от фрактальной размерности, перепишем выражение для коэффициента трения

$$f = \frac{tg \left[\pi G^{D-1} a_i^{\frac{(1-D)}{2}} \right] + f_a}{1 - tg \left[\pi G^{D-1} a_i^{\frac{(1-D)}{2}} \right] f_a}.$$

При молекулярной составляющей коэффициента трения $f_a = 0,1$, параметре фрактальной шероховатости $G = 10^{-3}$ мкм. и площади единичного пятна контакта $a_i = 100$ мкм², требуемый коэффициент трения будет

$$f = 0,153$$

Решая вышеприведенное уравнение относительно фрактальной размерности профиля D (где $D_S = D+1$), как

$$\frac{\tan\left[\pi \cdot \left(10^{-3}\right)^{D-1} \cdot 100^{\frac{1-D}{2}}\right] + 0.1}{1 - \tan\left[\pi \cdot \left(10^{-3}\right)^{D-1} \cdot 100^{\frac{1-D}{2}}\right] \cdot 0.1} = 0,153, \blacksquare$$

получим $D = 1.445$ ($D_S = 2,445$).

Таким образом, среднее квадратическое отклонение ординат поверхности должно быть меньше

$$S_q \leq \left(\frac{2,459}{D_S}\right)^{1/0,0208} = 1,316 \text{ мкм.}$$

Арифметическое среднее отклонение ординат профиля не должно быть выше $R_a < 1,05$ мкм.

Выполним *тепловой расчет* предохранительной муфты. Из решения уравнения Фурье для линейного теплового потока, направленного по нормали к поверхности трения (согласно полученному А.В. Чичинадзе результату), средняя поверхностная температура на контурной площади определяется по формуле

$$\vartheta(0, \tau) = \frac{4(1 - \alpha_{ТП})W_{ТП}\tau_N}{A'_a \cdot \eta \cdot t_T \sqrt{\lambda_1 \gamma_1 c_1}} \left(0,56t^{1/2} - 0,367 \frac{t^{3/2}}{t_T}\right)$$

Здесь $(1 - \alpha_{ТП})$ – доля теплового потока, идущего в стальной диск; A_a – номинальная площадь контакта (при коэффициенте взаимного перекрытия $K_{\text{вз}} \rightarrow 1$ номинальная площадь контакта представляет собой площадь трения металлокерамического элемента); $\eta = A_c/A'_a$ – относительная площадь касания; λ_1, γ_1, c_1 – теплофизические параметры стали: коэффициент теплопроводности, удельный вес, удельная теплоемкость; τ_N – временной фактор мощности, отражающий характер изменения мощности трения $N(t)$:

$$\tau_N = \frac{N(t)t_T}{W_{ТП}}$$

Временной фактор мощности представим следующей зависимостью:

$$\tau_N = 2,5(1 - 1,6\tau + 0,6\tau^2)$$

Эта зависимость в целом отражает процесс буксования и соответствует граничным условиям: при $\tau = 1$ временной фактор мощности равен нулю, а временной фактор работы равен единице.

Используя данные табл. 5.2, найдем коэффициент распределения тепловых потоков. Для определения коэффициента распределения тепловых потоков полагаем ввиду кратковременности процесса буксования, что тепло проникает на глубину, меньшую, чем толщины фрикционных элементов. В этом случае А.В. Чичинадзе предлагает использовать следующую формулу

$$1 - \alpha_{III} = \frac{1}{1 + \frac{b_{2eff}c_2}{b_{1eff}c_1} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}}$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности; b_{eff} – эффективная толщина элементов пары трения, определяемая по формуле

$$b_{eff} = \sqrt{\frac{at_T}{Fo}}$$

Приняв число Фурье $Fo = 0,333$ для быстропротекающих процессов, найдем:

$$b_{1eff} = \sqrt{\frac{17,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003}{0,333}} = 3,99 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

$$b_{2eff} = \sqrt{\frac{13,40 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003}{0,333}} = 3,47 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Тогда

$$1 - \alpha_{III} = \frac{1}{1 + \frac{3,47 \cdot 10^{-4} \cdot 544}{3,99 \cdot 10^{-4} \cdot 503} \sqrt{\frac{13,40 \cdot 10^{-6}}{17,65 \cdot 10^{-6}}}} = 0,555$$

Для количественной оценки средней поверхностной температуры используем следующую методику. Время буксования найдем по формуле

$$t_T = \frac{I_n \omega_0}{1,2(0,67M_T - M_n)}$$

Здесь I_n – приведенный к валу муфты момент инерции вращающихся и поступательно движущихся частей, Н·м·с²; ω_0 – начальная угловая скорость подвижного диска муфты, с⁻¹.

Работа торможения (согласно ГОСТ 1786-74) вычисляется по формуле

$$W_{III} = \frac{0,2I_n\omega_0^2M_T}{0,67M_T - M_n}$$

Значения ω_0 , I_n и M_n для муфты стрелочного перевода найдем по формулам

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30u}$$

где n_0 – частота вращения двигателя, мин⁻¹; u – передаточное число редуктора, $I_n = 0,0075$ кГ·м², $M_n = 36$ Н·м.

Угловая скорость при частоте вращения электродвигателя (1470 мин⁻¹) и передаточным числом редуктора (20,8) равна

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot 1470}{30 \cdot 20,8} = 7,4 \text{ с}^{-1}, \quad t_T = \frac{0,0075 \cdot 7,4}{1,2(0,67 \cdot 2 \cdot 33,6 - 36)} = 0,005 \text{ с.}$$

Тогда работа торможения равна

$$W_{III} = \frac{0,2 \cdot 0,0075 \cdot 7,4^2 \cdot 2 \cdot 33,6}{0,67 \cdot 33,6 - 36} = 0,612 \text{ Вт.}$$

Номинальная площадь кольцевого контакта фрикционных дисков из порошковых материалов с учетом пористости составляет

$$A'_a = \pi(R_a^2 - R_i^2) \left(1 - \frac{t'_o}{100}\right) = \pi(33^2 - 25^2) \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

где R_a , R_i – наружный и внутренний радиусы фрикционного элемента кольцевого типа.

Используя принятые ранее исходные данные, и, подставив их в уравнение для средней поверхностной температуры с учетом того, что, $\eta = 0,01$, получим

$$\vartheta_{max}^* = \frac{4 \cdot 0,555 \cdot 0,612 \cdot 2,5(1 - 1,6 \cdot 0,186 + 0,6 \cdot 0,186^2)}{1,166 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01 \cdot 0,005 \sqrt{57,7 \cdot 7800 \cdot 503}} \cdot \left[0,56(0,005 \cdot 0,186)^{1/2} - 0,376 \frac{(0,005 \cdot 0,186)^{3/2}}{0,005} \right] = 42^\circ\text{C}$$

Таким образом, расчет показал, что максимальное значение средней поверхностной температуры на контурной площади касания в данном случае не превышает 50 °С. Этот результат важен при выборе состава композиционного материала и при оценке работоспособности жидкого смазочного материала, который после пропитки пористого материала позволяет улучшить триботехнические показатели привода стрелочного перевода.

Оценим *износостойкость* фрикционной пары. В ряде случаев оценку износостойкости проводят по косвенным признакам, например, ограничивают давление или произведение давления на скорость скольжения в паре трения. Для разных сочетаний пар трения существуют соответствующие справочные данные. Однако эти данные не позволяют количественно оценить износ и прогнозировать ресурс работы узла трения.

Оценим ресурс предохранительной муфты для рассматриваемых в работе условий и технических требований. Для оценки интенсивности износа муфты следует установить, какая работа затрачивается на трение и износ при включении (при передаче расчетного момента и выключении, когда проскальзывания нет, износ минимален и им можно пренебречь). Для этого составляют баланс затрат работы при включении муфты. Положим, что весь период включения $t_{вкл1}$ ведущая часть муфты передает расчетный момент T_M^* , причем за время включения она повернется на угол φ_1 . Тогда

$$T_M^* \varphi_1 = \frac{I_a \omega_1^2}{2} + T_c \varphi_2 + A_{тр}$$

где I_a – момент инерции ведомой части, приведенный к валу муфты; T_c – момент сопротивления вращению ведомой части, может быть принят равным $(0,05 \dots 0,12) T_M^*$; φ_2 – угол поворота ведомой части за время $t_{вкл1}$; $A_{тр}$ – работа, затрачиваемая на трение в муфте. Углы φ_1 и φ_2 можно определить из уравнения динамики для ведомой части

$$I_a = \frac{d\omega}{dt} = T_M^* - T_c$$

Принимая факторы I_a , T_M^* , T_c постоянными в период включения, можно записать

$$I_a \omega = (T_M^* - T_c) t_{\text{вкл1}}$$

Откуда время включения (от момента начала, когда угловая скорость ведущего диска $\omega_I = \pi n_0 / (30 u_I \cdot u_{II})$, а ведомого равна нулю до момента, когда угловые скорости оказываются равными)

$$t_{\text{вкл1}} = \frac{I_a \omega}{(T_M^* - T_c)}$$

Угол поворота ведущего диска

$$\varphi_1 = \frac{\omega_1^2 I_1}{(T_M^* - T_c)}$$

Подставив эти значения в исходное уравнение, получим выражение, определяющее затраты энергии на трение при включении

$$A_{\text{тр}} = \frac{0,5 I_a \omega_0^2 T_M^*}{T_M^* - T_c}$$

Приведем численные значения показателей предохранительной муфты (МСП-0,55):

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot 3600}{30 \cdot 2,9 \cdot 3,62} = 35,9 \text{ с}^{-1}$$

$$T_c = \frac{F_{\text{ш}} R_{\text{ш}}}{u_{\Sigma} \eta^4} = \frac{4000 \cdot 0,021}{35,7 \cdot 0,98^4} = 2,55 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$t_{\text{вкл1}} = \frac{0,0075 \cdot 35,9}{17,71 - 2,55} = 0,018 \text{ с}$$

$$A_{\text{тр}} = \frac{0,5 \cdot 0,0075 \cdot 35,9^2 \cdot 17,71}{17,71 - 2,55} = 6,64 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Удельная работа при включении

$$a_{\text{тр}} = \frac{A_{\text{тр}}}{A'_a} = \frac{6640}{1200} = 5,53 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}$$

Здесь $n_0 = 3600 \text{ мин}^{-1}$; u_I и u_{II} – передаточные числа первого и второго каскада; $I_a = 0,0075 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$.

Найдем путь трения за одно включение:

$$S_0 = v t_{\text{вкл} 1} = \frac{\omega_0}{2} r_{\text{ср}} t_{\text{вкл} 1} = \frac{35,9}{2} 29 \cdot 0,018 = 9,4 \text{ мм}$$

Объемный износ металлокерамической накладки w_0 за одно включение, отнесенный к номинальной площади, составит в соответствии с уравнением Арчарда

$$h_0 = \frac{w_0}{A'_a} = k_w \frac{p_a}{H} S_0$$

Если известен коэффициент износа k_w , то легко определить износ за одно включение. Общее число включений до достижения предельного износа накладки $[h]$ найдем из выражения

$$n_{\Sigma} = \frac{[h]}{h_0}$$

Если заданы, исходя из срока службы (до ремонта или замены) число включений и предельный износ, то представляется возможным сформулировать требования к перспективному материалу по износостойкости.

Например, для предельного износа $[h] = 1$ мм. ресурс электропривода СП-6 при условии соблюдения правил эксплуатации составляет $1,2 \cdot 10^6$ переводов (число включений определено величиной $n_{\Sigma} = N_{\text{вкл}} = 1,2 \cdot 10^6$ циклов). Тогда номинальное давление будет

$$p_a = \frac{F}{A'_a} = \frac{2000}{1200} = 1,66 \text{ МПа}$$

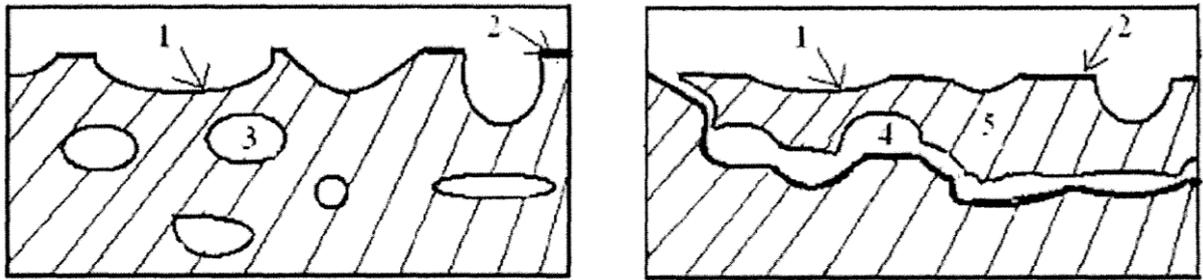
Коэффициент износа пластически деформируемых поверхностных участков композиционного материала оценивается величиной

$$k_{wp} = \frac{h_0 H}{p_a S_0} = \frac{[h] H}{n_{\Sigma} p_a S_0} = \frac{1 \cdot 820}{1,2 \cdot 10^6 \cdot 1,66 \cdot 9,4} = 4,379 \cdot 10^{-5}$$

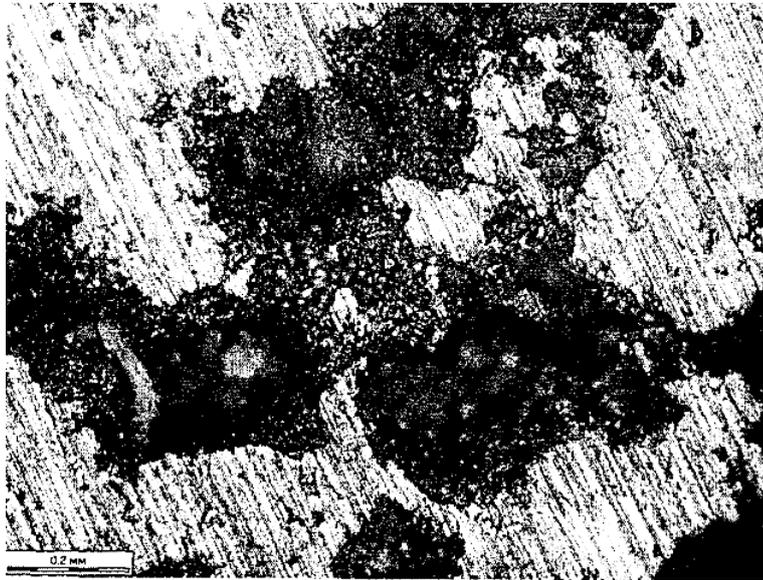
Коэффициент износа является безразмерной величиной. Он представляет собой удельную интенсивность изнашивания и связан с интенсивностью изнашивания следующим выражением:

$$I_h = k_w \frac{p_a}{H}$$

Учитывая механизм изнашивания, представленный на схеме (рис. 5.18), полагаем, что изнашивание носит кумулятивный характер. Износ является результатом накопления повреждений в приповерхностном слое. Повреждение проявляется в виде объединения цепочки пор под поверхностью трения (рис. 5.18 а).



а)



б)

- 1 – поверхностные поры;
- 2 – поверхность трения;
- 3 – внутренние поры;
- 4 – цепочка пор, образующаяся при трении;
- 5 – частица износа

Рис. 5.18. Механизм износа пористого металлокерамического материала:

а) - механизм изнашивания; б) - цепочка пор после трения

Эти цепочки в основном расположены параллельно поверхности трения. Выход цепочки на поверхность приводит к образованию частиц износа, которые затем подвержены дроблению в зоне трения. Число циклов нагружения, приводящих к отделению материала от поверхности и образованию частиц износа, оценим зависимостью [64, 65]:

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

Здесь σ_B - временное сопротивление разрыву; k' - коэффициент, принимаемый для высокоэластичных материалов 3 и для хрупких – 5; f_{min} - коэффициент трения, соответствующий принимаемому контактному давлению; p_r - фактическое давление, равное $p_r = F_N/A_r$; t_e - показатель степени в уравнении кривой выносливости ($t_e = 3...14$).

Определение предела прочности проводилось с помощью прессы. Нагружение осуществлялось с постепенным увеличением усилия сжатия до разрушения металлокерамической накладке. Анализ разрушения пяти дисков с накладками показал, что среднее значение усилия составляет 230 т ($230 \cdot 10^4$ Н). Учитывая, что площадь рабочей поверхности накладке равна 1200 мм, найдем предел прочности при сжатии:

$$\sigma_s = \frac{230 \cdot 10^4}{1200} = 1916 \text{ МПа}$$

Фактическое давление приближенно равно

$$k' f_{min} p_r = k' \tau_n \cong k' H/10 = 3 \cdot \frac{820}{10} = 246 \text{ МПа}$$

Расчётное число циклов нагружения будет

$$n_e = \left(\frac{1916}{246} \right)^{10} = 8,215 \cdot 10^8$$

Приняв во внимание результаты исследований, полученных в рамках усталостной гипотезы изнашивания, предложенной И.В. Крагельским и Н.М. Михиным [64], запишем выражение для коэффициента изнашивания в виде

$$k_{we} \approx \frac{1}{n_e} = \frac{1}{8,215 \cdot 10^8} = 1,217 \cdot 10^{-9}$$

Относительный износ можно оценить по формуле [229, 231]

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

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

При $V^* = I_h$; $A_r^* = 0,05$; $G^* = 10^{-6}/\sqrt{1200} = 2,887 \cdot 10^{-8}$; $\psi = 0,047$,
получим

$$I_h = \sqrt{1 + 3 \cdot 0,153^2 \cdot 0,05} \left\{ 1,217 \cdot 10^{-9} - (1,217 \cdot 10^{-9} - 4,379 \cdot 10^{-5}) \cdot \left[\left(\frac{1,445}{(2-1,445)0,05} \right) \frac{(2,887 \cdot 10^{-8})^2}{0,047(1,445-1)} \right]^{\frac{(2-1,445)}{2}} \right\} = 1,747 \cdot 10^{-8}.$$

Экспериментально была получена величина линейной интенсивности изнашивания для пары сталь с близкой по значению шероховатостью ($Ra = 1,25$ мкм) с композиционным материалом, которая оказалась равной

$$I_h = 1,4 \cdot 10^{-8}$$

Толщина изношенного материала за одно включение составляет

$$h_0 = S_0 \cdot I_h = 9,4 \cdot 1,747 \cdot 10^{-8} = 1,642 \cdot 10^{-7} \text{ мм.}$$

Ресурс электропривода стрелочного перевода, оцениваемый числом включений, оказался равным

$$n_{\Sigma} = \frac{[h]}{h_0} = \frac{1}{1,642 \cdot 10^{-7}} = 6,09 \cdot 10^6$$

Полученное значение превышает нормативное значение примерно в 5 раз. Таким образом, при окончательном выборе фрикционного материала для предохранительной муфты стрелочного перевода следует учесть, что интенсивность изнашивания не должна превышать $[I_h] = 2 \cdot 10^{-8}$, что соответствует износостойкости $I = 5 \cdot 10^7$ или КИ 7/5.

Для сравнения результатов сведем полученные данные и данные триботехнических показателей, полученных в работе В.В. Кондратовича [232], в таблицу 5.3. Сразу можно сказать, что предлагаемая методика даёт гораздо более точные результаты расчёта, близкие к экспериментальным значениям.

Сравнение триботехнических показателей и ресурса

Методика расчета	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания	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	-	$0,140 \cdot 10^{-7}$	-

Для более точной оценки ресурса проектируемой предохранительной муфты с новым фрикционным материалом необходимо в соответствии с предлагаемой методикой расчета иметь следующие данные:

- физико-механические свойства фрикционного материала для проектируемого узла трения (предел прочности, твердость и др.);
- параметры фрикционной усталости изнашиваемой накладки;
- фрактальные параметры более твердого элемента пары трения.

Таким образом, расчетные данные с использованием фрактальных моделей шероховатых поверхностей трения при сравнении их с экспериментальными данными дают более точные результаты оценки долговечности фрикционных дисков предохранительной муфты стрелочного перевода в сравнении с традиционной методикой расчёта.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Таким образом, по результатам работы, изложенной в главе 5, можно сделать следующие выводы.

1. *Разработана модель изнашивания фрактальных поверхностей при малых нагрузках. Установлено, что первоначально изнашивание происходит в преимущественно пластическом режиме деформации неровностей нано-шероховатого слоя, определяя режим приработки, и зависит от упругопластических свойств материала и топографии. Постепенный рост фактической площади контакта из-за износа*

переводит большинство пятен контакта в упругое состояние, снижает интенсивность изнашивания и стабилизирует её, говоря об окончании приработки и переходе в режим нормальной работы.

- 2. Получены зависимости оценки относительного объема изношенного материала, который существенно зависит от площади контакта, физико-механических свойств и фрактальной размерности, а также определены триботехнические показатели для процесса изнашивания при пластическом и упругом состоянии фактических пятен контакта.*
- 3. Установлено, что снижение фрактальной размерности в процессе износа в пластическом режиме (сглаживание) приводит к уменьшению коэффициента изнашивания, а для упругого контакта фрактальная размерность меняется незначительно, из-за чего темп роста площади контакта снижается, и коэффициент изнашивания стабилизируется, показывая слабую зависимость и от нормальной нагрузки.*
- 4. Установлено, что минимум износа наблюдается для фрактальных поверхностей при $D \approx 2.5$. Увеличение высоты выступов или изрезанности неровностей (D) в сравнении с оптимальным значением резко увеличивает износ из-за нахождения большинства пятен контакта в пластическом состоянии, что ускоряет их разрушение, а сглаживание поверхности больше этого значения приводит к росту сопротивления при трении и увеличению износа за счёт адгезии.*
- 5. Разработана методика прогнозирования работоспособного состояния узла трения при малых нагрузках, которая позволяет рассчитать период приработки и темп изнашивания в нормальном режиме, что даёт возможность оценить долговечность трибосопряжения, если известно его предельное состояние. Апробация этой методики на примере оценки работоспособного состояния предохранительной муфты стрелочного перевода дала более близкие значения долговечности относительно экспериментальных значений, чем традиционная методика расчёта.*

ГЛАВА 6. ГЕРМЕТИЧНОСТЬ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ.

Представленная ранее многоуровневая трёхмерная модель инженерных поверхностей позволяет решать задачи контактного взаимодействия, не прибегая к применению различных эмпирических коэффициентов, значения которых на этапе проектирования изделия часто неизвестны. Методологической основой проведенных в работе исследований является фрактальные представления, используемые как для решения задач контактного взаимодействия, трения, изнашивания, так и для задач герметичности уплотнительных устройств. При этом эффективной оказалась модель металл-металлического зазора между шероховатыми поверхностями в виде фрактальной пористой среды.

Задача уплотнения стыков типа «металл – металл» при соблюдении точного взаимного расположения сопрягаемых деталей является актуальной и решается разными способами. Особо точные разъёмные стыки типа «металл – металл» уплотняют методом тонкой плоскостной обработки (притиркой или шабрением). Кроме того, для надёжного уплотнения стыков типа «металл – металл» требуются повышенная жёсткость фланцев и частое расположение стягивающих болтов [191]. Параметры качества поверхности таких элементов уплотнения следующие: $R_a = 0,05...0,5$ мкм, показатели волнистости характеризуются безразмерным отношением суммарной высоты волн (для двух поверхностей) к приведенному радиусу верхней части волн $WR_{\Sigma} / R_{wприв}$, которое изменяется от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ [16]. Другие факторы, существенно влияющие на герметичность плоского стыка (извилистость каналов протекания, пористость и др.), учитываются на основании экспериментальных данных. Они входят неявно в уравнение Дарси для фильтрационного протекания через пористую среду в виде коэффициента проницаемости. Расчет утечек при этом не дает надежных результатов ввиду наличия в них коэффициентов, определяемых экспериментально для частных случаев, либо приближенности оценки высоты щели.

Анализ литературных данных показал, что большая часть информации о просачивании была собрана либо в двух измерениях, либо в меньшей степени с помощью компьютерного моделирования. Параметры, определяющие утечку через межконтактный металл–металлический зазор, часто имеют большой разброс из-за того, что трудно собрать достаточно информации для проведения статистического анализа. Поэтому прогнозирование степени герметичности, приняв приближенно такие параметры, как пористость среды, извилистость и проницаемость, приводит к существенным погрешностям. Программное обеспечение позволяет визуализировать процесс просачивания между трехмерными поверхностями и анализировать процесс перколяции с учетом анизотропии и сократить время на проектирование конкретного уплотнительного устройства. Кроме того, большой интерес представляет процесс формирования каналов просачивания в трехмерной модели, который реализован в компьютерной программе Измерова М.А., Тихомирова В.П. (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022681720 от 16.11.2022), поэтому применение компьютерного моделирования позволит визуализировать процесс просачивания между трехмерными поверхностями с учетом анизотропии, оценить действительные значения параметров каналов протекания (размер, извилистость, пористость и т.д.) и сократить время на проектирование конкретного уплотнительного устройства.

Как было сказано ранее, геометрия поверхностей деталей машин имеет сложное строение при наличии отклонений от идеальной геометрии на разных уровнях: макроотклонения, волнистость, шероховатость, субмикрощероховатость и т.д. В настоящей работе рассматривается многоуровневая модель межконтактного пространства, которая отражает волнистость (предфрактал) и шероховатость (фрактальная пористая среда). Подобное строение зазора в плоском стыке приводит к необходимости рассматривать утечки через щель между волнистыми поверхностями и фильтрацию через пористую среду, определяемую шероховатостью. Тогда общую величину

утечки можно определить как

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

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.

В ряде случаев в связи с небольшим количеством волн на кольцевой поверхности фланца использование той или иной функции высотного распределения вершин волн приводит к существенным ошибкам при оценке параметров контактного взаимодействия и степени герметичности. Имитационное моделирование взаимодействия волнистых поверхностей позволяет использовать статистические методы при многократном повторении машинного эксперимента, имея каждый раз случайный набор чисел (амплитуд волн), распределенных по заданному закону.

Таким образом, решение задачи оценки герметичности металл-металлических уплотнительных устройств можно представить в следующем виде:

1. Разработать методику оценки утечки жидкости через щель между волнистыми поверхностями.
2. Разработать методику расчёта герметичности стыка металл-металлических поверхностей как просачивание через фрактальный пористый слой.
3. Провести экспериментальные исследования герметичности металл-металлических поверхностей для проверки адекватности модели.

6.1. ЩЕЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УТЕЧКИ ЖИДКОСТИ

При достаточно большой высоте волн (низкая точность изготовления поверхностей) размер щели велик, и утечка в основном проходит через неё.

Расчет утечек произведем на основе уравнения Рейнольдса для щели с гладкими стенками (рис. 6.1). Уравнение Рейнольдса запишем в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3(x)}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3(y)}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0.$$

Здесь η – динамическая вязкость; p – давление; h – высота.

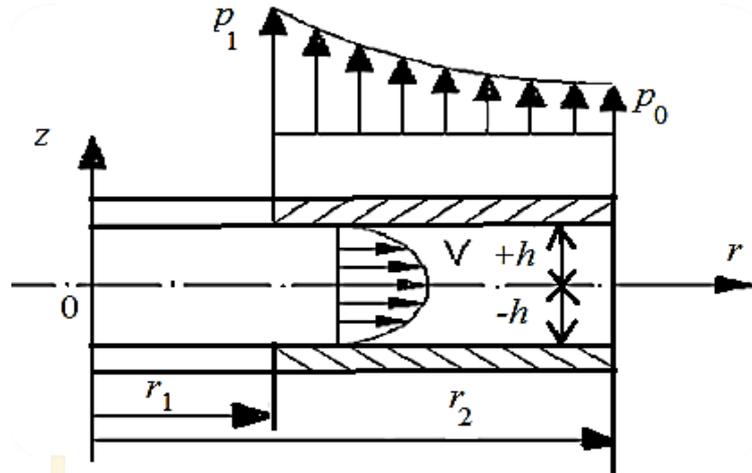


Рис. 6.1. Течение жидкости в зазоре между поверхностями

В цилиндрических координатах состояние уплотняемой среды выражается дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right).$$

Для осесимметричной задачи имеем $\partial p / \partial \varphi = 0$ и $\partial V / \partial \varphi = 0$. В зазоре давление меняется только в радиальном направлении. Тогда имеем $\partial p / \partial z = 0$.

Перепишем предыдущее уравнение в виде

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \eta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right).$$

Так как обычно в конструктивных исполнениях торцовых уплотнений ширина колец $(r_2 - r_1)$ мала, то можно принять $\partial V / \partial r = 0$. Тогда

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \eta \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}.$$

Запишем граничные условия:

$$V=0 \text{ при } z=+h;$$

$$V=0 \text{ при } z=-h.$$

Интегрирование дифференциального уравнения дает

$$V = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} z^2 + C_1 z + C_2.$$

Учитывая граничные условия, запишем для неподвижного соединения

$$\begin{cases} 0 = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} h^2 + C_1 h + C_2, \\ 0 = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} h^2 - C_1 h + C_2. \end{cases}$$

Из решения системы уравнений найдем постоянные интегрирования

$$C_1 = 0, \quad C_2 = -\frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} h^2.$$

С учетом полученных постоянных интегрирования, можно записать

$$V = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} (z^2 - h^2).$$

Величина утечки, отнесенная к единице длины уплотнения, составит

$$\int_{-h}^h V dz = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \int_{-h}^h (z^2 - h^2) dz = -\frac{2}{3} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r}.$$

Тогда общая утечка равна

$$Q = -\frac{2}{3} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r} 2\pi r = -\frac{4}{3} \frac{\pi r h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r}.$$

Отсюда

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{3\eta Q}{4\pi r h^3}.$$

Граничными условиями будут

$$p = p_1 \quad \text{при} \quad r = r_1,$$

$$p = p_0 \quad \text{при} \quad r = r_2.$$

Разделив переменные интегрирования в предыдущем уравнении, получим

$$\partial p = -\frac{3\eta Q}{4\pi h^3} \frac{\partial r}{r}.$$

Интегрирование дает

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{3\eta Q}{4\pi h^3} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Величина утечки для кольцевого зазора с гладкими стенками будет

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

Здесь $h = 0,5(H_0 - \delta_{max})$.

Реальная утечка Q зависит от параметров качества поверхностных слоев соединения (отношения высотного параметра шероховатости R_p к высоте щели) и от просачивания по контурным площадкам в радиальном и окружном направлениях

$$Q^* = \chi Q,$$

где χ – коэффициент потока, который определяют, анализируя экспериментальные данные для разных видов подготовки поверхностей [15].

Расчёты по предложенному алгоритму представлены в виде графиков на рис. 6.2 и 6.3.

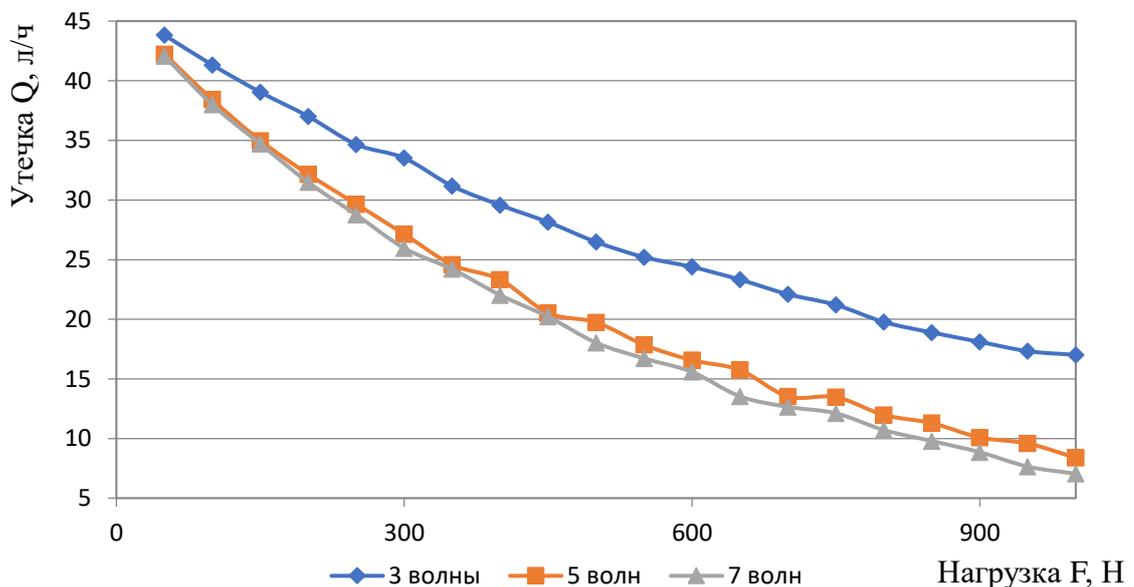


Рис. 6.2. Зависимость утечки Q от нагрузки F для разного числа волн

Исходные данные: $W_p = 10$ мкм; $\Delta p = 0,9$ МПа; $r_2 - r_1 = 5$ мм; динамическая вязкость $\eta = 0,001$ Па·с (вода). Для оценки влияния макрогеометрии на герметичность уплотнения каждый график построен в трех

вариантах при разных числах волн.

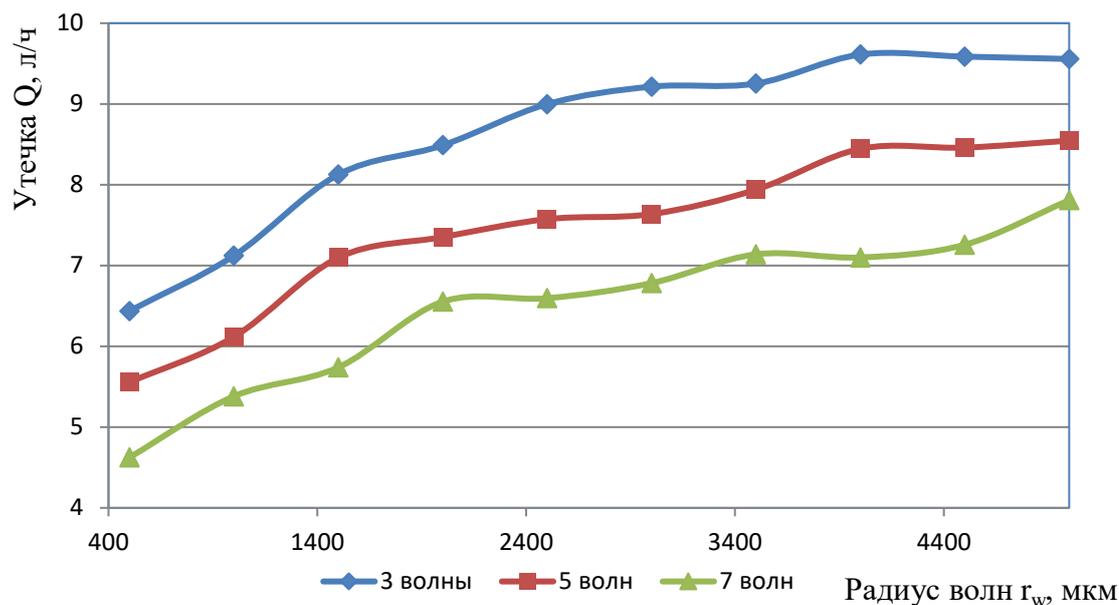


Рис. 6.3. Зависимость утечки Q от радиуса кривизны волны r_w

При увеличении нагрузки контурная площадь растет. Приблизительно (по В.В. Порошину [97]) номинальное давление, при котором реализуется переход к фильтрационному течению, оценивается по экспериментальным данным формулой

$$p_a = \frac{W_{p\Sigma}/R_{W\text{прив}}}{0,12\theta}.$$

Здесь

$$\theta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}.$$

где μ_i , E_i – коэффициент Пуассона и модуль упругости сопряженных тел. Фильтрационное просачивание для пары «сталь - сталь» наступает при $p_a = 80 \dots 100$ МПа.

6.2. ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ ЖИДКОСТИ

Для уплотнительных устройств, как правило, величина волнистости мала, и она сопоставима с шероховатостью. Также при высоких нагрузках на поверхности при их затяжке происходит упругая деформация волн, при

которой высота волнистости становится сопоставима с величиной шероховатости. При этом величина контурных пятен контакта возрастает, величина щели уменьшается, что приводит к уменьшению влияния волнистости и снижению утечки через щель. В таком случае протекание происходит в основном через микро-каналы, образованные шероховатостью сопряжённых поверхностей на фактических пятнах контакта. В совокупности микро-каналы образуют разветвлённую сложную систему каналов и полостей, которую можно представить в виде пористого слоя.

Представление межконтактного зазора в виде пористого слоя предполагает наличие таких его характеристик, как пористость, протяженность слоя в направлении течения, величина и размер пор, их извилистость, удельная площадь поверхности пористого слоя, контактирующей (смачиваемой или обдуваемой) с рабочей средой. Сложная форма каналов – капилляров не позволяет составить и решить уравнения движения уплотняемой среды. Разумным решением является моделирование пористого слоя, образованного в контакте фрактальных поверхностей в анализируемом масштабе размеров и применение перколяционной теории для анализа герметичности.

На первом этапе рассмотрим компьютерную симуляцию процесса протекания жидкости на плоскости через квадратную решётку, смоделированную в памяти компьютера в виде двумерного массива. Квадратную решетку размером $n \times n$ (двумерный массив) случайным образом заполняют единицами и нолями с некоторой долей вероятности p . При этом 0 означает, что данный узел заблокирован, а 1 – что протекание через узел возможно. Расстояние между узлами равно единице (фактически это минимальная дискретность моделирования, или разрешающая способность микроскопа - сканера). Для решения задач перколяции воспользуемся методом «Ренормгруппы», предложенном в 1971 г. К.Ж. Вильсоном. Для применения этого метода при определении факта протекания жидкости через решётку

требуется произвести преобразование исходного массива, а именно нужно сжать исходную решетку (например, квадратную решетку $n \times n$) в b раз. Чтобы можно было сравнивать изображения на старой и новой решетках, размер ячеек сжатой решетки нужно увеличить в b раз, т.е. нужно провести огрубление кластеров новой решетки. На рис. 6.4 представлена процедура ренормирования при $b = 2$, т.е. группировка ячеек в блоке 2×2 и замена их единственной ячейкой.

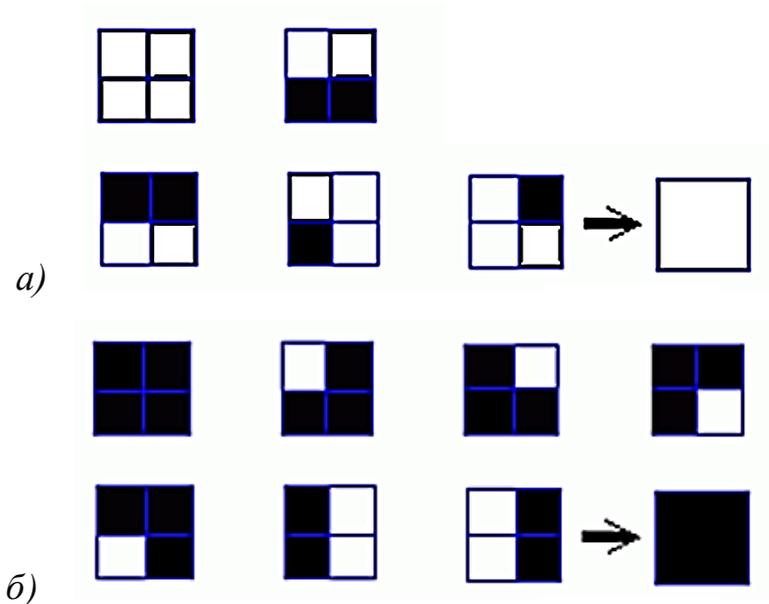


Рис. 6.4. Ренормирование ячеек, приводящее: *а* – к протеканию;
б – к отсутствию протекания

Каждая из представленных конфигураций (черный цвет – заполненная ячейка, протекание слева направо отсутствует, белый цвет – протекание возможно) заменяется на больший квадрат соответствующего цвета.

Если исходные ячейки были заняты с вероятностью p , то вероятность протекания нового (большого) блока в данном случае

$$p' = R(p) = p^4 + 4p^3(1-p) + 2p^2(1-p)^2.$$

При $p < p_c$ имеем $p' < p$, поэтому последовательное применение преобразования перенормировки при $p = 0,4 < p_c$ приводит к исчезновению черных квадратов после нескольких итераций (т.е. $p' \rightarrow 0$). Наоборот, при $p > p_c$ останутся только черные квадраты ($p' \rightarrow 1$). А при $p = p_c$ предполагается,

что в системе существуют все масштабы длины и изменение масштаба не играет роли. Отметим, что перенормированные решетки не сжимаются, чтобы было удобнее следить за огрублением.

Из решения уравнения $p' = f(p)$ четвертой степени находим нетривиальную точку, соответствующую герметичности. Таким образом, уравнение имеет два тривиальных решения, а именно $p^* = 0$ и $p^* = 1$, и нетривиальное решение, соответствующее неподвижной точке уравнения $p^* = R(p^*)$ при $p^* = 0,61803$, что действительно очень близко к критическому значению $p_c = 0,5927$. Точность полученных результатов увеличивается с ростом b . Однако поскольку имеется 2^{b^2} возможные конфигурации для клетки размером $b \times b$, число которых быстро растет с ростом b , для $b > 5$ используется метод Монте-Карло.

Для оценки вероятности отсутствия протекания p^* используем компьютерное моделирование (рис. 6.5).

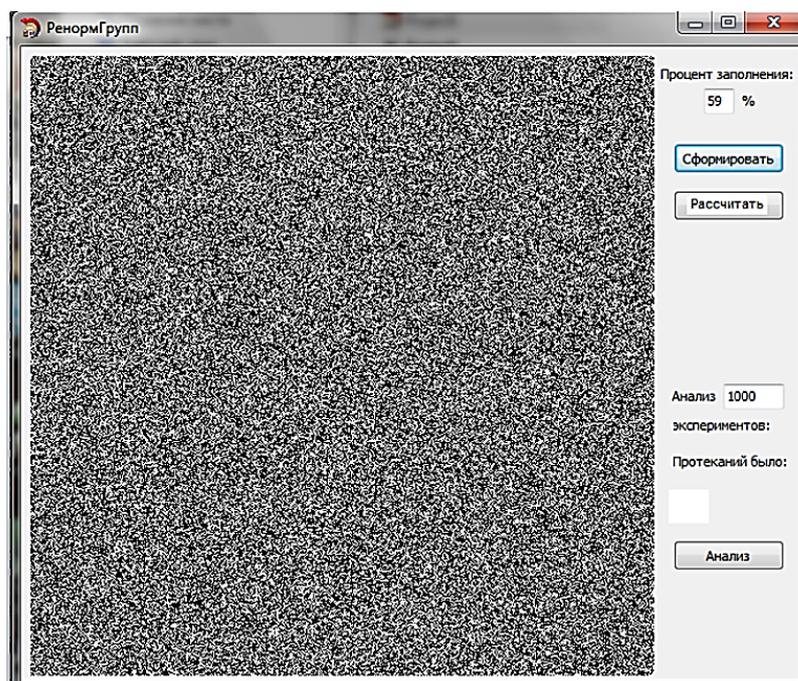


Рис. 6.5. Исходное формирование конфигурации квадратной решетки

На рис. 6.5 сформирована квадратная решетка размером 512x512 ячеек. Конфигурация ячеек с определенным процентом заполнения формировалась случайным образом. Каждой ячейке в соответствии с распределением

Бернулли присваивалась величина, равная 1 (ячейка заполнена) или 0 (ячейка – пора способна пропускать уплотняемую среду). Требуется установить возможность протекания слева направо при условии, что верхняя и нижняя части решетки изолированы. Результаты описанного ренормирования представлены на рис. 6.6 и 6.7.

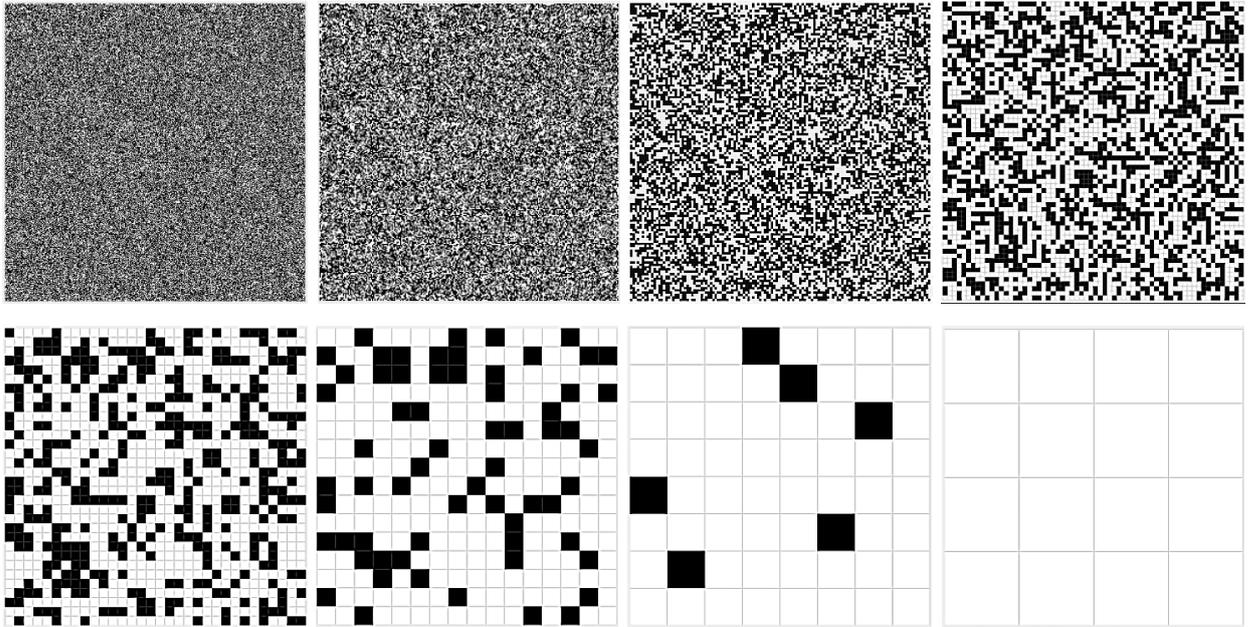


Рис. 6.6. Процедура ренормировки при $p = 0.57$

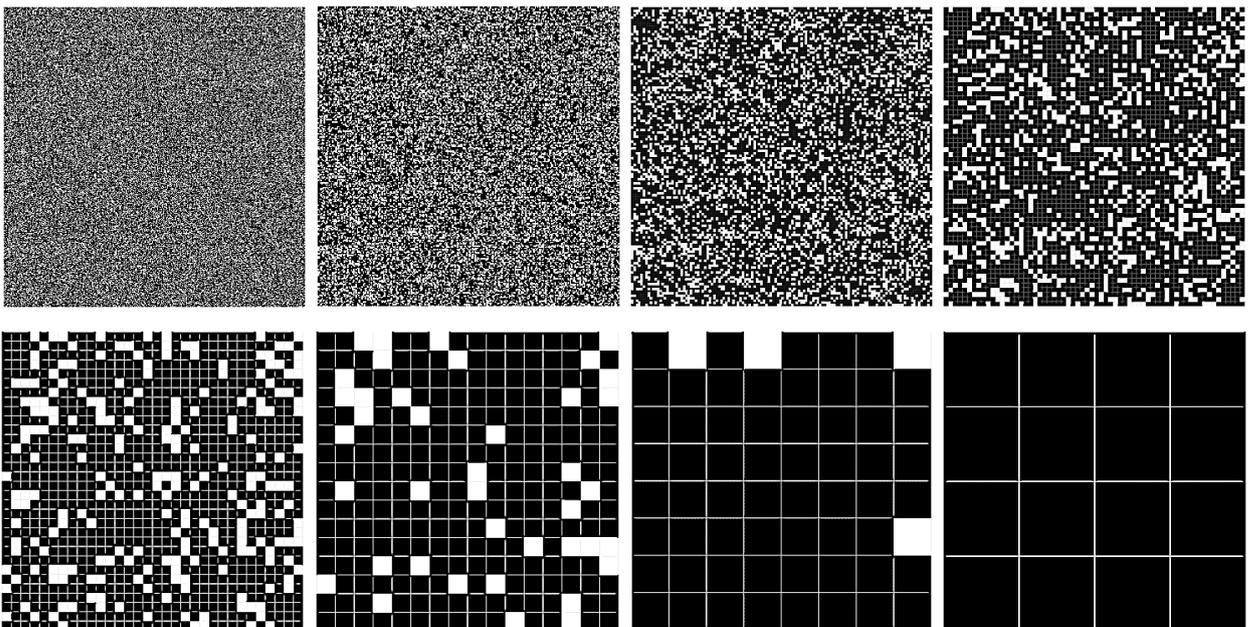


Рис. 6.7. Процедура ренормировки при $p = 0.65$

При заполнении черными клетками 57 % (рис. 6.6) имеет место протекание. Для 65% заполнения наблюдается отсутствие протекания (рис. 6.7). Следует отметить, что использование машинного эксперимента дает возможность найти границу перехода от протекания к герметичности. На рис. 6.8 показана зависимость вероятности отсутствия протекания (герметичности) от процента заполненности ячеек p для 1000 проведённых экспериментов.

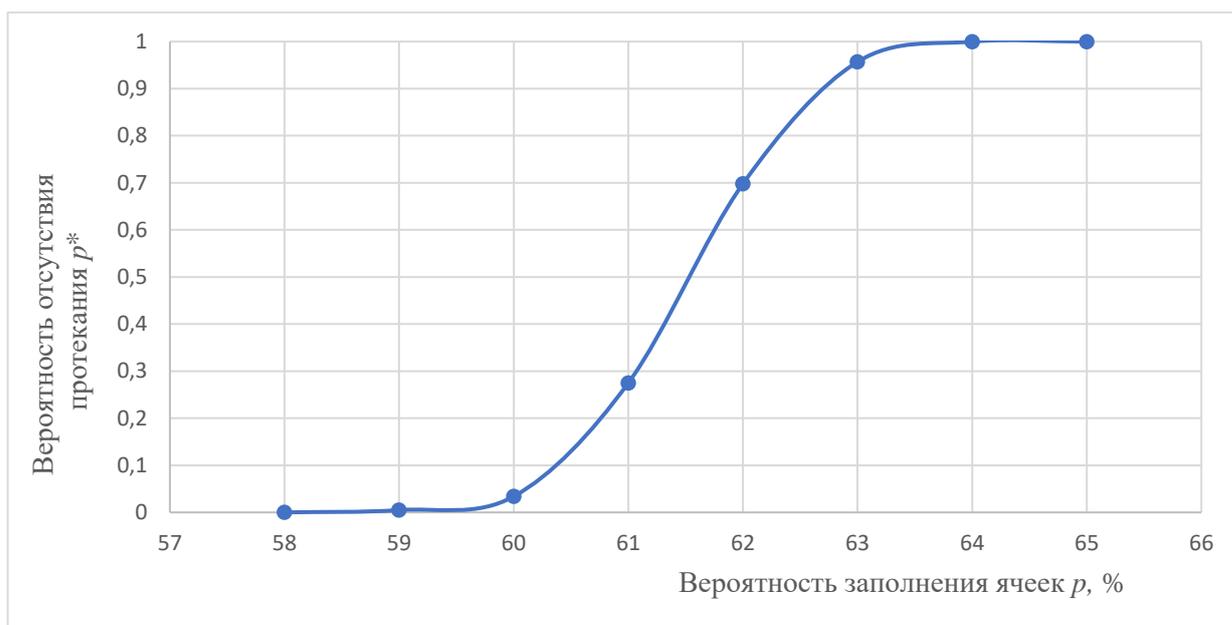


Рис. 6.8. Зависимость вероятности отсутствия протекания от % вероятности заполнения ячеек

Изменяя число p , можно с помощью вычислительного эксперимента найти порог протекания на заданной сетке. Как видно из рис. 6.8, нетривиальное решение задачи протекания на квадратной решетке (начало блокирования протекания) имеет место при $p = 0,59...0,60$.

Кластер, простирающийся по всей сетке в направлении течения условной жидкости (бесконечный кластер), возникает, как показал машинный эксперимент, при $p_c \cong 0,593$. Численное моделирование на больших сетках позволило установить, что при $p < p_c$ вероятность образования бесконечного кластера падает до нуля при $N \rightarrow \infty$, а при $p > p_c$ бесконечному кластеру принадлежит конечная доля узлов. Эти значения соответствуют данным, полученным другими исследователями.

На втором этапе рассмотрим 3D-протекание на кубической решётке. При рассмотрении трёхмерной структуры пористых объектов пороги протекания или их отсутствие становятся другими, чем при рассмотрении течения жидкости на плоской решётке. Кроме течения вперёд, назад, влево или вправо, появляется возможность течения вверх или вниз, обходя препятствия.

Для моделирования пористого объёмного слоя использовалась составленная в этой работе программа, в которой создавалась кубическая решётка, в которой узлы случайным образом заполнялись цифрами «0», т.е. пустая ячейка, и цифрами «1», обозначающими, что ячейка заполнена, и протекание через неё невозможно (рис. 6.9).

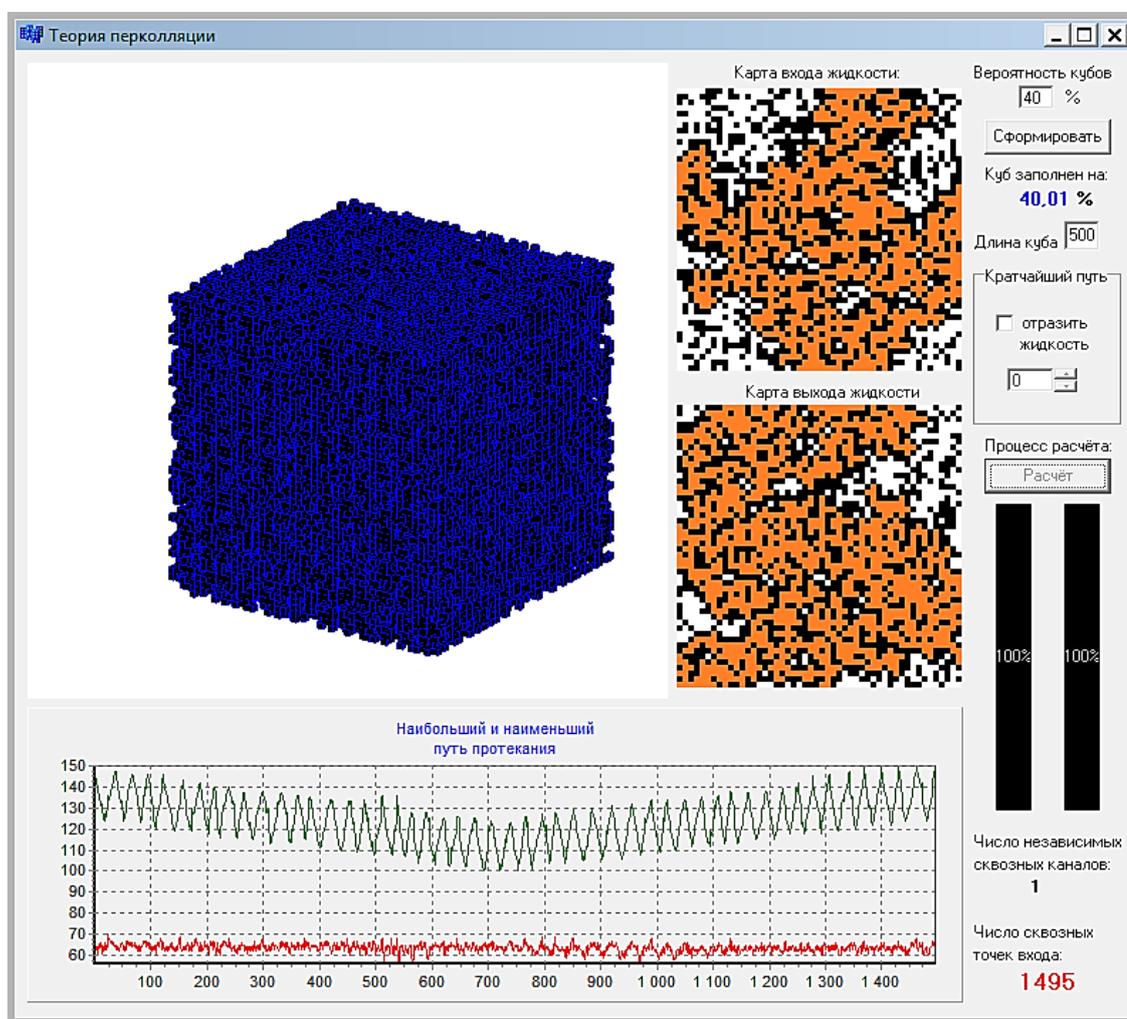


Рис. 6.9. Моделирование трёхмерной пористой среды

Возможность протекания по кубической решетке определялось с помощью теории «Графов», когда рассчитывается длина пути от точки

инжектирования жидкости в свободную ячейку до выхода жидкости с противоположной стороны. При этом структура куба напоминает швейцарский сыр и состоит из ячеек, через которые протекание невозможно, и пор. В главном окне программы (рис. 6.9) представлен трёхмерный пористый слой в виде кубической решётки, составленной из 50 x 50 x 50 кубов. Если малому кубу (узлу) соответствует цифра «0», то протекание через него возможно, и куб прозрачный, а если кубу соответствует цифра «1», то он изображён твёрдотельным, и протекание через него невозможно. Также в правой части программы представлено два сечения, где предполагаемая жидкость входит в модель пористого куба, и где она выходит. На карте входа жидкости (первое сечение) закрашенными представлены те «пустые» поры, через которые жидкость смогла выйти с другой стороны куба (на втором сечении закрашенными показаны те поры, из которых жидкость вышла).

Дополнительно реализована возможность получения статистических данных при обработке нескольких экспериментов (например, 1000 эксп.) по подсчёту числа опытов, в которых жидкость смогла выйти на противоположную сторону куба, и в каких не смогла. При больших значениях числа компьютерных экспериментов процесс подсчёта становится долговременным, и предусмотрены графические индикаторы объёма выполнения вычислений. На рис. 6.10 представлены модели пористой среды в виде кубов с разной пористостью.

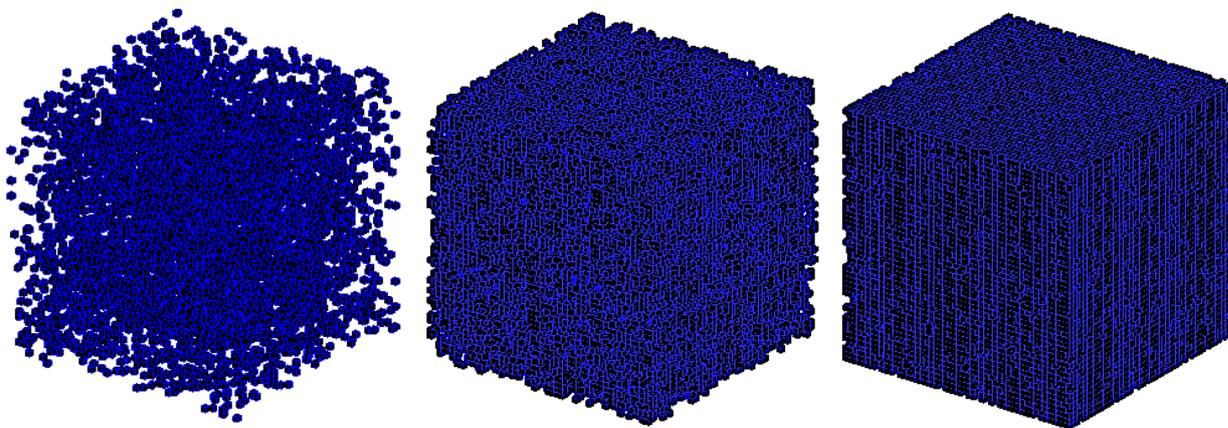


Рис. 6.10. Модели пористого слоя с $p = 5\%$, 30% и 70%

При малой пористости перколяционный кластер распространяется через всю кубическую решётку, каким бы она размером не была. С увеличением числа занятых ячеек, т.е. снижением пористости и приближением к порогу протекания, соответствующему трехмерной структуре пористого слоя, длина перколяционного кластера оказывается конечной, и соответствует некоторой длине, при превышении которой протекание становится невозможным. В программе представляется возможным отыскать длину перколяционного кластера, соответствующего порогу протекания при заданной пористости, или, другими словами, подобрать длину пористого слоя, которая гарантированно будет соответствовать герметичному состоянию при заданной пористости (рис. 6.11). Следует обратить внимание на то, что при процентном заполнении менее 65% перколяционный кластер, отражающий течение жидкости, распространяется через всю решётку. В этом случае, если вход (инжектирование) жидкости попадает на этот перколяционный кластер, то возможность протекания не зависит от ширины (протяжённости) куба и всегда соответствует протеканию.

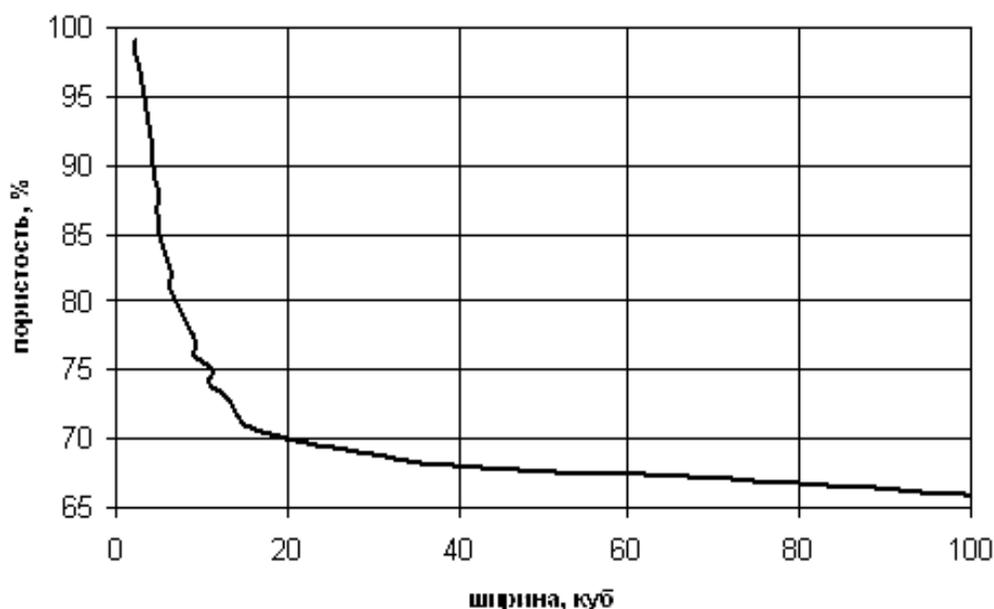


Рис. 6.11. Зависимость ширины площадки пористого слоя, обеспечивающего герметичное состояние, от пористости

Кроме того, для оценки коэффициента извилистости есть возможность определить длину всех возможных каналов протекания, которые отражены внизу программы в виде графика, а также отобразить их в 3D (рис. 6.12).

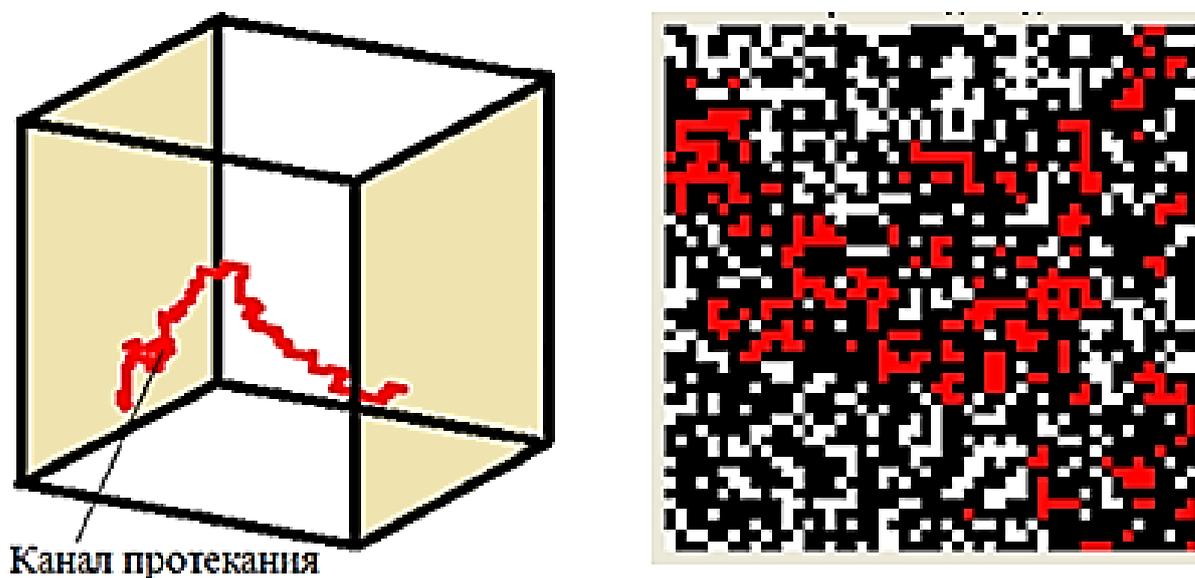


Рис. 6.12. Результаты моделирования протекания через пористую среду

На рис. 6.12 показаны отдельный канал протекания и выход сквозных каналов на противоположную сторону куба. Исследовалось протекание через куб размером 50x50x50. Жидкость инжестировалась в одну из сторон куба по всей площади, а протекание наблюдалось на противоположной стороне. При этом все остальные стороны считались изолированными. Программа позволяла оценивать среднюю длину канала протекания (λ), а ее отношение к длине стороны куба (L) представлялось параметром, именуемым извилистостью ($\tau = \lambda / L$). Пористость куба m оценивалась отношением объема пор V_{Π} к объему всего куба (рис. 6.13) как

$$m = \frac{V_{\Pi}}{L^3}$$

Компьютерные эксперименты показали, что при пористости, равной 0.31 ... 0.32, отсутствует протекание. Зависимость извилистости от пористости можно описать следующим выражением:

$$\tau = 26,699 - 116,050m + 134,124m^2.$$

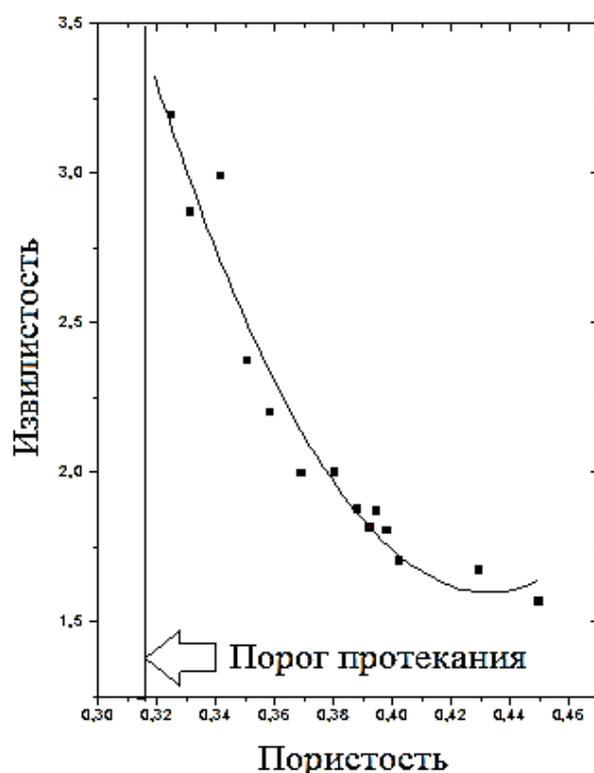


Рис. 6.13. Зависимость извилистости от пористости

Здесь коэффициент корреляции $R = -0,976$ со средним квадратичным отклонением, равным 0,1222.

Результаты протекания по узлам, полученные другими исследователями на простой кубической решетке методом ренормгрупп, позволили оценить порог протекания, который оказался равным 0,3117. Следует отметить, что порог протекания на плоской квадратной решетке составлял 0,59275, что существенно отличается от пространственной. Этот момент необходимо учитывать при рассмотрении реальных объектов, которым, например, является стык трущихся или неподвижных поверхностей уплотнительных устройств. Реальный зазор инженерных поверхностей является трёхмерным, но толщина пористого слоя значительно меньше его высоты, поэтому значение порога протекания скорее всего будет лежать между полученными выше значениями в зависимости от структуры слоя. К тому же, в зависимости от характера геометрической структуры сопряжённых поверхностей, поры могут быть большими при относительно небольшом их числе, а может быть и

наоборот – при той же пористости поры могут быть маленькими, но их количество может быть большим. Поэтому более точные данные о пористости и извилистости каналов протекания можно получить только при рассмотрении реального контакта шероховатых поверхностей с заданными параметрами их качества.

Выбор оптимальных параметров качества поверхностного слоя и оценка герметичности стыков связаны с определенными трудностями. К ним следует отнести прежде всего сложную структуру зазоров – каналов, образуемых при сжатии деталей, имеющих поверхности, описываемые случайными полями, случайную картину взаимодействия самих неровностей шероховатой поверхности и особенности состояния уплотняемой среды. Для оценки герметичности можно рассматривать следующие модели формирования бесконечного (в пределах всей сетки) кластера при увеличении сближения: первая модель учитывает рост числа пятен касания при практически постоянной площади единичного пятна; при разработке второй модели принимались во внимание рост площади пятен касания и вытеснение материала в межконтактное пространство.

Таким образом, алгоритм решения задачи герметичности контакта реальных поверхностей в общем виде должен включать:

- 1. описание поверхностей с учетом макроотклонения, волнистости и шероховатости;*
- 2. формирование массивов значений ординат в узлах сетки;*
- 3. формирование массива зазоров для предварительно принятого сближения;*
- 4. оценку герметичности стыка двух шероховатых поверхностей методом статистических испытаний;*
- 5. проверку адекватности модели и выдачу рекомендаций.*

6.3. ПРОТЕКАНИЕ В ЗАЗОРЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Межконтактный зазор инженерных шероховатых поверхностей, являясь дискретным, также представляет собой пористую среду. Отличительной особенностью от 3D-модели протекания является то, что просачивание через межконтактный зазор происходит по цепочке связанных между собой пор, сформированных структурой пятен контакта. Другой важной особенностью просачивания являются случайный характер размеров пятен контакта и их расположение, определяемые направлением следов обработки и другими параметрами качества поверхностных слоев сопрягаемых поверхностей. Уплотняемая среда имеет возможность осуществлять движение в стыке металл – металлического соединения по многочисленным извилистым каналам между сообщающимися порами.

Отметим факторы, которые влияют на величину утечек в стыке неподвижных фланцевых соединений. Приняв в качестве основных единиц массу (М), длину (L), время (Т), запишем размерности основных факторов:

- расхода $[Q] = L^3T^{-1}$,
- длины уплотнительной части соединения в направлении течения $[l] = L$,
- внутреннего диаметра $[d_l] = L$,
- перепада давления, равного разности давления уплотняемой и окружающей сред $[\Delta p] = ML^{-1}T^{-2}$,
- динамической вязкости жидкости $[\eta] = ML^{-1}T^{-1}$,
- толщины пористого слоя под нагрузкой $[H] = L$,
- проницаемости $[\Phi] = L^2$.

Из приведенных размерных факторов ($n = 7$), учитывая принятые основные единицы, можно в соответствии с π -теоремой Букингема (F. Buckingham) образовать четыре ($k = n-3$) безразмерных комплекса – критерия подобия. Не останавливаясь подробно на процедуре их получения, представим эти комплексы в окончательном виде

$$\pi_1 = \frac{l}{d_1}, \quad \pi_2 = \frac{H^2}{\Phi}, \quad \pi_3 = \frac{Q \cdot \eta}{\Delta p \cdot H \Phi}, \quad \pi_4 = \frac{H}{l}.$$

Критериальное уравнение можно представить в следующем виде:

$$\pi_1 \cdot \pi_3 = f(\pi_2)$$

или

$$\frac{Q \cdot \eta \cdot l}{\Delta p \cdot H \cdot d_1 \Phi} = f\left(\frac{H^2}{\Phi}\right).$$

Полученное выражение позволяет найти расход (утечку) вязкой жидкости через зазор между шероховатыми инженерными поверхностями:

$$Q = \frac{\Delta p \cdot H d_1 \Phi}{\eta \cdot l} f\left(\frac{H^2}{\Phi}\right).$$

Заметим, что при $f(H^2/\Phi) = \pi$ выше представленное уравнение становится известным эмпирическим выражением – формулой Дарси.

Рассмотрим методические основы определения параметров, входящих в это выражение.

Проницаемость без учета коэффициентов, характеризующих форму и извилистость каналов, определяется выражением

$$\Phi = \frac{Um^3}{\Sigma^2}.$$

Здесь U – постоянная Кармана ($U = 0.20 \dots 0,22$), m – пористость, равная отношению объема пор к рассматриваемому объему, Σ – удельная смачиваемость, определяемая отношением внутренней поверхности пор к объему металла в пористом слое.

Используя фрактальные представления, пористость может быть определена из соотношения

$$m = \left(\frac{l_0}{l}\right)^{2-D},$$

где l_0 – средний размер пор, l – характерная длина в направлении течения, D – фрактальная размерность профиля зазора ($1 < D < 2$).

Оценку удельной смачиваемости произведем, используя соотношение

$$\Sigma = \frac{l_0^2 \cdot N}{H(R_2^2 - R_1^2)}.$$

Здесь N – число пор, H – толщина пористого слоя, R_1, R_2 – внутренний и наружный диаметры фланцевого соединения.

Число пор найдем из выражения, характеризующего распределение фрактальных объектов на плоскости

$$N = \left[\frac{\pi(R_2^2 - R_1^2)}{\pi l_0^2} \right]^{D/2}.$$

Произведя несложные преобразования, получим

$$\Sigma = \frac{l_0^{2-D} (R_2^2 - R_1^2)^{(D-2)/2}}{H}$$

Подставив полученные уравнения в исходное, получим

$$\Phi = \frac{Um^3 H^2}{l_0^{2(2-D)} (R_2^2 - R_1^2)^{D-2}}.$$

Толщина пористого слоя может быть определена из выражения

$$H = h + R_{v1} + R_{v2},$$

где h – расстояние между средними плоскостями шероховатых поверхностей, R_v – глубина впадины.

Рассмотрим подробнее оценку извилистости каналов протекания на основе фрактального представления межконтактного зазора. Полагаем, что контакт фрактальных поверхностей уплотнительного устройства, являясь дискретным и состоящим из множества замкнутых и соединённых в цепочки пор, можно представить в виде фрактальной пористой среды. Длина цепочки соединённых между собой пор в плоскости разъёма, по которой проходит утечка, может быть определена (по Мандельброту [80]) следующей зависимостью

$$L = \lambda \cdot \delta^{1-D_T},$$

где L – длина кривой, λ – параметр, определяемый экспериментально, δ – масштаб измерения (раствор циркуля при измерении длины кривой); D_T – фрактальная размерность кривой (цепочки пор).

Фрактальный объект (кривая), как говорилось ранее, обладает свойством самоподобия: любой участок кривой имеет ту же фрактальную размерность, что и вся кривая. С математической точки зрения свойство подобия определяется по формуле:

$$k \cdot L = \lambda(k \cdot \delta)^{1-D_T}.$$

Здесь k – масштаб увеличения.

Для измерения длины фрактальной кривой в k - раз длиннее участка, на котором производились измерения (на участке 0.8×0.8 мм), необходимо измерять (в частности, методом *yard - stick*) длину кривой раствором циркуля в k - раз больше предыдущего. Длина определяется выражением $L = N(\delta) \cdot \delta$. С уменьшением размера δ длина нелинейно возрастает. Если прологарифмировать исходное уравнение, получим

$$\ln L = \ln \lambda + (1 - D_T) \cdot \ln \delta$$

Как было показано ранее, эта зависимость в двойных логарифмических координатах представляет собой прямую линию с углом наклона к горизонту α . Этот наклон прямой на участке $\delta_1 \dots \delta_2$ позволяет найти фрактальную размерность как

$$D_T = 1 - \operatorname{tg} \alpha = 1 - \frac{\lg L_1 - \lg L_2}{-(\lg \delta_1 - \lg \delta_2)}, \quad 1 < D_T < 2.$$

Определим параметр λ . Выразим его из полученного выражения:

$$\ln \lambda = \ln L_1 - (1 - D_T) \cdot \ln \delta_1.$$

Тогда

$$\lambda = \frac{L_1}{\delta_1^{1-D_T}}$$

Растворы циркуля от δ_2 до δ_1 при измерении длины фрактальной кривой соответствуют длинам волн $\delta_2 = 1 / \omega_2$ и $\delta_1 = 1 / \omega_1$, где ω – частота. При этом длина кривой L_T будет равна

$$L_T = \lambda \left(\frac{A_c^{1/2}}{L_0} \delta \right)^{1-D_T}$$

Продифференцируем это выражение

$$L_T = \lambda \cdot A_c^{\frac{1-D_T}{2}} \cdot \delta^{1-D_T} \cdot L_0^{D_T-1},$$

$$dL_T = \lambda \cdot A_c^{\frac{1-D_T}{2}} \cdot \delta^{1-D_T} \cdot (D_T - 1) \cdot L_0 \cdot dL_0$$

Представим магистральный канал утечки как показано на рис. 6.14, где боковые стенки, выделенные жирными линиями, изолированы.

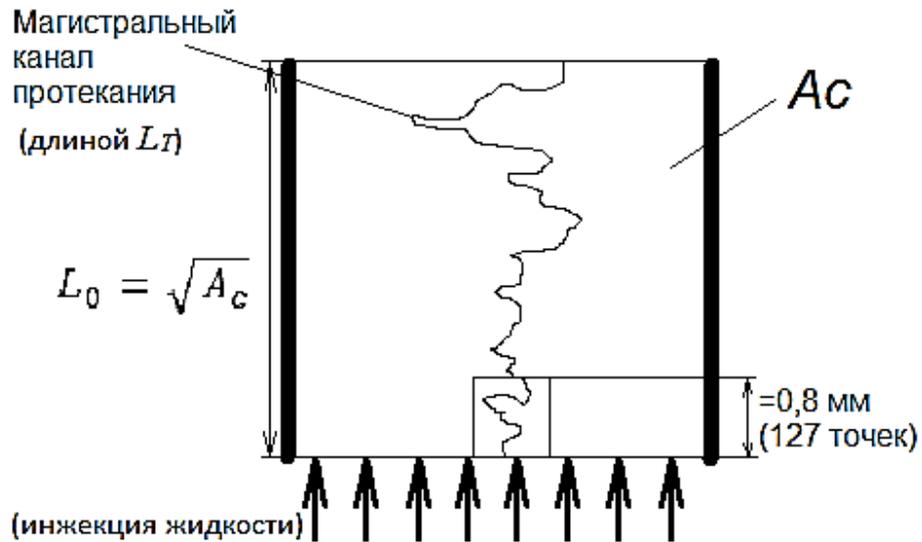


Рис. 6.14. Протекание через пористую среду

В данном случае коэффициент извилистости определяется как

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

С другой стороны, из работы [177]

$$K_{изв} = \frac{L_T}{L_0} = L_0^{D_T-1} (2r)^{1-D_T}$$

При $D_T = 1$ имеем $K_{изв} = 1$. Если принять $K_{изв} = \frac{1}{n} \sum_i^n K_{изв\ i}$, то можно, приравняв правые части последних двух уравнений, найти средний радиус пор

$$L^{D_T-1} \cdot (2r)^{1-D_T} = \lambda \frac{\delta^{1-D_T}}{A_c^{D_T/2} \cdot L^{1-D_T}}$$

$$(2r)^{1-D_T} = \lambda \frac{\delta^{1-D_T}}{A_c^{D_T/2} \cdot L^{1-D_T} \cdot L^{D_T-1}} = \lambda \frac{\delta^{1-D_T}}{A_c^{D_T/2}},$$

откуда

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

Таким образом, средний гидравлический радиус канала протекания

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

Расход жидкости через прямолинейный цилиндрический канал по Пуазейлю определяется уравнением

$$q^*(r) = -\frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dL_T}$$

Тогда выражение для утечки через пористую среду имеет вид

$$Q_F = -\int_{r_{min}}^{r_{max}} q^*(r) dN(r)$$

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

$$dN(r) = -D_f \cdot r_{max}^{D_f} \cdot r^{-(D_f+1)} dr$$

Это уравнение получено дифференцированием известного выражения

$$N(L > r) = \left(\frac{r_{max}}{r}\right)^{D_f}.$$

Здесь D_f – фрактальная размерность пор.

Приняв градиент (перепад) давления $dP/dL_0 = \Delta P/L_0$ и подставив вышеприведенные зависимости в предыдущее выражение, найдём

$$\begin{aligned} Q_F &= -\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\Delta P}{(D_T - 1)\lambda \cdot A_c^{0.5(1-D_T)} \delta^{1-D_T} \cdot L_0^{D_T-1}} D_f \cdot r_{max}^{D_f} \cdot r^{-(D_f+1)} dr = \\ &= -\frac{\pi}{8\eta (D_T - 1) \cdot A_c^{0.5(1-D_T)} \delta^{1-D_T} \cdot L_0^{D_T-1}} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{r^4}{r^{D_f+1}} dr \\ I &= -\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^{3-D_f} dr = \frac{r^{4-D_f}}{4-D_f} \Big|_{r_{min}}^{r_{max}} = (r_{max}^{4-D_f} - r_{min}^{4-D_f}) \frac{1}{4-D_f} \\ Q_F &= -\frac{\pi}{8\eta(4-D_f)} \frac{\Delta P \cdot D_f}{(D_T - 1)\lambda \cdot A_c^{0.5(1-D_T)} \delta^{1-D_T} \cdot L_0^{D_T-1}} (r_{max}^4 - r_{max}^{D_f} \cdot r_{min}^{4-D_f}) = \end{aligned}$$

$$= -A \cdot r_{max}^4 \left(1 - \left(\frac{r_{min}}{r_{max}} \right) \right)^{4-D_f}$$

Типичная зависимость отношения r_{min} / r_{max} от фрактальной размерности D представлена на рис. 6.15 и зависит от микрогеометрии исходных поверхностей. В расчётах обычно принимают $\frac{r_{min}}{r_{max}} = 10^{-2}$.

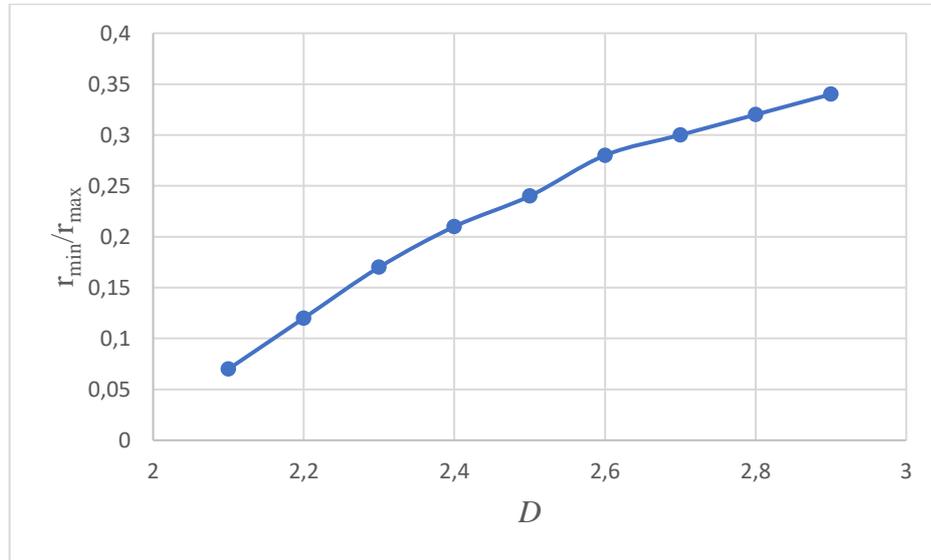


Рис. 6.15. Зависимость r_{min} / r_{max} от фрактальной размерности D

Площадь сечения пористой среды, перпендикулярная направлению фильтрации, определяется как

$$A = \frac{A_p}{m} = \frac{\pi D_f r_{max} (1 - m)}{4(2 - D_f)m}$$

Здесь m – пористость, A_p – площадь пор.

Для осесимметричного уплотнения $A_c = (r_2 - r_1)L_{Ac}$, где $r_2 - r_1$ – длина рассматриваемого участка, а L_{Ac} – его ширина. Можно записать, что

$$L_{Ac} = \frac{A_c}{r_2 - r_1}.$$

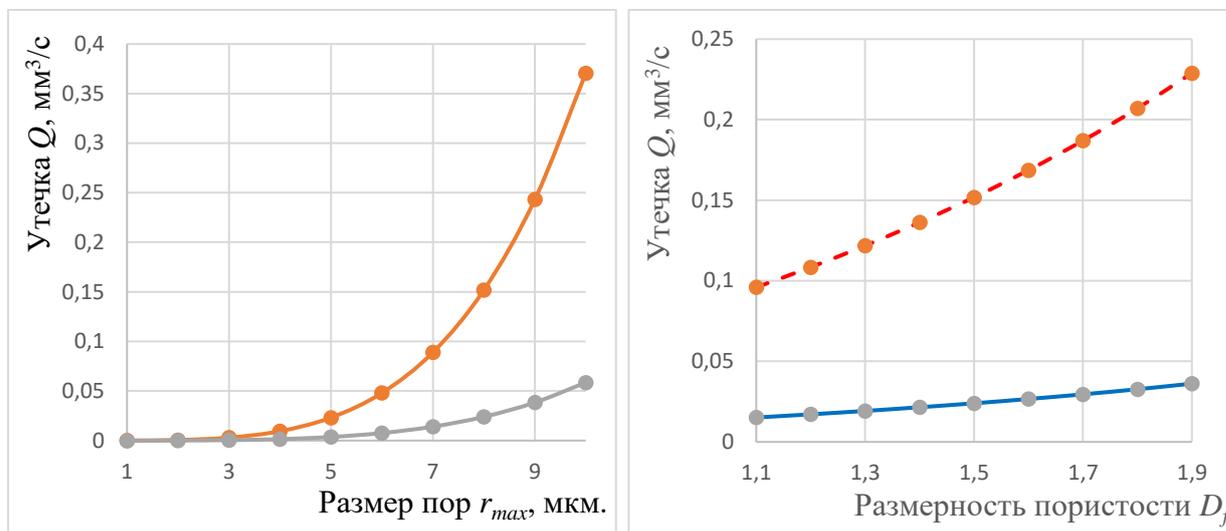
Тогда

$$A = L_{Ac} (\sum_{i=1}^n W_{pi} - \delta).$$

Окончательно запишем

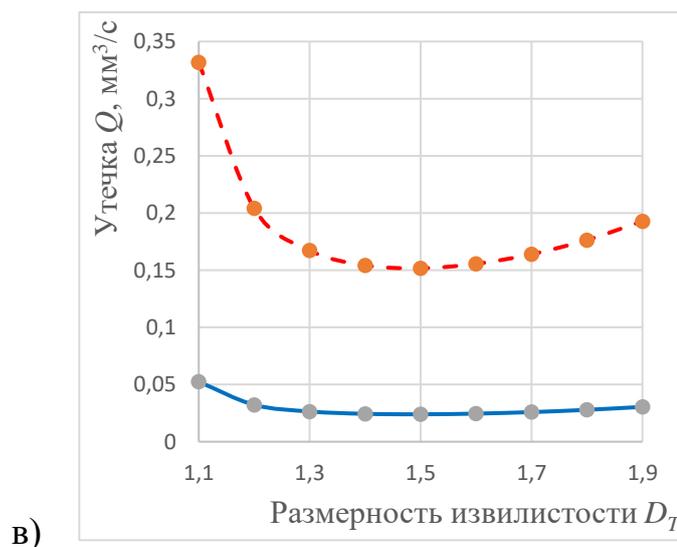
$$Q_F = - \frac{\pi \cdot r_{max}^4}{8\eta(4 - D_f)} \frac{\Delta P \cdot D_f}{(D_T - 1)\lambda \cdot A_c^{0.5(1-D_T)} \delta^{1-D_T} \cdot L_0^{D_T-1}}.$$

На рис. 6.16 представлены результаты расчёта по представленной формуле в виде графиков зависимости утечки Q , мм³/с. от максимального радиуса пор r_{max} , мкм., от фрактальной размерности пористости D_f и от фрактальной размерности извилистости D_T .



а)

б)



в)

Рис. 6.16. Зависимость утечки Q , мм³/с, от: а) макс. радиуса пор r_{max} , мкм.; б) фракт. размерности пористости D_f ; в) фракт. размерности извилистости D_T

В качестве исходных данных было принято осесимметричное уплотнение со следующими параметрами: базовый размер участка моделирования пористой среды $L_0 = 0,8$ мм, размер участка протекания $A_c = 10$ мм², разрешающая способность измерительного инструмента $\delta = 2$ мкм,

фрактальные размерности пористости и извилистости $D_f = 1.5$, $D_T = 1.5$. В качестве уплотняемых сред были выбраны трансформаторное масло с динамической вязкостью $\eta = 0,0316$ Па·с и нефть с $\eta = 0,2$ Па·с при перепаде давления в $\Delta p = 10^6$ Па.

Полученные данные хорошо согласуются с данными по литературным источникам [177]. Кроме того, на графике рис. 6.16 в) видно, что зависимость утечки Q от фрактальной размерности извилистости проходит через минимум в области $D_T = 2,4 \dots 2,5$, что позволяет достичь максимальной герметичности путём подбора исходной оптимальной микрогеометрии.

Оценим фрактальную размерность пористости D_f . Число пор фрактальной пористой среды определяют следующим выражением:

$$N(R > r) = \left(\frac{r_{max}}{r}\right)^{D_f}$$

Здесь r , r_{max} и r_{min} – размеры пор, D_f – фрактальная размерность пористой среды ($1 < D_f < 2$). Дифференцируя представленное выражение, запишем

$$-dN = D_f \cdot r_{max}^{D_f} \cdot r^{-(1+D_f)} dr$$

Отрицательный знак в полученном выражении указывает на то, что число пор уменьшается с ростом их размеров. Общее число пор, находящихся в пределах от r_{min} до r_{max} , равно

$$N_f(R > r_{min}) = \left(\frac{r_{max}}{r_{min}}\right)^{D_f}$$

Разделив предпоследнее выражение на последнее, получим

$$\frac{-dN}{N_f} = D_f \cdot r_{min}^{D_f} \cdot r^{-(1+D_f)} dr = f(r) dr$$

В работе [210] фрактальная размерность пористой среды определяется формулой

$$D_f = D_E + \frac{\ln m}{\ln \frac{r_{max}}{r_{min}}} - 1.$$

Здесь D_E – евклидова размерность (например, для трёхмерного пространства

$D_E = 3$), m – пористость ($0 < m < 1$).

Выражение можно ещё упростить, приняв, как было указано ранее, $r_{min} / r_{max} = 10^{-2}$, тогда фрактальная размерность пористой среды будет

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

Оценим фрактальную размерность извилистости D_T . Рассмотрим капиллярную модель протекания через фрактальную пористую среду в виде цепочки соединённых между собой пор. В этом случае капилляр представляет собой фрактальный объект. Фрактальная размерность капилляра характеризует его извилистость, которая в свою очередь, связана с диаметром капилляра (рис. 6.17). Извилистый канал, имеющий большой диаметр и позволяющий соединить прямой линией его вход и выход, считается прямым.

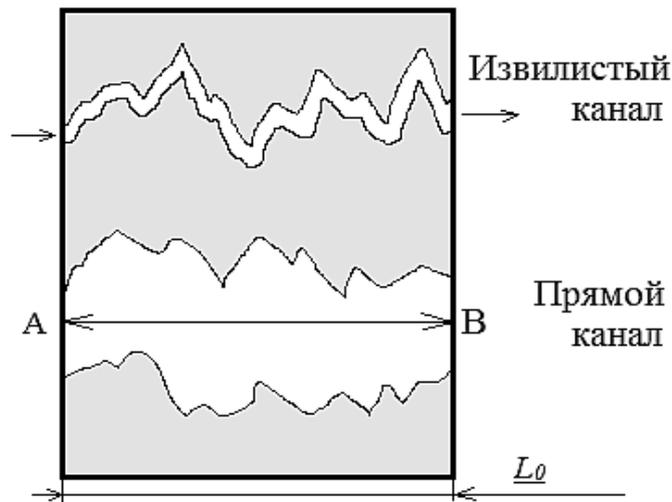


Рис. 6.17. Каналы протекания: 1- извилистый; 2 - прямой

Согласно фрактальным представлениям [210], длина извилистого канала определяется выражением

$$L_t = L_0^{D_T} \cdot (2r)^{1-D_T}$$

Прологарифмировав это выражение, получим

$$\ln L_t = D_T \cdot \ln L_0 + (1 - D_T) \ln(2r),$$

откуда

$$\ln L_t - \ln(2r) = D_T \cdot (\ln L_0 - \ln(2r))$$

и тогда

$$D_T = \frac{\ln L_t - \ln(2r)}{\ln L_0 - \ln(2r)} = \frac{\ln \frac{L_t}{2r}}{\ln \frac{L_0}{2r}}.$$

Здесь r находится в диапазоне от r_{min} до r_{max} . Значение L_t можно определить с помощью компьютерного моделирования в трёхмерной пористой среде со стороны L_0 в направлении протекания (рис. 6.12). Тогда

$$\frac{L_t}{L_0} = L_0^{D_T-1} (2r)^{1-D_T};$$

$$\begin{aligned} \ln \frac{L_t}{L_0} &= (D_T - 1) \ln L_0 + (1 - D_T) \ln(2r) = (1 - D_T) \ln L_0 + (1 - D_T) \ln(2r) = \\ &= -(1 - D_T) \ln L_0 - \ln(2r_0) = (1 - D_T) [\ln(2r) - \ln L_0]. \end{aligned}$$

Отсюда найдём фрактальную размерность извилистости $\underline{D_T}$:

$$(1 - D_T) = \frac{\ln \frac{L_T}{L_0}}{\ln(2r) - \ln L_0}.$$

Тогда фрактальная размерность извилистости равна

$$D_T = 1 - \frac{\ln \frac{L_T}{L_0}}{\ln \frac{2r}{L_0}}.$$

Средний размер цилиндрических пор (капилляров) определим как

$$d_{cp} = 2r_{cp} = 4 * 10^3 \frac{V}{A} \quad (\text{нм}),$$

где V – объём пор (см^3), A – площадь их поверхности (м^2) в одном грамме.

Данные о фрактальной размерности извилистости, пористости и т.д., полученные по выше представленным зависимостям, можно считать предварительными. Окончательную оценку фрактальной размерности и пористости (межконтактного зазора) дадим с помощью компьютерного моделирования. Используя ЭВМ и разработанную в этой работе программу по моделированию контактного взаимодействия фрактальных поверхностей, все необходимые параметры межконтактного пористого слоя можно получить достаточно точно для контакта реальных поверхностей или их адекватных

моделей. На рис. 6.18 представлено контактное взаимодействие инженерных поверхностей при наличии шероховатости.

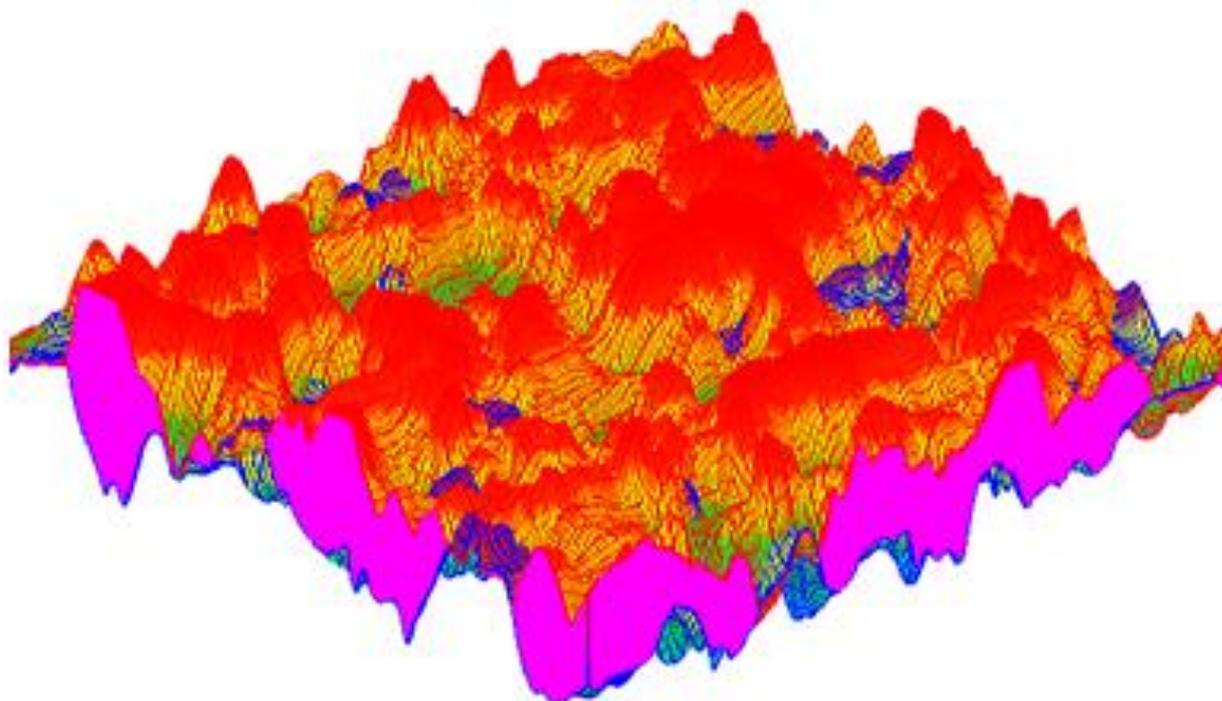


Рис. 6.18. Межконтактный зазор шероховатых поверхностей

Между поверхностями (в межконтактном зазоре) изображена уплотняемая среда (жидкость). При этом представляется возможным регулировать толщину пористого слоя, увеличивая или уменьшая нагрузку на него. Сближение рассчитывается с учётом пластической деформации микровыступов, которая увеличивает фактическую площадь контакта за счёт расплющивания вершин и их внедрение в другую поверхность в зависимости от твёрдости. Размер представленного на рисунке 6.18 участка равен 0,8 мм, но современные ЭВМ позволяют моделировать и гораздо большие размеры карт.

На рис. 6.19 слева тонкими линиями показан контур межконтактного зазора, внутри которого расположен кластер с уплотняемой жидкостью, которая протекает сверху вниз. Картина пятен фактического контакта показана посередине рисунка, а справа представлен кратчайший канал протекания, который определяет извилистость.

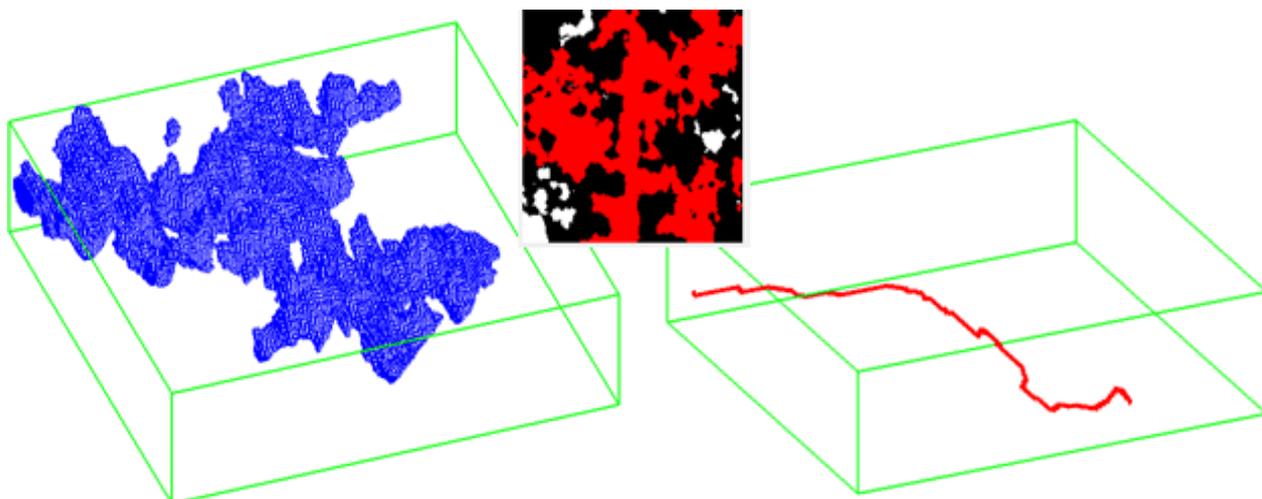


Рис. 6.19. Моделирование протекания жидкости
в стыке металл- металлических поверхностей

Таким образом, число пятен контакта, их положение, размер, а также объём пор, извилистость каналов протекания и т.д. можно получить с высоким уровнем достоверности при моделировании контактного взаимодействия реальных поверхностей (на их 3D картах) или их адекватных моделей. В итоге представляется возможным оценить зависимость утечки от параметров пористой и уплотняемой среды, а также подобрать параметры предварительного сближения поверхностей и их микрогеометрию с учётом их физико-механических свойств для обеспечения требуемой степени герметичности, включая полную.

6.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Сравним данные, полученные экспериментальным путем, с расчетом по представленной выше модифицированной формуле на основе уравнения Дарси. Эксперимент проводился на поверхностях с разной шероховатостью и типом обработки. В качестве исследуемых поверхностей были выбраны две поверхности после точения и шлифования из Стали 45 с объёмной твёрдостью 220 НВ, которые сопрягались с закалённым до 36 HRC контробразцом из Стали 40X после полирования. Параметры шероховатости поверхностей и

контробразца приведены в табл. 6.1, а на рис. 6.20 представлены фотографии образца и контробразца.

Таблица 6.1.

Параметры шероховатости сопряженных поверхностей

Вид обработки	Параметры шероховатости (в мкм)		
Образец 1: точение	$Ra=2,4$ $Rz=9,3$	$Rq=2,8$ $Sm=79,1$	$Rmax=11,0$ $S=93,0$
Образец 2: шлифование	$Ra=0,36$ $Rz=1,0$	$Rq=0,45$ $Sm=46,7$	$Rmax=1,8$ $S=205,0$
Контр-образец: полирование + закалка	$Ra=0,12$ $Rz=0,4$	$Rq=0,25$ $Sm=72$	$Rmax=0,8$ $S=180,0$

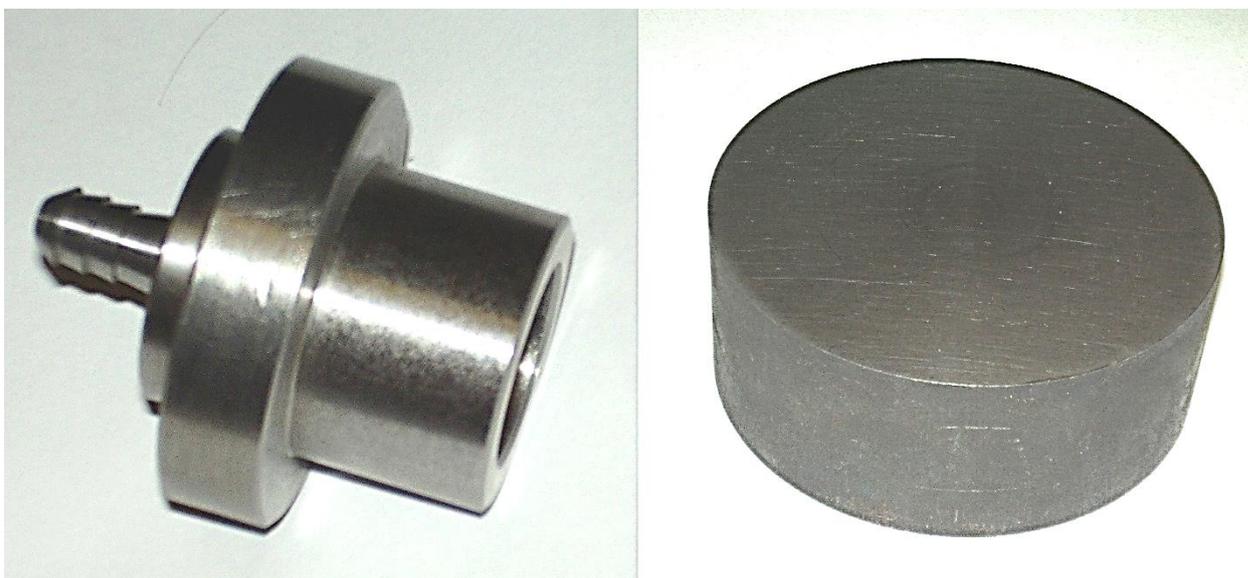


Рис. 6.20. Образец и контробразец

Сопряжение образцов представляло собой модель фланцевого соединения, через которое регистрировалась утечка рабочей жидкости. Общий вид испытательной установки представлен на рис. 6.21. В качестве установки использовался пресс 1 с нагружающим устройством 3 с возможностью регистрации величины нагружения образцов 5 и их сближения, а также гидравлический насос 4, шланг подачи рабочей жидкости 6 и система регистрации утечек 2. Все показания датчиков записывались на ЭВМ 7.

Размеры уплотнительного устройства: наружный диаметр фланца равен $d_2 = 2R_2 = 160$ мм, внутренний диаметр – $d_1 = 2R_1 = 140$ мм. Дополнительно принято $l_0 = 0,3$ мм, $l = 10$ мм, $U = 0,2$; фрактальные размерности поверхностей были найдены как $D_1 = 1,33$, $D_2 = 1,69$.

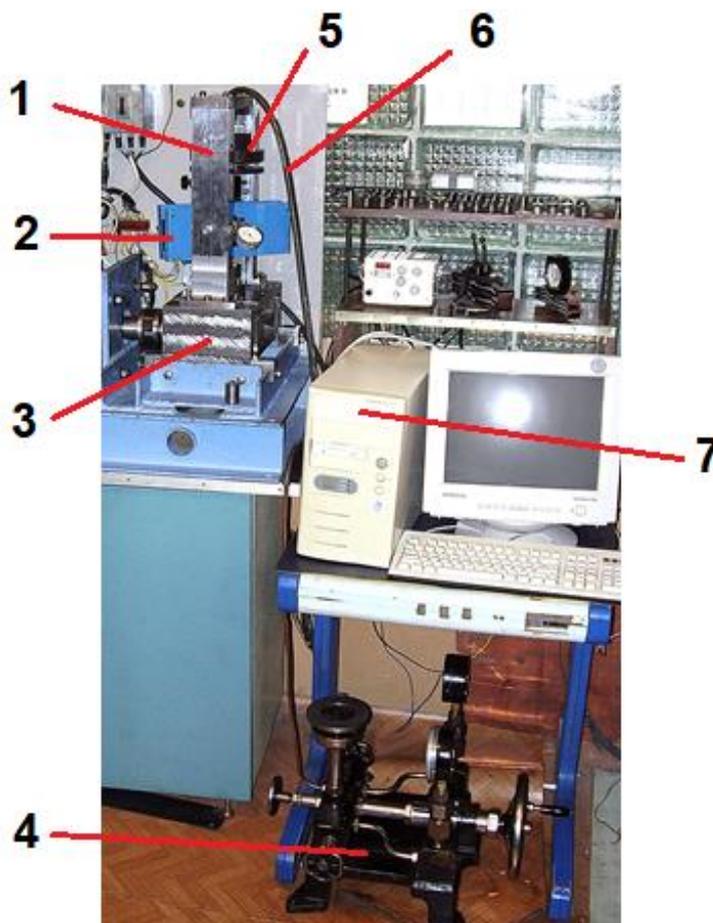


Рис. 6.21. Общий вид испытательной установки

Сравнение результатов эксперимента с моделью показано на рис. 6.22. Исследование на герметичность проводилось для соединения с контробразцом относительно грубого образца после точения при давлении жидкости в 5 МПа, а для относительно гладкого образца после шлифования при давлении в 20 МПа; в качестве уплотняемой среды выступал керосин с динамической вязкостью $\eta = 30$ мПа·с.

Результаты эксперимента показывают высокую адекватность результатов с максимальной погрешностью до 40% для гладкого образца и 50% для грубого образца в режиме без нагрузки, когда шероховатость не

оказывает существенного влияния. При наличии сближения величина погрешности не превышает 20%. Таким образом, полученное с помощью методов теории подобия выражение позволяет расчетным путем определить величину утечек через стык с определением параметров пористой среды на 3D моделях контактного взаимодействия поверхностей.

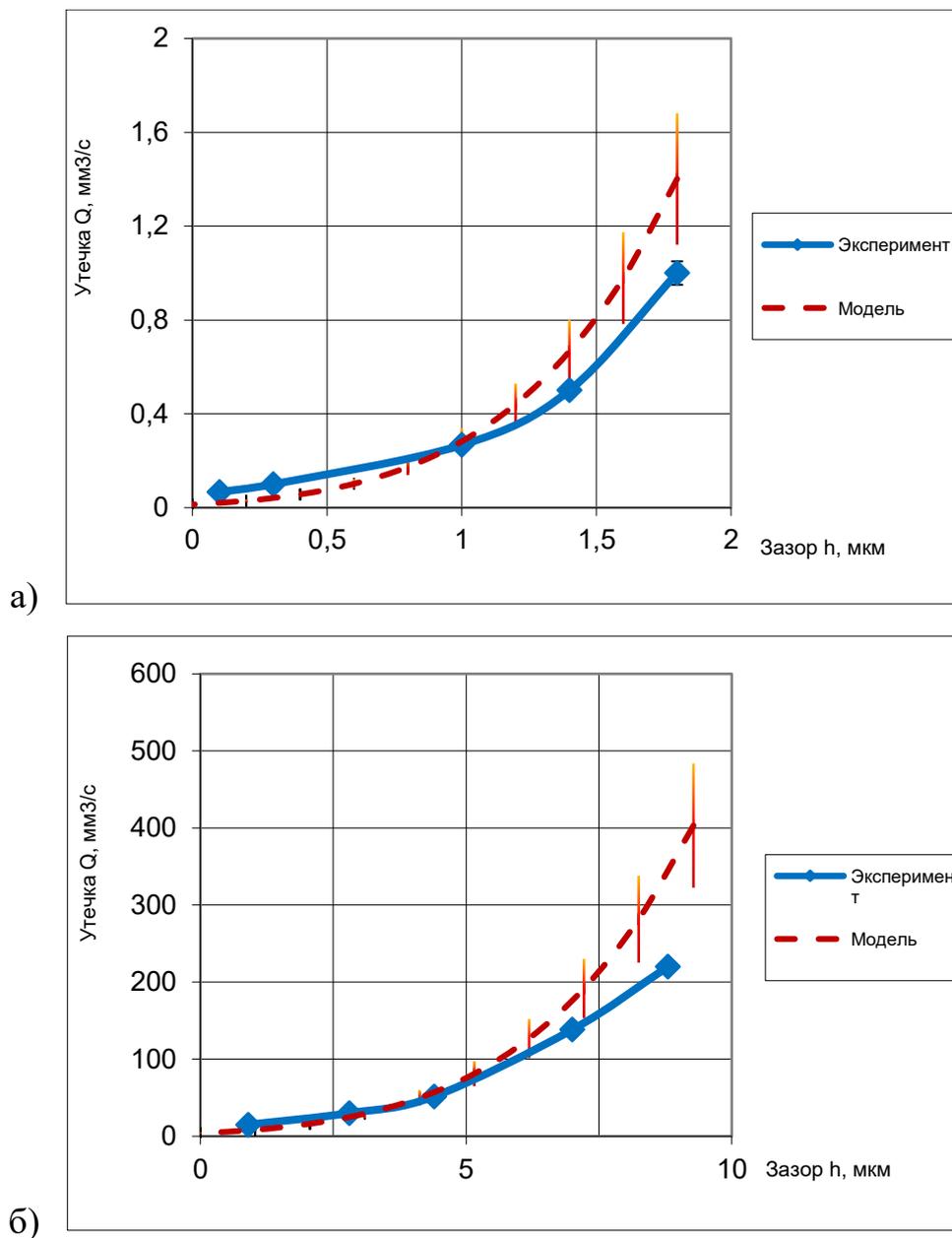


Рис. 6.22. Сравнение данных модели с экспериментом: а) $R_a = 2,4$; б) $R_a = 0,36$

Для применения предложенной теории расчёта герметичности на практике подразумевается выполнение следующей последовательности действий.

- Профилометрия рабочих поверхностей соединения (или выбор исходной микрогеометрии поверхности будущего уплотнительного устройства) и определение их параметров шероховатости, включая фрактальную размерность.
- Моделирование контактного взаимодействия и установление величины сближения, при котором обеспечивается герметичность.
- Оценка необходимого контактного давления, соответствующего найденному сближению.
- Определение момента завинчивания на ключе крепежа уплотнительного устройства, создающего требуемое контактное давление.

Первые три пункта были рассмотрены выше. А момент завинчивания гайки складывается из момента, создаваемого силами трения в резьбе и на торце гайки как

$$T = F \frac{d_2}{2} \left[\operatorname{tg}(\gamma + \varphi') + f \frac{d_m}{d_2} \right].$$

Здесь F – осевая сила; d_2 – средний диаметр резьбы; γ – угол подъема резьбы, равный $\gamma = \operatorname{arctg} [p/(\pi d_2)]$, где p – шаг резьбы; φ' – приведенный угол трения ($\varphi' = \operatorname{arctg} 1,15f$); f – коэффициент трения; d_m – средний диаметр опорной части гайки (по чертежу уплотнения).

Осевую силу найдем, решая контактную задачу с учетом шероховатости. Представим шероховатый слой в виде винклеровского основания с переменной жесткостью, когда модуль упругости является функцией сближения. Тогда эффективный модуль упругости шероховатого слоя как фрактального объекта равен

$$E_{eff} = E \left(\frac{\delta}{R_{max}} \right)^{1/(2-D)}$$

Здесь E – модуль упругости материала; δ – сближение; R_{max} – максимальная высота неровностей; D – фрактальная размерность.

Определив с помощью компьютерного моделирования сближение δ , соответствующее герметичности, найдем осевую силу. Сближение δ в случае

контакта цилиндра с плоскостью и учетом свойств шероховатого слоя определяется выражением

$$\delta = \frac{2F'}{2\pi^2 R} \left[\theta_{\Sigma} \left(\ln \frac{2R}{b} + 0,407 \right) \right],$$

где R – радиус цилиндра; b – полуширина полоски контакта цилиндра с плоскостью; $\theta_{\Sigma} = \theta_1 + \theta_2$ – упругая постоянная; $\theta_i = (1-\mu_i^2) / E_{effi}$ – упругая постоянная шероховатого слоя одной из сопряженных поверхностей; μ – коэффициент Пуассона.

Полуширина полоски контакта с учетом шероховатости равна

$$b = 1,128 \sqrt{\theta_{\Sigma} F' / (2\pi)} .$$

Усилие F можно найти графическим путем или методом последовательных приближений. Задавшись сближением δ и подставив это значение в упругую постоянную, найдем такую величину усилия, которая соответствует равенству $\alpha = f(F')$ (рис. 6.23).

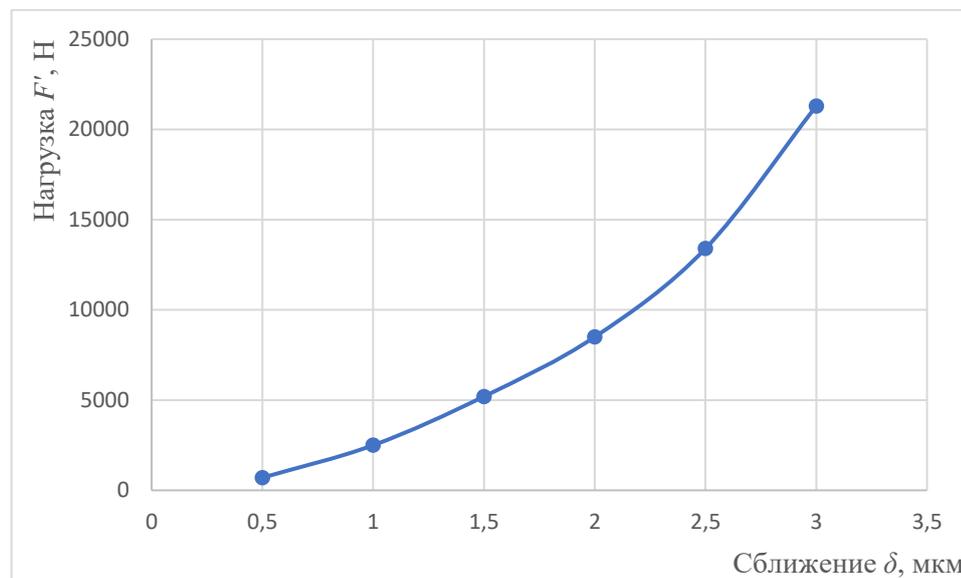


Рис. 6.23. Зависимость усилия на элементы уплотнения от сближения

Представленная зависимость $\alpha = f(F')$ (рис. 6.23) определялась при следующих исходных данных: $R_{max} = 5 \cdot 10^{-3}$ мм; $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$; $R = 20$ мм; $D = 1,2$.

Таким образом, представляется возможным смоделировать контакт металл-металлических поверхностей с определением зависимости

герметичности от нагрузки и сближения с учетом принятого закона распределения случайных величин. Зная сближение, соответствующее требуемому уровню герметичности, можно найти нормальное усилие F' и осевое усилие $F = F' / \cos 60^\circ$, а затем и момент на ключе при завинчивании гайки уплотнительного устройства.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6

Таким образом, по результатам работы, изложенной в главе 6, можно сделать следующие выводы.

- 1. Разработана методология оценки герметичности торцового металл - металлического уплотнительного устройства, которая основывается на предложенной ранее многоуровневой модели (с учётом волнистости и шероховатости), показывающей свою эффективность и при решении такого класса задач.*
- 2. Для стыка волнистых поверхностей предложен механизм расчёта утечек рабочей среды на основе щелевой модели протекания, который реализован в виде компьютерной программы, позволяющей моделировать контакт волнистых поверхностей с оценкой параметров контактирования и расчётом величины утечек. Кроме того показано, что увеличение числа волн поверхности приводит к снижению утечек, а рост радиуса волны увеличивает утечку.*
- 3. Фильтрационная модель герметичности металл-металлического уплотнительного устройства учитывает особенности строения шероховатого слоя, где межконтактный зазор сопряжения представляется в виде фрактальной пористой среды, через которую осуществляется просачивание уплотняемой жидкости. Представляется возможным определить действительную величину пористости стыка поверхностей и извилистость каналов протекания, представив в 3D формате процесс заполнения межконтактного зазора жидкостью, а также было установлено, что максимальная*

герметичность обеспечивается при фрактальной размерности поверхности $D \approx 2,5$. Кроме того, предлагаемая методика учитывает реальную картину расположения микронеровностей и позволяет путём подбора оптимальной шероховатости, рисунка расположения микровыступов и оценки величины прижатия поверхностей обеспечить полную герметичность уплотнительного стыка.

- 4. Результаты эксперимента по оценке величины утечек для разных поверхностей и уплотняемых сред показали высокую адекватность предлагаемой методики расчёта герметичности металл-металлических уплотнительных устройств при величине погрешности не более 20%.*

ГЛАВА 7. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА РАБОТЫ.

В настоящей работе была разработана и апробирована методика расчёта узлов трения, работающих при малых нагрузках, где шероховатость сопряжённых поверхностей оказывает влияние на процессы трения и изнашивания. Методика основана на процедуре моделирования контактного взаимодействия инженерных поверхностей на разных уровнях (макро-уровень, волнистость и микро-уровень, т.е. шероховатость) с оценкой параметров контактирования микронеровностей, находящихся в упругом и пластическом состоянии, а также с оценкой триботехнических параметров сопряжения с возможностью прогнозирования их работоспособного состояния при известном предельном состоянии трибосистемы. В качестве исходной информации используются трёхмерные карты реальных шероховатых поверхностей, полученные после трёхмерного профилографирования, которые будут находится в контакте, или адекватные им трёхмерные модели поверхностей, имеющие макро-отклонения, волнистости и шероховатость в соответствии с заданными условиями. При этом модели поверхностей являются близкими копиями реальных поверхностей с наличием случайного фактора, что позволяет каждый раз создавать случайным образом разные поверхности, соответствующие заданным параметрам шероховатости, для получения статистически значимой оценки расчётных параметров с оценкой разброса значений. Кроме того, в процессе моделирования контакта поверхностей и оценке параметров контактирования используются данные о реальной микрогеометрии и распределении пятен контакта «по факту», т.е. в расчёт принимаются только реальные пятна контакта, их число, размер и расположение – то есть то, что получается при соприкосновении трёхмерных карт поверхностей без применения различных расчётных, статистических или эмпирических коэффициентов, корректирующих модель. Такой подход значительно увеличивает точность расчётов и надёжность получения достоверного

результата. Конечно, такой подход требует применения ЭВМ для обработки значительного объёма информации о микрогеометрии поверхностей и наличия соответствующего программного обеспечения, которое было разработано автором при подготовке данной работы. Все алгоритмы были протестированы и сопоставлены с результатами проведённых в настоящей работе лабораторных экспериментов, а также проводились сравнения с экспериментами других авторов, которые детально указали исходные данные и режимы проведения испытаний.

В процессе моделирования трения и изнашивания при малых нагрузках были получены новые зависимости поведения трибосистем, подтверждённые экспериментами. Критерий перехода пятна контакта от пластического состояния в упругое для множественного контакта позволил объяснить нелинейность зависимости коэффициента трения от нагрузки и изменение интенсивности изнашивания с течением времени, выделив область приработки трибоузла. Это позволяет прогнозировать время работоспособного состояния трибосистемы при известном предельном состоянии узла трения.

Кроме того, предлагаемая методология позволяет применять её и в других областях техники, где важными являются параметры контактирования шероховатых поверхностей - например при расчёте металл-металлических уплотнительных устройств, где моделируется протекание уплотняемой среды в зазоре между сопряжёнными поверхностями уплотнительного устройства. Дополнительным преимуществом такого подхода является возможность визуализации контактного взаимодействия на любом этапе нагружения, а также возможность экспериментировать с поверхностями с разными свойствами, что на этапе проектирования очень важно, т.к. заранее большой объём информации о будущем трибосопряжении просто неизвестен.

Исходя из вышесказанного, перечислим области потенциального эффекта от применения представленной методики.

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 сокращения времени получения необходимого для исследований или проектирования количества трёхмерных карт поверхностей без проведения профилографирования.
2. Создана база данных поверхностей на основе СУБД MySQL, которая включает в себя карты реальных поверхностей после разных видов обработки, а также 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.

- б. Принятая к внедрению на МУП «Брянское городское предприятие» компьютерная программа по расчёту герметичности уплотнительных устройств гидравлической системы автобусной техники (акт о реализации диссертационных исследований от 2020 г.) позволила за счёт предупреждающего ремонта только 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.

Следует сказать, что применение предлагаемой методики расчёта трибосистем можно применять как для оценки состояния существующих устройств, работающих при малых нагрузках при их обследовании, так и на этапе проектирования новых трибоузлов с подбором оптимальной шероховатости сопряжённых поверхностей для обеспечения режима быстрой приработки с минимальным износом и получения максимальной долговечности.

Рассмотрим затраты на разработку программного обеспечения по предлагаемой методике. В общем виде затраты складываются из:

$$Z = C_{\text{программы}} + Z_{\text{техники}} + Z_{\text{обучения}}$$

Здесь $C_{\text{программы}}$ – цена предлагаемой программы; $Z_{\text{техники}}$ – модернизация

компьютеров под расчётный модуль, который требует более мощного компьютера; $Z_{обучение}$ – обучение персонала.

Определение трудоемкости разработки программного продукта по фактическим затратам довольно сложно в виду того, что программа разрабатывалась разными этапами в течении длительного времени автором. Поэтому определение трудоемкости программы произведём на основании опытно-статистического метода в целом на всю разработку, исходя из того, что ее выполняет один техник-программист. Определение трудоемкости осуществляется в соответствии с ГОСТ 19.102-77 «Стадии разработки» [31] и ведется исходя из ориентировочного распределения затрат времени.

Структуру времени на создание программы можно представить в виде этапов, представленных в таблице 7.1.

Таблица 7.1.

Структура времени на создание программного продукта

№ этапа	Обозначение времени данного этапа	Содержание этапа
	T_{no}	Подготовка описания задачи.
	T_o	Описание задачи.
	$T_{бс}$	Разработка блок-схемы и алгоритма.
	T_n	Написание и отладка программы
	T_d	Оформление документации.

Время рассчитывается в человеко-часах, причем T_{no} берется по фактически отработанному времени, а время остальных этапов определяется расчетным путём по условному числу команд Q .

Условное число команд Q определяется по формуле:

$$Q = q \cdot c$$

где q – коэффициент, учитывающий условное число команд в зависимости от типа задачи; c - коэффициент, учитывающий новизну и сложность программы.

Выбрать значение коэффициента q можно из табл. 7.2 [147]. Для данной

задачи коэффициент q принимается = 4500;

Таблица 7.2.

Определение коэффициента, учитывающего условное число команд

Тип задачи	Пределы изменений коэффициента
Задачи учета	от 1400 до 1500
Задачи оперативного управления	от 1500 до 1700
Задачи планирования	от 3000 до 3500
Многовариантные задачи	от 4500 до 5000
Комплексные задачи	от 5000 до 5500

Программные продукты по степени новизны могут быть отнесены к одной из 4-х групп:

- группа А — разработка принципиально новых задач;
- группа Б — разработка оригинальных программ;
- группа В — разработка программ с использованием типовых решений;
- группа Г — разовая типовая задача.

Для данной задачи степень новизны — Б.

По степени сложности программные продукты могут быть отнесены к одной из 3-х групп:

- 1 — алгоритмы оптимизации и моделирования систем;
- 2 — задачи учета, отчетности и статистики;
- 3 — стандартные алгоритмы.

Данная задача может быть отнесена к 1 группе сложности.

Коэффициент c определяется из таблицы 7.3 [147] на пересечении групп сложности и степени новизны. Для данной задачи коэффициент $c = 1,26$.

Теперь по представленной формуле можно определить условное число команд:

$$Q = q \cdot c = 4500 \cdot 1,26 = 5670$$

Определяем время, затраченное на каждый этап создания программы.

Определение коэффициента, учитывающего группу сложности и степень новизны

Группа сложности	Степень новизны			
	А	Б	В	Г
Высокого уровня (Delphi, C++Builder, PRP, HTML, JAVA)				
1	1,38	1,26	1,15	0,69
2	1,30	1,19	1,08	0,65
3	1,20	1,10	1,00	0,60
Низкого уровня (Assembler)				
1	1,58	1,45	1,32	0,79
2	1,49	1,37	1,24	0,74
3	1,38	1,26	1,15	0,69

1) T_{no} (время на подготовку описания задачи), берется по факту и составляет $T_{no} = 5$ чел.-час.

2) T_o (время на описание задачи) определяется по формуле:

$$T_o = \frac{QB}{50K}$$

где B — коэффициент учета изменений задачи, коэффициент B в зависимости от сложности задачи и числа изменений выбирается в интервале от 1,2 до 1,5. Для данной задачи примем $B = 1,2$; K — коэффициент, учитывающий квалификацию программиста. Для стажа программирования свыше 10 лет значение коэффициента согласно табл. 7.4 [147] равно $K = 1,5$.

Тогда определим время на описание задачи:

$$T_o = \frac{QB}{50K} = \frac{5670 \cdot 1,2}{50 \cdot 1,5} = 90,72$$

3) T_{bc} (время на разработку блок-схемы и алгоритма) рассчитываем по формуле:

$$T_{bc} = \frac{Q}{50K} = \frac{5670}{50 \cdot 1,5} = 75,6$$

Определение коэффициента, учитывающего квалификацию программиста

Стаж программиста	Значение коэффициента К
до 2-х лет	0,8
от 2 до 3 лет	1,0
от 3 до 5 лет	1,1 — 1,2
от 5 до 10 лет	1,2 — 1,3
свыше 10 лет	1,3 — 1,5

Тогда определим время на описание задачи:

$$T_o = \frac{QB}{50K} = \frac{5670 \cdot 1.2}{50 \cdot 1.5} = 90.72$$

3) T_{bc} (время на разработку блок-схемы и алгоритма) рассчитываем по формуле:

$$T_{bc} = \frac{Q}{50K} = \frac{5670}{50 \cdot 1.5} = 75.6$$

4) T_n (время написания программы на языке программирования) определяется по формуле:

$$T_n = \frac{1.5Q}{50K}$$

Подсчитываем время написания программы на языке программирования:

$$T_n = \frac{1.5 \cdot 5670}{50 \cdot 1.5} = 113,4$$

Время на оформление документации берется по факту и составляет $T_d = 10$ чел.-час.

Теперь, зная время, затраченное на каждом этапе, можно подсчитать общее время на создание программного продукта:

$$T = T_{no} + T_o + T_{bc} + T_n + T_d = 5 + 90,72 + 75,6 + 113,4 + 10 = 294,72 \text{ чел.- час}$$

Примем время на создание программы 300 человеко-часов, что близко к

приблизительно оценённому реальному времени, потраченному на создание программы. Так, как программа создавалась одним человеком, то не будем разбивать рабочее время на части согласно их трудоёмкости и будем считать всю работу одной трудоёмкости.

Расчет затрат на оплату труда. Часовая тарифная ставка определяется путем деления месячной тарифной ставки на среднемесячное количество рабочих часов и результат умножается на тарифный коэффициент. Прямая заработная плата определяется путем умножения часовой тарифной ставки на трудоемкость по соответствующему виду работ.

Произведем расчеты. Так, как мы условились тарифицировать все этапы работ как один, т.к. все они выполнялись одним человеком, то, зная месячную оплату труда программиста и объём выполненных работ можно определить затраты на прямую заработную плату рабочего. На 2023 год средняя оплата труда программиста по Брянской области составляет около 70 000 руб. Объём работы в часах за месяц при 22 рабочих днях:

$$t = 22 \cdot 8 = 176 \text{ часов.}$$

Тогда для выполнения объёма работ в 300 часов нужно $300 / 176 \approx 1.7$ месяца. Тогда затраты на прямую заработную плату за создание программного продукта составят:

$$Z_n = 1.7 \cdot 70\,000 \approx 119\,000 \text{ руб.}$$

Сумма премии и доплат определяют как 20% от оплаты труда:

$$Z_{nn} = 119\,000 \cdot 20/100 = 23\,800 \text{ руб.}$$

Итого основная заработная плата:

$$Z = Z_n + Z_{nn} = 119\,000 + 23\,800 = 142\,800 \text{ р.}$$

Определим стоимость накладных расходов. Для этого составим таблицу 7.5. с исходными данными для выполнения расчетов.

а) Определение стоимости потреблённой электроэнергии, руб.:

$$C_{эл} = (MK \cdot FK + MP \cdot FP) \cdot C \cdot K_{вр} \cdot K_c$$

где: $K_{вр}$ – коэффициент, учитывающий использование времени (в расчётах принимают $K_{вр} = 0,8$); K_c – коэффициент, учитывающий потери в электросети

(стандартный $K_c = 1,05$)

Таблица 7.5.

Исходная информация для расчета стоимости машинного времени

Показатель	Условное обозначение	Единицы измерения	Значение
Балансовая стоимость компьютера	<i>БК</i>	р.	60 000 руб.
Мощность, потребляемая компьютером	<i>МК</i>	кВт	0,5 кВт
Фактический фонд времени работы компьютера	<i>FK</i>	ч	300 ч.
Балансовая стоимость принтера	<i>БП</i>	р.	12 000 р.
Мощность, потребляемая принтером	<i>МП</i>	кВт	0,1 кВт
Фактический фонд времени работы принтера	<i>FP</i>	ч	1 ч.
Стоимость 1кВт / час	<i>С</i>	р.	8,82 руб.
Площадь на 1 рабочее место	<i>Spт</i>	м ²	2
Стоимость 1м ² производств. площади	<i>Спл</i>	р.	20 000
Норма амортизации для оборудования	<i>Нао</i>	%	13
Норма амортизации для зданий	<i>Напл</i>	%	1,2

* Значения всех показателей взяты из интернета и являются действующими на 2023 год.

$$C_{эл} = (0,5 \cdot 300 + 0,1 \cdot 1) \cdot 8,82 \cdot 0,8 \cdot 1,05 \approx 1112 \text{ р.}$$

б) Определение суммы годовых амортизационных отчислений, руб.:

$$C_{ao}^{\circ} = (БК + БП) \cdot Нао / 100 + Spт \cdot Спл \cdot Напл / 100$$

$$C_{ao}^{\circ} = (60000 + 12000) \cdot 13 / 100 + 2 \cdot 20000 \cdot 1,2 / 100 = 9840 \text{ р.}$$

Для того, чтобы узнать сумму амортизационных отчислений, отнесённых к фактическому фонду рабочего времени, затраченному на создание программы, воспользуемся формулой:

$$C_{ao} = C_{ao}^{\circ} \cdot FK / F_2$$

Здесь F_2 – годовой фонд рабочего времени компьютера. При рабочем времени 8 часов в сутки 252 дня в году $F_2 = 252 \cdot 8 = 2016$ часов.

Тогда

$$C_{ao} = 9840 \cdot 300 / 2016 \approx 1464 \text{ руб.}$$

в) Определяем годовые затраты на текущий ремонт оборудования, р.:

$$Зp^c = (BK + БП) \cdot PO/100$$

$$Зp^c = (60000 + 12000) \cdot 1/100 = 720 \text{ р.}$$

Аналогично амортизационным расходам, определим затраты на текущий ремонт, отнесённые к фактическому фонду рабочего времени, затраченному на создание программы:

$$Зp = Зp^c \cdot FK / F_2 = 720 \cdot 300 / 2016 \approx 107 \text{ руб.}$$

Общая сумма накладных расходов:

$$C_n = C_{эл} + C_{ao} + Зp = 1112 + 1464 + 107 = 2683 \text{ руб.}$$

Определение отпускной цены программного продукта в условиях действующей системы налогообложения.

а) Затраты на материалы и покупные комплектующие изделия.

В процессе работы над программой были использованы следующие материалы:

1. Тонер HP Q2612A для принтера, равный объёму одной заправки, цена 450 руб.
2. Бумага Белая, А4 (210x297 мм), 80г/м², пачка объёмом 500 листов стоимостью 300 руб.

Общие затраты на материалы: $З_m = 450 + 300 = 750$ руб.

б) Отпускная цена программного продукта (ПП).

Для определения отпускной цены программного продукта составим таблицу 7.6. При этом мощностей обычного компьютера, которыми пользуются на предприятиях, вполне достаточно для работы данного программного продукта, поэтому модернизация на первом этапе не требуется, поэтому $З_{техники} = 0$ руб.

Расчет отпускной цены программного продукта

№	Наименование	Расчёт
1	Затраты на материалы	750 руб.
2	Стоимость машинного времени (накладные расходы)	1 464 руб.
5	Фонд оплаты труда (основная и дополнительная заработная плата)	142 800 руб.
6	Отчисления на социальные нужды (34,6 % от фонда оплаты труда)	$142\,800 \cdot 0.346 = 49\,409$ руб.
11	Прочие затраты (арендная плата, услуги связи, коммунальные услуги, расходы на служебные командировки, на рекламу и др.) – 1% от фонда оплаты труда	$142\,800 \cdot 0.01 = 1428$ руб.
12	Общехозяйственные расходы (- 3% от фонда оплаты труда)	$142\,800 \cdot 0.03 = 4284$ руб.
13	Полная себестоимость (сумма всех предыдущих пунктов)	$750 + 1464 + 142800 + 49409 + 1428 + 4284 = 200\,135$ руб.
14	Планируемая прибыль (5% от полной себестоимости)	$200\,135 \cdot 0.05 = 10\,007$ руб.
15	Цена разработчика (оптовая цена) без НДС – сумма себестоимости и планируемой прибыли	$200\,135 + 10\,007 = 210\,142$ руб.
16	Налог на добавленную стоимость (НДС) – 20% от цены разработчика	$210\,142 \cdot 0.2 = 42\,028$ руб.
17	Итого стоимость ПП с НДС (общие затраты на разработку программы) – сумма цены разработчика и НДС	$200\,135 + 42\,028 = 242\,163$ руб.

Также можно и исключить затраты на обучение персонала, т.к. программа служит для моделирования контактного взаимодействия и определения параметров контакта, является простой в эксплуатации, и для ознакомления с её работой нужно не более часа. Поэтому можно условно считать, что

$$З = Ц_{\text{программы}} + З_{\text{техники}} + З_{\text{обучения}} = 242\,163 + 0 + 0 \approx 242\,163 \text{ руб.}$$

Таким образом, для предприятия, которое приняло решение о разработке подобного программного продукта собственными силами, затраты составят 242 163 руб. Если рассматривать разработку аналогичного программного продукта по предлагаемой методике группой специалистов с выполнением работ на более высоком уровне (учёт большего числа факторов, поддержка многопроцессорности, оптимизация алгоритмов, визуализация с использованием текстур, теней и т.д.), то расходы на разработку могут значительно вырасти, например, до 10 000 000 руб. При расчёте цены реализации готовой продукции (расчётной программы) учитывают срок окупаемости, равный 2 года, и прогнозируют объём продаж. При реализации, например, 5 программ в месяц различным предприятиям за 2 года будет продано $2 \cdot 5 \cdot 12 = 120$ программ. При исходных затратах в 10 000 000 руб. отпускная цена программы составит примерно 84 000 руб., что для предприятия не является критической. При больших объёмах продаж отпускная цена программного продукта может быть значительно меньше. Для определения потенциальных покупателей дополнительно необходимы маркетинговые исследования рынка.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ РАБОТЫ.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айнбиндер С.Б. О площади контакта между трущимися телами. // Известия АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. - 1962, № 6, с. 172-174.
2. Алексеев В.М. Основы расчёта неподвижных соединений на герметичность // Сб. трудов. Контактное взаимодействие твёрдых тел. - Калинин: КГУ, 182, с. 121-129.
3. Алексеев В.М. Влияние анизотропии микрогеометрии уплотнительных поверхностей на герметичность неподвижных соединений // В.М. Алексеев, Б.С. Покусаев. Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции "Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин", 27-29 ноября 1985 г., - Кишинев, КШ им. С. Лазо, 1985, с.34-35.
4. Алексеев В.М. Расчёт металлических уплотнений на герметичность при высоких контактных давлениях // В.М. Алексеев, Б.С. Покусаев. Сб.: Фрикционный контакт деталей машин. Калинин: КГУ, 1984. - 116 с.
5. Алексеев Н.М. Металлические покрытия опор скольжения. - М.: Наука, 1973. - 74 с.
6. Андреев Г.А. Исследование формирования контакта шероховатых поверхностей: автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: ВНИИЖТ, 1962.
7. Аравин В.И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В.И. Аравин, С.Н. Нумеров - М.: Госэнергоиздат, 1953. - 616 с.
8. Арефьев А.В. Уплотнения индием разъёмных соединений сверхвакуумных систем. // Приборы и техника эксперимента. - 1966, № 4, с. 138-140.
9. Аэров М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. - Л.: Химия, 1979 г.
10. Бабкин В.Т. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем. / В.Т. Бабкин, А.А. Зайченко, В.В. Александров, Б.Ф. Бызялов, В.Н. Иванов, Д.П. Юрченко - М.: Машиностроение, 1977. - 120 с.
11. Белухин В.А. Ремонт трубопроводов жидкостно-газовых систем самолетов и вертолетов / В.А. Белухин, В.М. Сапожников, Т.Ф. Сейфи, А.А. Федорова, Я.Л. Борт. И.Ф. Гвинтовкин, А.В. Козлов, А.С. Мищенко М.: Машиностроение, 1969, с.4-13.
12. Белый В.А., Петроковец М.Н., Свириденко А.И. Фактическая площадь касания при вязкоупругом контакте // В.А. Белый, М.Н. Петроковец, А.И. Свириденко - Механика полимеров. - 1970. - № 1, с. 18-22.
13. Белый В.А. Введение в материаловедение герметизируемых систем. В.А. Белый, Л.С. Пинчук - Минск: Наука и техника, 1980. - 304 с.
14. Биргер И.А. Резьбовые соединения. / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич - М., Машиностроение, 1973, с. 254.
15. Богомолов, Д.Ю. Математическое моделирование течения жидкости в щелевых каналах с учетом реальной микротопографии поверхности их стенок / Богомолов Д.Ю., Порошин В.В., Радыгин В.Ю., Сыромятникова А.А., Шейпак А.А.-М.: МГИУ, 2010. 162 с.
16. Божко, Г.В. Разъемные герметичные соединения / Вестник ТГТУ, 2010. - Том 16, № 2. – С. 404-420.

17. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин / Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
18. Брук О.А. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на герметичность соединений. // Тр. НИАТ, № 271, 1969. - 36 с.
19. Буланов, Э.А. Контактная задача для шероховатых поверхностей // Техника машиностроения, 2009. - №1 (69), 36 - 41.
20. Буренкин В.В. Новые конструкции уплотнений для неподвижных соединений. // В.В. Буренкин, В.П. Дронов - Химическое и нефтяное машиностроение. - 1977, № 5, с.44 - 47.
21. Витенберг Ю.Р. Шероховатость поверхности и метода её оценки. - Л.: Судостроение, 1971. - 106 с.
22. Волошин А.А. Расчёт фланцевых соединений трубопроводов и сосудов. - Л.: Судпромгиз, 1959. - 291 с.
23. Войнов К.Н. "Надёжность вагонов", М.: изд-во "Транспорт", 1989. - 112 с.
24. Воронин Н.А. Закономерности контактного взаимодействия твердых топокомпозиционных материалов с жестким сферическим штампом // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2007. - №5, 3 - 8.
25. Гаврюхин В.М. Влияние методов обработки уплотнительных поверхностей на герметичность неподвижных разъёмных соединений гидравлических систем. // В.М. Гаврюхин, А.С. Коротков, Н.А. Шимко - Авиационная промышленность. - 1978, № 6, с. 18 - 21.
26. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. – Киев.: Техніка, 1974. –1970. – 270с.
27. Гольдштейн Л.Г. Конструкторские способы герметизации аппаратуры. - Л.: ЛДНТП, 1967. - 34 с.
28. Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие фрактальных шероховатых поверхностей деталей машин / Д.Б. Горохов / Дисс. канд. техн. наук по спец. 05.02.04. – М., РГБ, 2005 г. – 148 с.
29. Горячева И.Г. Механика фрикционного контакта / И.Г. Горячева. - М.: Наука, 2001. – 479 с.
30. ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности / Москва, Стандартиформ 2015 г. – 48 с.
31. ГОСТ 19.102-77 Единая система программной документации: Стадии разработки. – 1977.
32. Гуревич Д.Ф. Расчёт и конструирование трубопроводной арматуры. - М.: Машиностроение, 1969. – 304 с.
33. Дёмкин Н.Б. Расход газа через стык контактирующих поверхностей // Н.Б. Дёмкин, В.А. Алексеев, В.Б. Лемборский, В.И. Соколов // Известия вузов. Машиностроение. - 1976, № 6, с. 40 - 44.
34. Дёмкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с.
35. Дёмкин Н.Б. Влияние микрогеометрии на герметичность разъёмных соединений с прокладками из низко модульных материалов // Н.Б. Дёмкин, В.Б. Лемборский, В.И. Соколов - Известия вузов. - Машиностроение, 1976, № 6, с. 4 - 6.
36. Дёмкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Дёмкин, Э.З. Рыжов - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.

37. Демкин, Н.Б. Контакт шероховатых волнистых поверхностей с учетом взаимного влияния неровностей / Н.Б. Демкин, С.В. Удалов, В.А. Алексеев, В.В. Измайлов, А.Н. Болотов // Трение и износ, 2008. - Т.29, №3, 231 - 237.
38. Дерягин Б.В. Измерение удельной поверхности пористых и дисперсных тел по сопротивлению течения разряженных газов // Докл. АН СССР, 1946, т. 53, с. 627 - 630.
39. Дианов, А.А. Технологическое обеспечение качества деталей с износостойкими покрытиями за счет управления параметрами точности основы и покрытия / А.А. Дианов. - Автореф. дисс. канд. наук. - Барнаул: АлтГТУ, 2010.-16 с.
40. Димов В.А. Применение анаэробных материалов для обеспечения герметичности неподвижных соединений. // В.А. Димов, В.В. Юшков, Ф.Х. Бурумкулов - Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин", 12-14 октября 1983 г. – Севастополь. 1983. – 220 с.
41. Дулявичус И.И. Влияние качества контактирующих поверхностей на герметичность стыка. // И.И. Дулявичус, А.Г. Суслов, С.П. Жедялис / Механика - тр. конф. по развитию технических наук в республике и использование их результатов. - Каунас, 1979, с.119-124.
42. Дьяченко П.Е. Влияние микрогеометрии поверхностей цапф на работу подшипников из свинцовистой бронзы // П.Е. Дьяченко, Б.Л. Сливко / Трение и износ в машинах. М.: Изд. АЕ СССР, 1950. - 25 с.
43. Железнов Б.П. Расчёт точности и параметров технологического процесса изготовления запорных клапанов. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: Завод-втуз при ЗИЛе, 1985, - 25 с.
44. Жирнов А.Ф. Влияние деформационной анизотропии на гидро- и газоплотность подвижных соединений / А.Ф. Жирнов, Н.Н. Ильин, А.А. Кушель, В.А. Николаев, О.В. Ванд, В.А. Тюняев // Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции "Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин", 27-29 ноября 1985 г., - Кишинев, КШ им. С. Лазо, с. 20 - 21.
45. Захаренко С.Е. Исследование герметичности разъёмных прочноплотных соединений // Общее машиностроение, - 1941, № 7-8, с. 1-5.
46. Иванов А.С. Нормальная, угловая и касательная контактные жесткости плоского стыка // Вестник машиностроения, 2007. - №1, 34 - 37.
47. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин и др. - М.: Наука, 1994. – 383 с.
48. Измайлов В.В. Приближенный расчёт герметичности соединений уплотнений // В.В. Измайлов, В.И. Соколов - Известия вузов, - Машиностроение, 1977, № 1, с. 50 - 55.
49. Измайлов, В.В. Жесткость контакта и его фреттингостойкость // В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин / Механика и физика процессов на поверхностях и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. - Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.В. Измайлова. Вып. 6. Тверь: ТвГТУ, 2013. С. 4-9.
50. Измайлов, В.В. Нормальная и касательная жесткости плоского стыка шероховатых поверхностей / В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин. - Механика и

- физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.В. Измайлова. Вып. 5. Тверь: ТвГТУ, 2012. – С. 4-11
51. Изменение проницаемости кольцевых уплотнений в зависимости от типа уплотняемой конструкции и давления // Доклад на конференции SEA Conference Proceedings, 1967, с.44-49.
 52. Кадземаки. Кикай Гаккай ромбунсю, 1968, 194 с.
 53. Калашников В.А. Исследование и расчёт оптимальной точности геометрических параметров уплотнения клапанного типа: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: Завод - втуз при ЗИЛе, 1982. - 20 с.
 54. Киселев Г.П. Основы уплотнения в арматуре высокого давления. - М.: Госэнергоиздат, 1950. - 124 с.
 55. Кликушин Ю.Н. Фрактальная шкала для измерения формы распределений вероятности // Журнал радиоэлектроники № 3, 2000. – С. 15-18.
 56. Ковальский Б.С. Контактная задача в инженерной практике // Известия вузов. Машиностроение, 1960, № 6, с. 81 - 97.
 57. Коллинз Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – 350 с.
 58. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. - М.: Наука, 1974. - 112 с.
 59. Кондаков Л.А. Уплотнения гидравлических систем. - М.: Машиностроение, 1972. - 240 с.
 60. Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / под общ. ред Л.А. Кондакова, А.И. Голубева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1994. – 448 с.
 61. Котельников А.П. Исследование технологических возможностей повышения плотности плоских стыков: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Брянск: БИТМ, 1977.
 62. Крагельский И.В. О природе контактного предварительного смещения твёрдых тел. // И.В. Крагельский, Н.М. Михин. - ДАН СССР, 1963, № 1, с. 78-81.
 63. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
 64. Крагельский И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.
 65. Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, Н.М. Добычин, В.С. Комбалов - М.: Машиностроение. 1977. - 526 с.
 66. Крымасев В.П. Теплоотдача, сопротивление и температурные поля при фильтрации газа в пористых телах. // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. Выпуск 1408. - М., 1972.
 67. Лабутин И.С. Связь шероховатости и фрактальной размерности для односвязных поверхностей // И.С. Лабутин, В.В. Брюханов // Изв. КТГУ. - 2006. - № 10
 68. Ланков, А.А. Вероятность упругих и пластических деформаций при сжатии металлических шероховатых поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2009. - №3, 3 - 5.
 69. Лебединский Г.Г. Исследование зависимости некоторых эксплуатационных свойств неподвижных и подвижных соединений от микрорельефа контактирующих поверхностей: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд.

- техн. наук. - М.: 1971. - 21 с.
70. Левина З.М. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов - М.: Машиностроение, 1971. - 264 с.
 71. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л.С. Лейбензон. - М.: Гостехиздат, 1947 г.
 72. Лейв Г.Я. Исследование технологических факторов, влияющих на плотность фланцевого соединения // Сб. тр. ЦНИИТ судостроения. Л.: Судпромгиз, вып.40. - 1963, с. 41 - 43.
 73. Лыков А.В. Теплообмен. - М.: Энергия, 1972. - 315 с.
 74. Магид М.З. Уплотняющие свойства фторопласта // М.З. Магид, П.А. Белокуров / Общее машиностроение. - 1969, № 9, с. 11 - 13.
 75. Маджумдар, А. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей / А. Маджумдар, Б. Бхушан // Современное машиностроение. Сер. Б.–1991.–№6.– С.11-23.
 76. Майер Э. Торцовые уплотнения: Пер. с нем. / Э. Майер. – М.: Машиностроение, 1978. – 288 с.
 77. Маккул, Дж. Распределение площади, нагрузки, давления и локального повышения температуры в микроконтактах по модели Гринвуда–Вильямсона / Проблемы трения и смазки, 1988. - № 4. - С. 99 - 105.
 78. Максак В.И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта. - М.: Наука, 1975. - 59 с.
 79. Мамонтов Г.В. Прокладки для фланцевых соединений, арматуры, трубопроводов и оборудования для нефтяной, химической и газовой промышленности // Г.В. Мамонтов, Г.З. Вашин / Промышленная трубопроводная арматура. - М.: ХИ-10, 1972. - 29 с.
 80. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт / Пер. с англ. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. - 656 с.
 81. Маркво В.Е. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров уплотнительных устройств с упругими металлическими газонаполненными уплотнениями на повышение работоспособности разъёмных неподвижных соединений гидро- газовых систем летательных аппаратов и их двигателей: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: МАТИ, 1976.
 82. Мендельсон Д.А. Влияние отклонения формы уплотняющих поверхностей на усилие уплотнения затвора // Химическое и нефтяное машиностроение, 1977, № 7, с. 37 - 38.
 83. Митрофанов Е.П. Влияние формы и размеров соприкасающихся тел на величину сближения и площадь фактического контакта // Теория трения и износа. - М.: Наука, - 1965, с.112-114.
 84. Михин Н.М. Внешнее трение твёрдых тел. - М.: Наука, 1977. - 222 с.
 85. Михин Н.М. О связи площади касания и сближения при неподвижном и скользящем контактах // Сб.: Трение твёрдых тел. - М.: Наука, 1964, с. 62-65.
 86. Молдаванов О.И. Исследование эксплуатационной надёжности фланцевых соединений трубопроводных систем: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: МИХМ, 1972.
 87. Мур Д.Ф. Основы и применение трибоники. - М.: Мир, 1978. - 484 с.
 88. Мухаметшин Х.Х. Исследование условий обеспечения плотности разъёмных соединений узлов тракторов и автомобилей (на примере ДВС с

- алюминиевыми радиаторами) Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Л.: Пушкин, 1968.
89. Николаев В.А. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на работоспособность разъемных неподвижных соединений с металлическими упругими С-образными уплотнениями. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: МАТИ, 1981.
 90. Огар П.М, Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей: монография. / П.М. Огар, Д.Б. Горохов, А.В. Турченко / Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 282 с.
 91. Отделение по микроутечке. Кикай Гаккай, 1965, 68, 580, с.32-39.
 92. Павлючук А.И. Технология точного аппаратуростроения / А.И. Павлючук, И.А. Фефелов - Л.: Машиностроение, 1977, с. 75 - 91.
 93. Патир Н. Модель усреднённого течения для определения влияния трёхмерной шероховатости на частичную гидродинамическую смазку // Н. Патир, Ш.С. Чжен. - Проблемы трения и смазки. – 1979, № 1, с.10-15.
 94. Пинчук Л.С. Создание и исследование герметизирующих систем в машиностроении на основе термопластов. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Мн.: 1974. - 24 с.
 95. Погодин, В.К. Разъемные соединения и герметизация в оборудовании высокого давления / В.К. Погодин; под ред. А.М. Кузнецова. – Иркутск: Иркутская областная типография № 1, 2001. – 406 с.
 96. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В.Л. Попов. - М.: Физматлит, 2013. -352 с.
 97. Порошин, В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография / В.В. Порошин. - М.: Машиностроение - 1, 2007. - 196 с.
 98. Порошин, В.В. Повышение герметичности соединений на основе технологического обеспечения и контроля топографических параметров контактирующих поверхностей / В.В. Порошин. - М.: Машиностроение - 1, 2007. - 313 с.
 99. Потапов, А.А. Теория рассеяния волн фрактальной анизотропной поверхностью / А.А. Потапов, А.В. Лактюнькин // Нелинейный мир. - 2001.- Т. 6. - № 6. – С. 3-36.
 100. Потапов А.А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур // А.А. Потапов, В.В. Булавкин, В.А. Герман и др. - Журнал технической физики, 2005, том 75, вып. 5. – С. 28-45.
 101. Пранч А.С. Механизм возникновения и разрушения сцеплений между контактирующими металлическими телами при совместном действии нормальной нагрузки и сдвига: Автореф. канд. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. Институт механики. – Рига, АН латвийской ССР, 1969. – 28 с.
 102. Проников А.С. Основы надёжности и долговечности машин. - М.: Изд-во стандартов, 1969. - 160 с.
 103. Протопопов В.Б. Конструкции разъемных соединений судовых трубопроводов и их уплотнения. - Л.: Судостроение, 1972. - 96 с.
 104. Протопопов В.Б. Уплотнения судовых фланцевых соединений. - Л.: Судостроение, 1966. - 160 с.
 105. Продан, В.Д. Влияние условий размещения прокладки между фланцами на ее

- осевую податливость / В.Д. Продан, Г.В. Божко // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2009. – № 12. – С. 27–28.
106. Продан В.Д. Техника герметизации разъемных неподвижных соединений / В.Д. Продан. – М.: Машиностроение, 1991. – 160 с.
 107. Продан В.Д. Разъемные соединения с фторопластовыми уплотнениями: справочник / В.Д. Продан [и др.]. – М.: Тривола, 1995. – 180 с.
 108. Продан В.Д. Исследование вопросов механизма герметизации плоских упругих неподвижных уплотнений: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: МИШ, 1968.
 109. Раздолин М.В. Уплотнения авиационных гидравлических агрегатов. - М.: Машиностроение, 1965. - 194 с.
 110. РМ-3-62. Руководящий технический материал "Приложение к силовым расчётам запорной арматуры".
 111. Рот А. Вакуумные уплотнения. - М.: Энергия, 1971. - 464 с.
 112. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. - Рига: Зинатме, 1975. - 214 с.
 113. Румянцев О.В. Оборудование цехов синтеза высокого давления в азотной промышленности / О.В. Румянцев. – М.: Химия, 1970. – 375 с.
 114. Рыжов Э.В. Влияние качества поверхности на контактную жесткость деталей // Вестник машиностроения. - 1971, № 7, с.18-21.
 115. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. - М.: Машиностроение, 1966. - 195 с.
 116. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. - Киев: Наукова думка, 1984. - 272 с.
 117. Рыжов Э.В. Технологическое управление геометрическими параметрами контактирующих поверхностей // Расчетные методы оценки трения и износа. - Брянск: Приокское книжное изд-во, 1975, с. 98-138.
 118. Скворцов Б.В. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на повышение работоспособности титановых трубопроводов газотурбинных двигателей: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: МАТИ, 1973.
 119. Солдатов В.Ф. Повышение работоспособности разъемных неподвижных соединений трубопроводов конструктивно-технологическими методами: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - М.: Завод-втуз при ЗИЛе, 1983.
 120. Справочник по математике / сост. Корн Г. и Корн Н. - Наука, 1978. - 832 с.
 121. Справочник: Расчёт фланцевых соединений трубопроводов и сосудов / сост. Волошин А.А., Григорьев Г.Т. - Л.: Машиностроение, 1979. - 125 с.
 122. Строганов Г.А. Установка для испытаний пневмоаппаратуры / Г.А. Строганов, М.Д. Мельник, В.Ф. Солдатов, В.А. Николаев, В.В. Порошин // Автомобильная промышленность. - 1985, № 7, с. 28.
 123. Строганов Г.А. Установка для испытания на герметичность. / Г.А. Строганов, В.Ф. Солдатов, В.А. Тюняев, В.В. Порошин, С.И. Шаравин // Автомобильная промышленность. - 1985, № 5, с. 34-35.
 124. Строганов Г.А., Солдатов В.Ф., Порошин В.В. Технологическое управление гидро- газоплотностью герметизируемых соединений. // Г.А. Строганов, В.Ф. Солдатов, В.В. Порошин. - Тезисы докладов 2-й Всесоюзной конференции "Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов

- машин", 27-28 ноября 1985 г., - Кишинев, КПИ им. С. Лазо, 1985, с. 15-16.
125. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений. - М.: Наука, 1977. - 101 с.
 126. Суслов А.Г. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т.1 / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
 127. Ткач Л.П. О механизме герметизации и оценке плотности подвижных контактных уплотнений // Л.П. Ткач, А.Д. Домашнев - Химическое и нефтяное машиностроение. – 1968. № 11, с. 6-7.
 128. Тихомиров В.П., Багров Г.В., Виговский М.В. Контактное взаимодействие шара с шероховатой поверхностью // Трение и смазка в машинах и механизмах, 2008. - № 9, 3 - 6.
 129. Тихомиров В.П. Имитационное моделирование герметичности плоских стыков / В.П. Тихомиров, Л.В. Вольпер, машиноведение, 1986. - №2. – С. 91 – 94.
 130. Тихомиров, В.П. Контактная жесткость плоского стыка // В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, Д.Я. Антипин // Известия Самарского научного центра РАН, 2016.-Том 18.-№1. - С. 327-331
 131. Тоёта, Кё. Сборник: Кикай Гаккай дзэнсаю, 1963, 95, 6а. - 14 с.
 132. Туник А.А. К вопросу о расчёте плоских металлических уплотнений периодического действия // Арматуростроение, ЦКБА. Л.: 1972, № 1, с. 47-54.
 133. Туник А.А. К вопросу создания математической модели плоского металлического уплотнения // Труды Ленинградского НИиКИХМ. - Л.: 1965, № 5, с.14-16.
 134. Уплотнения / Под ред. В.К. Житомирского // Сборник статей. - М.: Машиностроение, 1964. - 294 с.
 135. Уплотнения типа "металл с металлом" для разъёмных соединений // Доклад на конференции SAE CONFERENCE PROCEEDINGS, 1967, с.17-26.
 136. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. / Е. Федер – М: Мир, 1991 г. – 254 с., ил.
 137. Харач Г.М. Об определении характеристики микрогеометрии поверхности со случайной поверхностью при расчётах трения и износа. // Г.М. Харач, Л.И. Экслер. - Сб.: Контактное взаимодействие твердых тел и расчёт сил трения и износа. М.: Наука, 1971, с. 167 – 175.
 138. Хакен Г. Синергетика. - М.: Мир, 1980. – 400с.
 139. Цукидзо Т. Кикай Гаккай Ромбунсю, 1966, 32, 239, 1083.
 140. Цукидзо Т. Современное состояние и тенденция исследования уплотнения стационарных твёрдых тел // Характеристики уплотнения твёрдых тел в статическом контакте, - Дзюнкацу, 1969, т.14, № 5, с. 228-231.
 141. Чжен Ш.С. Влияние шероховатости поверхностей на среднюю толщину плёнки смазки между смазанными роликами // Проблемы трения и смазки. - 1976, № 1, с. 123-130.
 142. Щелкачев В.Н. Подземная гидравлика / В.Н. Щелкачев, Б.Б. Лапук. - М.: Гостопиздат, 1949. - Переиздана: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 734 с.
 143. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации: Монография: В 2 ч. - М.: Нефть и газ, 1995. Часть 1. 586 с.
 144. Шупляк И.А. К расчёту плотности фланцевых соединений с прокладками из полимерных материалов // И.А. Шупляк, М.И. Таганов - Вестник машиностроения. - 1966, № 1, с.7-9.

145. Щупляк И. А. Исследование плотности фланцевых соединений с прокладками из полимеров: Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Л.: ЛПИ им. Ленсовета, 1965.
146. Экслер Л.И. О работе контактного металлического уплотнения // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1966, № 2, с.5-8.
147. Электронный ресурс: <http://infopedia.su/6x9c09.html>
148. Электронный ресурс: <http://gubins.ncsu.edu/research.html>
149. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.Б. Рыжов, В.И. Аверченко - Минск: Наука и техника, 1977. - 256 с.
150. Armand G. Vacuum / G. Armand, J. Lqpujoulade, J. Paigm / 14, 1964, 53, p. 14-17.
151. Barman T.K. Fractal relation with conventional roughness parameters for surface topography generated in grinding / T.K. Barman, P. Sahoo // Proc. of the Intern. Conf. of Mech. Engineering, 2005. - Dhaka, Bangladesh / P.1-5.
152. Bierl, A. Zeckraten von Dichteelementen / A. Bierl // Chemie – Ingenieur – Technik. – 1977. – Vol. 49, No. 2. – P. 89–95.
153. Bear J. Dynamics of fluids in perous media, American Elswier Publ. Comp. New - Jork, 1972. 612 p.
154. Berührungsdichtungen an ruhenden maschinenteilen. Technik und Betrieb, 1975, Bd, № 4, s 14-17.
155. Bush A. Strongly anisotropic rough surfaces / A. Bush, R. Gibson, G. Klogh // Journal of Lubrication Technology. - 1979.–V. 101.– P. 15-20.
156. A.W. Bush. The elastic contact of a rough surface / A.W. Bush, R.D. Gibson, T.R. Thomas / Wear, 1975, pp. 163-168.
157. Bhushan B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Multiple asperity contact / B. Bhushan / Tribology Letters. – 1998.– V.4. – P. 1-35.
158. Block J.M. Periodic contact problems in plane elasticity / J.M. Block, L.M. Keer // Journal of mechanics of materials and structures. - 2008.-Vol. 3, No. 7.- P. 1207-1237.
159. Buczkowski, R A fractal stiffness model for elasto – plastic contact analysis in press joint / R. Buczkowski, M. Kleiber / CMM - 2011 – Computer Methods in Mechanics, 9–12 May 2011, Warsaw, Poland. P. 1-2.
160. Buczkowski R. Normal contact stiffness of fractal rough surfaces / R. Buczkowski, M. Kleiber, G. Starzynski // Arch. Mech., 66, 6, pp. 411–428, Warszawa 2014.
161. Chang W. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces / W. Chang, I. Etsion, D. Bogy // Journal of Tribology. – 1987. – V. 109. – P. 257 - 263.
162. Chenq H.S. EHD Lubrication of Circumferentially Ground Rough Disks / H.S. Chenq, A. Dyson. - ASLE Paper No. 76-LC-1A-2; 1976, p. 89-96.
163. Courtney - Pratt J.S. The Effected a Tangential Force on the Contact of Metallic Bodies / J.S. Courtney - E. Pratt / Eisner Proc. Roj. Soc., Vol 238, № 1215, 1957 p. 529-550.
164. Cox B.L. Fractal surface: measurement and application in earth science / B.L. Cox, JS.Y. Wang // Symmetry: Culture and Science. - 1993. – V. 4. - № 3. – P. 243-283.
165. Fatt I. The network model of porous media // Petrol. Trans. AIME, 1956. – 207 / P. 144 - 181.
166. Feng I.M. An Experimental Study of Fretting // I.M. Feng, B.G. Rightmire. – 1956. – Vol. 170. – №4. – pp. 1055 - 1064

167. Feng I.M. The mechanism of fretting // I.M. Feng, B.G. Rightmire. - Lubrication Eng. – 1953.–Vol. 9. – pp. 134-136, 158-161.
168. Fish G. European Lubricating Grease Institute / G. Fish, F. Herrero – AGM 2010 – Kiev, Ukraine.
169. Ganti S. Generalized fractal analysis and its application to engineering surfaces / S. Ganti, B. Bhushan // Wear. – 1995. – V. 180. – P. 17-34.
170. Gonzalez-Valadez M. Study of interfacial stiffness ratio of a rough surface in contact using a spring model / M. Gonzalez-Valadez, A. Baltazar, R.S. Dwyer-Joyce // Wear, 2010 -268 (3-4), pp. 373-379.
171. Greenwood J.A. Contact of nominally flat surfaces // J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson. - Proc. R. Soc., Series A, 1966. – V.295, №1422. – P.300 – 319.
172. Handbook of porous media. Second edition / Edited by Kambiz Vafai.- CRC Press: Taylor & Francis Group, 2005.- 742 p.
173. Hunt A. Percolation theory for flow in porous media. Lect. notes phys. 771 / A. Hunt, R. Ewing. – Springer, Berlin Heidelberg, 2009. – 319 p.
174. Hurricks P.L. The Mechanism of Fretting – A Review // Wear. – 1970. – Vol.15. – pp.389 – 409.
175. Jackson, R.L. A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat / R.L. Jackson, I. Green // ASME J. Tribology, 2005.-V. 127, - P. 343-354
176. Kogut, L. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat / L. Kogut, I. Etsion // ASME J. Appl. Mech., 2002.-V. 69.-P. 657-662
177. Kou, J. Fractal analysis of effective thermal conductivity for three-phase (unsaturated) porous media / J. Kou, Y. Liu, F. Wu, J. Fan, H. Lu, Y. Xu // Journal of applied physics, 2009. – v.106. – 054905. 1 – 6.
178. Majumdar A. Role of fractal geometry in roughness characterizations and contact mechanics of surfaces // A. Majumdar, B. Bhushan / ASME J. of tribology, Vol. 112 (1990), pp. 205 – 216.
179. Majumdar, A. Fractal characterization and simulation of rough surfaces / A. Madjumdar, C.L. Tien // Wear, 1991.-V.136.-P. 313-327.
180. Mindlin R. D. Compliance of elastic bodies in contact / R.D. Mindlin // Trans. ASME. J. Appl. Mech., 1949.-Vol. 71.-P. 259-268.
181. Moore D.F. Pep in PC, 88. Nafional Institute for Physical Planning and Construction Research, Dublin, 1972, p. 10-15.
182. Nayak P. R. Random process model of rough surfaces / P. R. Nayak // Transactions of the ASME, Journal of lubrication technology,1971. - P. 398 - 407.
183. Newman M.E.J. Power laws, Pareto distribution and Zipf's law, Contemporary physics, 2005, vol. 46, №. 5. pp. 323-351.
184. Norden, B.N. On the compression of a cylinder in contact with a plane surfaces / B.N. Norden. - Washington: Institute for Basic Standards National Bureau of Standards, 1973.- 47 pp.
185. Novikov N.V. Mechanical property measurement e techniques of structural material at cryogenic temperatures. – Adv. Cryogen. End.Vol 22. New - Jork- London, 1977, p. 113-118.
186. Parker R.C. The Static Coefficient of friction and the Area of Contact / R.C. Parker, D. Hatch. - Proc. Phys. Soc., Vol. 63, 1950, p. 185-197.
187. Patir N. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces / N. Patir, H.S. Cheng // J. Lubric. Technol.,1979.- Vol. 101.-P. 220 – 229.

188. Pavelescu D. On the roughness fractal character, the tribological parameters and the error factors / D. Pavelescu, A. Tudor // Proceedings of the Romanian Academy. Ser. A. - 2004. –Vol. 5. - №2.
189. Peklenik J. New Development in Surface Characterization and Measurements by Means of random Process Analysis. Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 182, Part. 3K. 1967-1968, p 108.
190. Prinse W.A. Bimetallic seal solves cryogenic sealing problem. - Hydraulics and Pneumatics; 1964, v. 17; № 9.
191. Roberts J. Gaskets and bolted joints. Journal of Applied mechanics, 1950, 17, № 2, p. 17-21.
192. Roth A. Sealometry and sealography / 3-rd International Conf. Fenid. Seal. Cambridge, 1967 (Reprints paper) S.j., s.a., c 2/7 – c. 2/36.
193. Roth A. Vacuum, 1970, v. 20, № 10, p. 431-435.
194. Sayles R.S. Surface topography as a nonstationary random process / R.S. Sayles, T.R. Thomas / Nature, 1978, vol. 271, pp. 431-434.
195. Siebel E. Mitteilungen der Vereinigung der Crosskesselbesitzer, 1935; Helf, 57, Mai, s. - 3-9.
196. Static Seals. Engineering Materials and Design 1970, V 13, № 3, p. 351-355.
197. Stout, K.J. Development of methods for the characterization of roughness in three dimensions. - Penton Press, 2000. - 358 p.
198. Trutnovsky K. Berührungsdichtungen an ruhenden und bewegten Maschinenteilen. - Berlin, 1958, 144 s.
199. Turcotte D.L. Fractals and fragmentations // J, Geogr., 1986. - Res. 91. – P. 1924 - 1926.
200. Varadi K. Evaluation of the real contact areas, pressure distributions and contact temperatures during sliding contact between real metal surfaces / K. Varadi, Z. Nader, K. Friedrich // Wear. 1996. - 200. 55 - 62.
201. Vingsbo, O. On fretting maps / O.Vingsbo, S. Soderberg // Wear, 1988.- 126.-P. 131– 147
202. Voshida S. Proc. Cth Japan National Congress for Appl. / S. Voshida, S. Juchi. - Mechanics, 1963, 3, p. 33.
203. Wallach J. Calculation of leakage between Metallic Sealing Surfaces. Paper. Amer. Soc. Mech. Eng. 1968 N L nb – 15, p 1 - 15.
204. Wang, S. A fractal theory of the interfacial temperature distribution in the slow sliding regime. Part 1. Elastic contact and heat transfer analysis / S.Wang, K. Komvopoulos // Trans. ASME, Journal of Tribology.- 1994. – V.116. – P. 812 – 823.
205. Waterhouse R.B. Fretting Corrosion // Int. Ser. Monogr. Sci. and Tech. – Pergamon Press, Oxford and New-York, 1972. – Vol. 101. – P.265.
206. Weatcraft S.W. An explanation of scale dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry / S.W. Weatcraft, S.W. Tyler // Water resource Res., 1988. - V. 24. - P. 566 - 578
207. Xie H. Direct fractal measurement and multifractal properties of fracture surfaces / H. Xie, J. Wang, E. Stein // Physics Letters A 242 (1998) 41-50.
208. Yang H. Modeling and Analysis of Normal Contact Stiffness of Machined Joint Surfaces / H. Yang // International Journal of Control and Automation Vol.7, No.6 (2014), pp. 21-32.
209. Yoshioka, N. Elastic properties of contacting surfaces under normal and shear loads:

- Part 1 – Theory / N. Yoshioka, C.H. Scholz // *Journal of Geophysics Research*, 1989. – 94. – P. 17681 - 17690.
210. Yu B. M. Fractals / B. M. Yu, J. H. Le // *Fractals*. - 2001. – №9. – P.365
211. Yu B. M. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media // B. M. Yu, P. Cheng // *In. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002. - V. 45. - P. 2983 - 2993.
212. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для техниче-ских вузов. 2-е изд. переработ, и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. - 664 с, ил.
213. Крагельский, И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.
214. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
215. Горячева ИХ., Добычин М.Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
216. Zhao, Y., Yang, C, Cai, L., Shi, W., Hong, Yi. Stiffness and Damping Model of Bolted Joints with Uneven Surface Contact Pressure Distribution\ *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 62(2016)11, 665-677.
217. Pohrt R., Popov V.L. Contact mechanics of rough spheres: crossover from fractal to hertzian behaviors. *Hindawi publishing corporation advances in tribology*. – 2013. – V. 974178. - P. 1-4.
218. Qureshi, A., Prajapati, A.N. Effect of Surface Roughness on Contact Pres-sure\ *International Journal for Scientific Research & Development (IJSRD) | Vol. 1, Issue 1, 2013. ISSN (online): 2321-0613. P. 22-25.*
219. Тихомиров, В.П. Нейросетевые модели в трибологии/В.П. Тихомиров, П.Ю. Шалимов// *Трение и износ*, 2000.–Т.21, №3.–С. 246–251.
220. Xu Kuo. The effects of size distribution functions on contact between fractal rough surfaces // Kuo Xu, Yuan Yuan, Jianjiang Chen // *AIP Advances* 8, 075317. - 2018. - P. 1 – 14
221. Majumdar A., Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact of rough surfaces. - *Ser. B*. - 1991. - №6. - Pp. 11-23.
222. Yaii, W. Contact analysis of elastic-plastic fractal surfaces. / W. Yaii // *Journal of applied physics*. – 1998. – V. 84(7). – P. 3617.
223. Шелковой, А.Н. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающие заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, Е.В. Мироненко, А.А. Ключко // *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2013. Вип. 8. С. 185-200.
224. Трошин, А.А., Захаров О.В. Математическая модель измерения шероховатости сферическим шупом//*Вестник БГТУ*, 2020. №2 (87). С. 28-32.
225. Musser, A. Friction on the Nanoscale and the Breakdown of Continuum Mechanics, 2009.
<https://www.rug.nl/research/zernike/education/topmasternanoscience/ns190musser.pdf> (P. 1-25).
226. Yong Ao, Q. Jane Wang, Penny Chen. Simulating the worn surface in a wear process// *Wear*, 252 (2002), 37–47.
227. Rîpă M., Pliuță V. Studies of worn surfaces by relocation profilometry. 9th International Conference on Tribology (Balkantrib'17) 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 295 012032. P. 1-8.

228. Ausloos M. Elastic-plastic contact model for bifractal surfaces / M. Ausloos, D.H. Berman / Proceedings of the Royal Society of London Series A. - 1985. - 400. – P. 331-350.
229. Liu Y. Fractal prediction model during the wear process based on Archard formula / Yao Liu, Yashun Wang, Xun Chen, Chunhua Zhang, Yuanvuan Tan / 2 International conference on mechanical, electronic and information technology engineering (ICMITE - 2016), 2016.
230. Dayi Zhang et al. Interfacial contact stiffness of fractal rough surfaces // Scientific Reports |7: 12874 | DOI:10.1038/s41598-017-13314-2 1
231. Zhou, G. Statistical, random and fractal characterizations of surface topography with engineering applications (1993). <https://digitalcommons.njit.edu/dissertations/1166>.
232. Кондратович, В.В. Обеспечение оптимальных триботехнических характеристик фрикционных предохранительных муфт приводов стрелочных переводов: дисс. к.т.н.: 05.02.04 / Кондратович Вадим Валентинович; [Место защиты: Брян. гос. техн. ун-т (БИТМ)]. - Брянск, 2008. - 182 с.: ил.
233. Ashby, M.F., Abulawi, J., Kong, H.S. Temperature maps for Frictional Heating in Dry sliding \ Tribology Transactions, Vol.34, Number 4, October 1991, pp577-587.
234. Волохов С.Г. Исследование триботехнических показателей сопряжений «сталь – сталь» применительно к фрикционным гасителям колебаний на основе влияния магнитного поля. Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. - Брянск. - 2020. - 174 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Российская Федерация
Брянская городская администрация
**МУНИЦИПАЛЬНОЕ УНИТАРНОЕ
БРЯНСКОЕ ГОРОДСКОЕ ПАССАЖИРСКОЕ АВТОТРАНСПОРТНОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ**

Адрес: 241035, г.Брянск, ул. Литейная, 86а
Телефоны: директор – 52-51-76
Бухгалтерия – 52-54-61
Факс: 52-74-78, 52-77-41
Оф. сайт: www.patp-брянск.рф
E-mail: autotransport32@mail.ru

Исчисл. счет 40702810608000103289
К/сч. счет 30101810400009000601
БИК 041501601
ИПН 3232024529, КПП 325701001
Среднерусский банк ПАО Сбербанк
отделение 8605 Сбербанка России

АКТ

О реализации на Муниципальном унитарном «Брянском городском пассажирском автотранспортном предприятии» результатов диссертационных исследований М.А. Измерова на тему «Обеспечение работоспособного состояния неподвижных металлических уплотнительных устройств, работающих в условиях фреттинга».

Комиссия в составе:

- главного инженера МУ БПАТП Луцкео О.А. - председателя комиссии;
- членов комиссии:
 - нач. производства Ветошко В.М.
 - нач. ОТК Черин Е.И.
 - мастер моторного участка Шилин А.В.,

составила настоящий акт о том, что тема диссертационной работы М.А. Измерова на тему «Обеспечение работоспособного состояния неподвижных металлических уплотнительных устройств, работающих в условиях фреттинга» актуальна, а результаты диссертационных исследований представляют большой интерес для Муниципального унитарного «Брянского городского пассажирского автотранспортного предприятия».

В частности, применение предложенной М.А. Измеровым методики расчёта времени работоспособного состояния уплотнительных устройств подвижного состава МУ БПАТП с использованием ЭВМ позволяет провести плановое обслуживание и герметизацию уплотнений до наступления протечек. При этом расходы на материалы и детали при проведении технического обслуживания уплотнительных устройств за пробный период несколько возросли, также увеличилось загруженность мастеров и слесарей, но в итоге не произошло ни одного случая потери работоспособности единиц парка подвижного состава МУ БПАТП по причине разгерметизации гидравлических систем, что вместе с экономией гидравлической жидкости и отсутствием простоя или срывов рейсов позволило увеличить итоговую прибыль

предприятия на 1192201,00 рубль в сравнении с аналогичным периодом прошлого года.

Комиссия МУ БГПАТП предлагает включить результаты диссертационного исследования М.А. Измерова в план проведения модернизации работы сервисной службы предприятия на 2020 г.

председатель комиссии МУ БГПАТП:

главный инженер Лушко О.А.

члены комиссии МУ БГПАТП:

нач. производства Ветощко В.М.

нач. ОТК Черин Е.И.

мастер моторного участка Шилин А.В.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2021619563

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2021619563
Дата регистрации: **15.06.2021**
Номер и дата поступления заявки:
2021615709 19.04.2021
Дата публикации и номер бюллетеня:
15.06.2021 Бюл. № 6
Контактные реквизиты:
нет

Автор(ы):
**Измеров Михаил Александрович (RU),
Измеров Максим Андреевич (RU)**
Правообладатель(и):
**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Брянский государственный
технический университет» (RU)**

Название программы для ЭВМ:

«Моделирование шероховатых поверхностей на основе теории фракталов»

Реферат:

Программа предназначена для создания фрактальных трёхмерных моделей шероховатых поверхностей как самых детальных и адекватных реальным, созданных в виде массива координат высот всех точек поверхности. Карта поверхности доступна пользователю для её визуальной оценки с возможностью её последующего сохранения в специальном формате *.map, а также есть возможность загрузки ранее созданной карты для её визуального осмотра. Для создания моделей трёхмерных поверхностей был реализован известный в литературе алгоритм «Последовательного Случайного Сложения», а также алгоритм моделирования по двухпараметрическому уравнению Вейерштрасса-Мандельброта для оценки их возможностей и области применимости. Программа написана в ограниченной версии среды программирования MS C# для учебных учреждений. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows XP/Vista/7/8/10.

Язык программирования: C++

Объем программы для ЭВМ: 1,043 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2023688938

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2023688938

Дата регистрации: 25.12.2023

Номер и дата поступления заявки:

2023685590 22.11.2023

Дата публикации и номер бюллетеня:

25.12.2023 Бюл. № 1

Автор(ы):

Измеров Михаил Александрович (RU),

Шалыгин Михаил Геннадьевич (RU)

Правообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ

БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ

УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО

ОБРАЗОВАНИЯ «Брянский государственный

технический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

«**Определение фрактальной размерности**»

Реферат:

Программа предназначена для оценки фрактальной размерности профиля поверхности методом нормированного размаха или методом измерения длины фрактальной кривой (с помощью отрезков или покрытий). В качестве исходной информации используется последовательность цифр, которые являются высотой исследуемого профиля. Исследуемая поверхность загружается в соответствующее поле программы и отображается внизу в графическом виде (в виде профиля, графика). Теоретически в качестве набора данных может быть представлена любая последовательность цифр. Программа позволяет провести фрактальный анализ рассматриваемой последовательности цифр и оценить фрактальную размерность с помощью выбранного метода. Для оценки правильности расчётов программа представляет пользователю промежуточные результаты анализа в виде столбцов дополнительной информации, где в зависимости от метода расчёта отображается, например, длина отрезка и их число для каждой итерации, с помощью которого удалось измерить длину фрактальной кривой, а также отображаются точки, по которым был построен график и оценена фрактальная размерность. Для сравнения фрактальная размерность определяется 4 методами - аналитическими (классическим методом Хёрста или его модификацией - со смещением), а также графическим (методом измерения длины фрактальной кривой с помощью отрезков или покрытий при уменьшении их длины с каждой итерацией). Программа написана в ограниченной версии среды программирования MS C# для учебных учреждений на языке программирования C++ под операционную систему семейства Windows x86/x64 версий XP, Vista, 7, 8 и 10. Тип ЭВМ: desktop x86/x64 computer. ОС: Windows XP/Vista/7/8/10, x86/64.

Язык программирования:

C++

Объем программы для ЭВМ:

1267 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2023688939

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2023688939

Дата регистрации: 25.12.2023

Номер и дата поступления заявки:

2023685592 22.11.2023

Дата публикации и номер бюллетеня:

25.12.2023 Бюл. № 1

Автор(ы):

Измеров Михаил Александрович (RU)

Правообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ

БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ

УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО

ОБРАЗОВАНИЯ «Брянский государственный

технический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Моделирование метода Ренорм-групп»

Реферат:

Программа предназначена для исследования влияния степени заполнения ячеек на плоскости на вероятность протекания условной среды через ячейки слева направо методом ренормирования. По заданному пользователем значению вероятности заполнения ячеек (пористости) формируется заполненный случайным образом массив из цифр 0 или 1, где 0 - пустая ячейка, которая пропускает через себя условную жидкость при протекании слева направо (протекание сверху вниз невозможно), а 1 - ячейка заполненная, через которую протекание невозможно. Метод Ренорм-групп позволяет установить возможность протекания жидкости слева направо. Программа позволяет в графическом виде представить процедуру перенормировки массива (метод ренорм-группы), моделирующего пористую среду, для решения задачи герметичности. Кроме того, представленная программа может с помощью перенормировки выполнить указанное пользователем число итераций по моделированию пористого слоя на квадратной решётке 512x512 каждый раз для нового набора ячеек для заданного процента заполнения для определения границы перехода от протекания к герметичности. Программа написана в ограниченной версии среды программирования MS C# для учебных учреждений на языке программирования C++ под операционную систему семейства Windows x86/x64 версий XP, Vista, 7, 8 и 10. Тип ЭВМ: desktop x86/x64 computer; ОС: Windows XP/Vista/7/8/10, x86/x64.

Язык программирования:

C++

Объем программы для ЭВМ:

731 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2022681720

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2022681720

Дата регистрации: 16.11.2022

Номер и дата поступления заявки:

2022680866 03.11.2022

Дата публикации и номер бюллетеня:

16.11.2022 Бюл. № 11

Автор(ы):

Измеров Михаил Александрович (RU),

Тихомиров Виктор Петрович (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Брянский государственный
технический университет» (ФГБОУ ВО
«БГТУ») (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Моделирование перколяции через объёмный пористый слой»

Реферат:

Программа предназначена для моделирования перколяции (протекания) через трёхмерный пористый слой, образованный пустыми или заполненными кубами на объёмной кубической решётке с размером сечения 50x50 кубов и протяжённостью до 100 кубов в направлении протекания. Размер кубов условный, представляется возможность оценить только пористость порового пространства. Заполненность объёмной решётки создаётся каждый раз случайным образом в соответствии с заданным пользователем значением пористости в процентах. Программа позволяет визуализировать объёмный пористый слой в 3D, повернуть 3D-сцену, приблизить или отдалить. В процессе оценки проницаемости пористого слоя программа симулирует инжектирование жидкости (отображается красным цветом) в поры (где возможно) на входе в пористый слой и оценивает возможность выхода жидкости с другой стороны по горизонтали (протекание в боковые стороны невозможно), а при возможности протекания рассчитывает минимальную и максимальную длину каналов с применением математической теории графов. При этом оценивается общее число каналов протекания с возможностью отображения каждого канала в 3D и число независимых каналов (не сообщающихся друг с другом). Кроме того, имеется возможность подбора длины заданного пористого слоя (в % пористости), при котором протекание невозможно. Тип ЭВМ: IBM PC x86/64; ОС: Windows XP/Vista/7/8/10 x86/64.

Язык программирования:

C++

Объём программы для ЭВМ:

908 КБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2022681677

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2022681677

Дата регистрации: 16.11.2022

Номер и дата поступления заявки:

2022680928 03.11.2022

Дата публикации и номер бюллетеня:

16.11.2022 Бюл. № 11

Автор(ы):

Измеров Михаил Александрович (RU),

Шалыгин Михаил Геннадьевич (RU)

Правообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Брянский государственный
технический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:

«Моделирование волнистой поверхности»

Реферат:

Программа предназначена для моделирования 3D волнистой поверхности (цилиндрической или сферической) на основе моделирования волн сплайнами во взаимно перпендикулярных направлениях по косинусоидальному закону по данным пользователя (число волн по взаимно-перпендикулярным направлениям, высота волн, шаг) с учётом случайных отклонений геометрических параметров в заданных пределах. Смоделированная волнистая поверхность отражается в 3D с помощью функций OpenGL, возможно вращение, приближение и отдаление 3D-сцены, масштабирование по высоте, отображение в виде сетчатой модели или в цвете. Кроме этого, программа позволяет провести расчёт упругих деформаций волнистой поверхности при её контактировании с гладким жёстким плоским штампом с оценкой величины сближения, контурной площади упругого контакта, нагрузочной характеристики и контактных давлений с отрисовкой расчётов и зависимостей на мультифункциональном графике на второй вкладке дизайна программы, при этом максимальное сближение вводит пользователь (деформация волн отображается на 3D-сцене). Тип ЭВМ: desktop x86/x64 computer. ОС: Windows XP/Vista/7/8/10.

Язык программирования:

C++

Объем программы для ЭВМ:

4,5 МБ