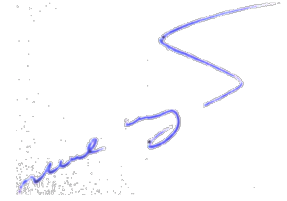


На правах рукописи



ШЕПТУНОВ Борис Васильевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТВЕРДОГО ТЕЛА С РЕГУЛЯРНЫМ РЕЛЬЕФОМ
И ВЯЗКОУПРУГОГО ОСНОВАНИЯ**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"

- Научный руководитель: Ноздрин Михаил Александрович
кандидат технических наук, доцент
- Официальные оппоненты: Годлевский Владимир Александрович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет», профессор кафедры «Экспериментальная и техническая физика»
- Корочкина Елена Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», профессор
кафедры «Системный анализ»
- Ведущая организация: Научно-исследовательский институт механики
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится « 29 » ноября 2013 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.03 ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, аудитория Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Ученый совет ИГЭУ. Тел. (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01.
E-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан « 29 » октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шульпин
Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Применение численно-аналитических методов для моделирования трибологических процессов становится всё более востребованным в связи с увеличивающейся трудоёмкостью проведения натуральных экспериментов и сложностью получения детальной информации о реальном состоянии контактирующих тел. Использование высокопроизводительных вычислительных систем принципиально изменило возможности анализа сложных процессов. Метод конечных элементов и метод граничных элементов являются основными при моделировании контактного взаимодействия различных поверхностей. Обычно выделяют два механизма, вносящих вклад в диссипацию энергии при трении: адгезионный и деформационный. Деформационная составляющая силы трения связана с потерями энергии при деформировании поверхностных слоев материала. Ее роль возрастает при трении влажных шероховатых поверхностей за счет уменьшения фактической площади контакта и наличия смазочной пленки, уменьшающей адгезию контактирующих поверхностей. При моделировании контактного взаимодействия вводной характеристикой является коэффициент трения взаимодействующих поверхностей, который зависит от ряда параметров: скорости проскальзывания, вязкоупругих характеристик материалов, рельефа поверхности и др. Определение коэффициента трения проводится рядом экспериментов и/или созданием конечно-элементной модели контактного взаимодействия для системы выступов с высокой дискретизацией контактной поверхности. Возникает необходимость построения пространственной функции деформационной составляющей коэффициента трения, зависящей от скорости проскальзывания и номинального контактного давления. Данная функция является характеристикой контактного взаимодействия заданной системы неровностей и вязкоупругого основания. Использование функции при решении более общих контактных задач численными методами позволяет существенно уменьшить степень дискретизации контактных поверхностей при конечно-элементном моделировании.

Однако существующие аналитические решения контактной задачи штампа с периодическим рельефом и основания, представленного вязкоупругим слоем, моделируемым телом Кельвина, получены для материала с одним временем релаксации. Увеличение числа значений времен релаксации приводит к увеличению количества дифференциальных уравнений исходной системы. В свою очередь использование модели материала со спектром времен релаксации повышает точность вычислений. Таким образом, возникает необходимость решения задачи для вязкоупругого слоя со спектром времен релаксации. Разработанные ранее численно-аналитические решения для вязкоупругого полупространства реализованы, в основном, для отдельного выступа рельефа твердого тела. Решение проводится на общей площади контакта. Таким образом, возникает необходимость получения решения на основе участка основания, геометрически эквивалентного периоду системы неровности, с учетом влияния окружающих выступов. Построение функции деформационной составляющей коэффициента

трения при помощи численно-аналитического решения для участка вязкоупругого основания, геометрически эквивалентного периоду неровности твердого тела с регулярным рельефом, позволяет существенно сократить объем вычислений.

Из сказанного следует, что разработка моделей и алгоритмов построения функции деформационной составляющей силы трения и дальнейшая программная реализация этих алгоритмов представляют собой актуальную научную задачу.

Цель работы

Создание математических моделей контактного взаимодействия, разработка алгоритмов программной реализации полученных моделей и оптимизация времени программного решения задачи.

Задачи исследования

1. Разработать математические модели контактного взаимодействия твердого тела с регулярным рельефом и вязкоупругого основания.
2. На основании полученных математических моделей разработать алгоритмы программных вычислений поставленной задачи контактного взаимодействия.
3. Реализовать программные алгоритмы вычислений контактного взаимодействия с учетом оптимизации численного решения.

Методы исследования

В работе использованы методы математической физики, трибологии, решения систем дифференциальных уравнений, вычислительной математики, теории алгоритмов.

Соответствие паспорту специальности

Материалы диссертации соответствуют научной специальности 05.03.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по формуле паспорта специальности. Содержанием исследования является «применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем» (формула специальности). Областью исследования являются: пункт 2 – Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей; пункт 5 – Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента; пункт 7 - Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурального эксперимента на основе его математической модели.

Научная новизна результатов работы

1. Получено аналитическое решение задачи полного контактного взаимодействия вязкоупругого основания, моделируемого телом Кельвина со спектром времен релаксации, и твердого тела с регулярным рельефом, контактная поверхность которого моделировалась пространственной синусоидальной функцией.
2. Разработаны численно-аналитические модели контактного взаимодей-

ствия твердого тела и вязкоупругого основания двух типов - с фиксированной толщиной слоя на жесткой основе и вязкоупругое полупространство. Решение реализовано на основе площадки основания, геометрически эквивалентной периоду неровности твердого тела, с учетом влияния окружающих выступов.

Достоверность

Достоверность применения представленных в диссертации моделей трения подтверждается сравнением полученных результатов расчетов с опубликованными результатами исследований других авторов, а также опытом практического использования разработок в научной области.

Обоснованность

Обоснованность научных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, адекватного решаемым задачам.

Практическая ценность работы

1. Реализованы, на основании предложенных контактных моделей, оригинальные алгоритмы численного решения поставленной задачи.

2. Разработанный программный комплекс позволяет проводить расчет пространственной функции деформационной составляющей коэффициента трения, являющейся контактной характеристикой взаимодействия регулярного рельефа и вязкоупругого основания.

Внедрение

Разработанный расчетный комплекс внедрен в качестве инструмента исследования контактных характеристик различных поверхностей в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Составные части представленного программного комплекса зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Положения, выносимые на защиту

1. Решение задачи контактного взаимодействия вязкоупругого основания, моделируемого телом Кельвина со спектром времен релаксации, и твердого тела с регулярным рельефом, контактная поверхность которого определяется пространственной синусоидальной функцией, при полном контакте поверхностей.

2. Численно-аналитическая модель для расчета деформационной составляющей силы трения при скольжении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому слою, который моделируется телом Кельвина со спектром времен релаксации.

3. Численно-аналитическая модель для расчета деформационной составляющей силы трения при скольжении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому полупространству, моделируемому ядром со спектром времен релаксации.

Личный вклад автора состоит в разработке математических моделей трения, самостоятельном проведении численных экспериментов, разработке алгоритмов и программ по расчету процессов контактного взаимодействия регулярного рельефа и вязкоупругого основания, а также в участии в обсуждениях на всех этапах работы, как при постановке задач, так и при реализации и интер-

претации полученных результатов. Общее направление исследований определялось научным руководителем диссертации.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на пяти научных конференциях: Международных НТК «Современное состояние и перспективы развития электротехнологий XV, XVI XVII Бенардосовские чтения» (Иваново, 2009, 2011, 2013), XVII международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2011), Всероссийской научно-практической конференции «Принципы и механизмы формирования инновационной системы Российской Федерации» (Дубна, 2012) и двух международных семинарах: II международном семинаре «Техника и технологии трибологических исследований» (Иваново, 2009) и III международном научном семинаре «Техника и технологии трибологических исследований» (Иваново, 2012).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников из 100 наименований. Текст диссертации изложен на 106 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка, 1 таблицу и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности исследования, поставлены цели и задачи, раскрыта научная новизна и практическая ценность исследования, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлен обзор работ по исследованию процессов трения. В работах Морозова А.В. и Маховской Ю.Ю. проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи модели вязкоупругого слоя с одним временем релаксации, с экспериментальными данными. Анализ подтвердил возможность использования подобных моделей при исследовании процессов трения. Рассмотрены работы расчетов контактного взаимодействия на основе модели основания, представленного вязкоупругим полупространством. В работах Александрова В.М., Горячевой И.Г., Коваленко Е.В., Торской В. Е. получены аналитические зависимости перемещений границы вязкоупругого полупространства при движении нагрузки с постоянной скоростью с учетом распределения тангенциальных сил.

Анализ опубликованных результатов исследований показал, что существующие решения задач контактного взаимодействия твердого тела с периодическим рельефом и основания, моделируемого телом Кельвина, не реализованы для материала со спектром времен релаксации. В опубликованных ранее работах не реализован также алгоритм определения контактного давления для общего случая контакта на основе площадки основания, геометрически эквива-

лентной периоду неровности периодического рельефа твердого тела с учетом взаимного влияния окружающих выступов.

Во второй главе поставлена и решена задача контактного взаимодействия вязкоупругого основания, моделируемого вязкоупругим слоем, и твердого тела с регулярным рельефом. Решение выполнено для модели поверхности рельефа представляемой пространственной синусоидальной функцией и для модели поверхности рельефа представляемой дискретным набором точек.

Схема контактного взаимодействия приведена на рис. 1.

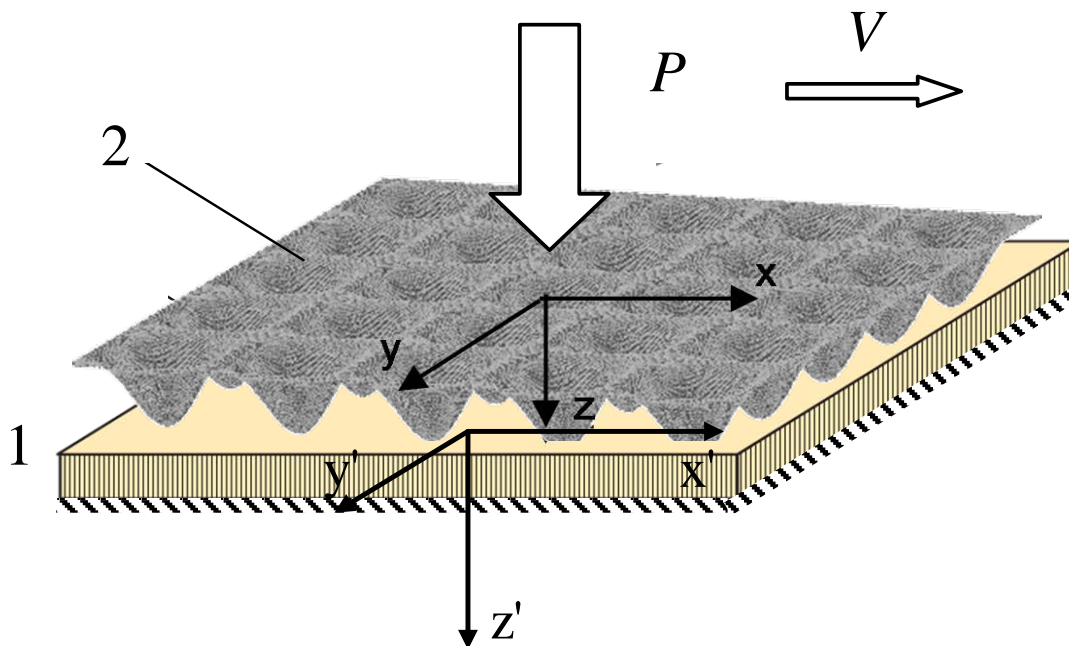


Рис. 1. Схема контактного взаимодействия: 1 – вязкоупругое основание; 2 – твердое тело с регулярным рельефом

Синусоидальная функция, определяющая регулярный рельеф штампа, имеет вид:

$$u(x, y) = D + \frac{L}{4} \left(\cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right) - 1 \right) \left(\cos\left(\frac{2\pi y}{l}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

где D – сближение (внедрение) вязкоупругого тела за счёт деформирования; L – высота функции поверхности; l – период функции основания.

В качестве расчетной модели рассматривается взаимодействие жесткого основания с вязкоупругим слоем толщиной h . Свойства слоя определяются моделью Кельвина, где деформации слоя винклеровского типа $\varepsilon = w/h$ связаны с давлением p соотношениями

$$\sigma_i + \frac{\lambda_i}{1 + \alpha_i} \frac{d\sigma_i}{dt} = \frac{E_{li}}{1 + \alpha_i} \left(\varepsilon + \lambda_i \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (2)$$

$p = \sum_{i=1}^n \sigma_i$ – контактное давление;

$\frac{\lambda_i}{1 + \alpha_i}$ – спектр времен релаксации ($\lambda_i = T_{ei}$ – спектр времен последействия).

Мгновенным и длительным модулями упругости являются:

$$E = \sum_{i=1}^n E_{1i}, E_* = \sum_{i=1}^n \frac{E_{1i}}{1 + \alpha_i}.$$

Решение системы уравнений полного контакта имеет вид

$$p(x, y) = \frac{H}{2} \left[\cos\left(\frac{2\pi y}{l}\right) + 1 \right] \left[\cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right) a_1 + \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right) a_2 + \frac{g}{2} \right] + (D - H)g \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{1}{2h} \sum_{i=1}^n \frac{E_{1i} [\alpha_i^2 - \alpha_i (2\pi\lambda_i f)^2]}{a_i^2 + (2\pi\lambda_i f)^2}, \quad a_2 = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n \frac{E_{1i} \alpha_i \pi \lambda_i f (\alpha_i + 1)}{a_i^2 + (2\pi\lambda_i f)^2}, \quad g = \sum_{i=1}^n \frac{E_{1i}}{h}.$$

В (3) принято $f = \frac{v}{l}$ – частота взаимодействия (v – скорость проскальзывания, l – период системы неровностей).

Минимальное внедрение, необходимое для поддержания полного контакта, рассчитывается по формуле

$$D_{\min} = \frac{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}{g} + \frac{H}{2}. \quad (4)$$

Деформационная составляющая силы трения определяется при помощи интегрирования по площади проекций контактного давления на оси x и z (рис. 2):

$$P_x = \int_{-l_2/2}^{l_2/2} \int_{-l_1/2}^{l_1/2} p(x, y) \sin \alpha dx dy,$$

$$P_z = \int_{-l_2/2}^{l_2/2} \int_{-l_1/2}^{l_1/2} p(x, y) \cos \alpha dx dy, \quad (5)$$

$$\mu = \frac{P_x}{P_z}$$

где α – угол между направлением контактного давления и осью z .

Нормальная составляющая P_z представляет нагрузку, приложенную к выступу. Необходимое внедрение системы неровностей D при заданной нагрузке P_z определяется итерационным путем. Тангенциальная проекция P_x направлена против движения выступа и представляет собой деформационную составляющую силы трения, которая связана с гистерезисными потерями в вязкоупругом материале.

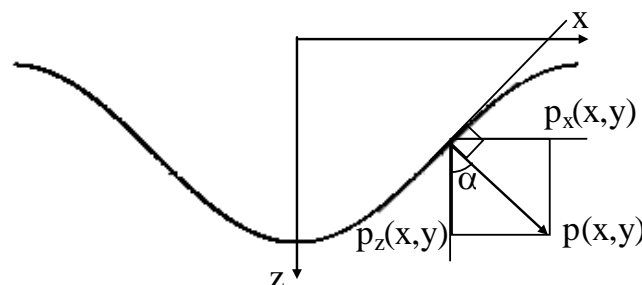


Рис. 2. Проекция контактного давления на оси координатной системы

Для моделирования контактного взаимодействия были использованы соотношения податливости материала и времени релаксации (рис. 3).

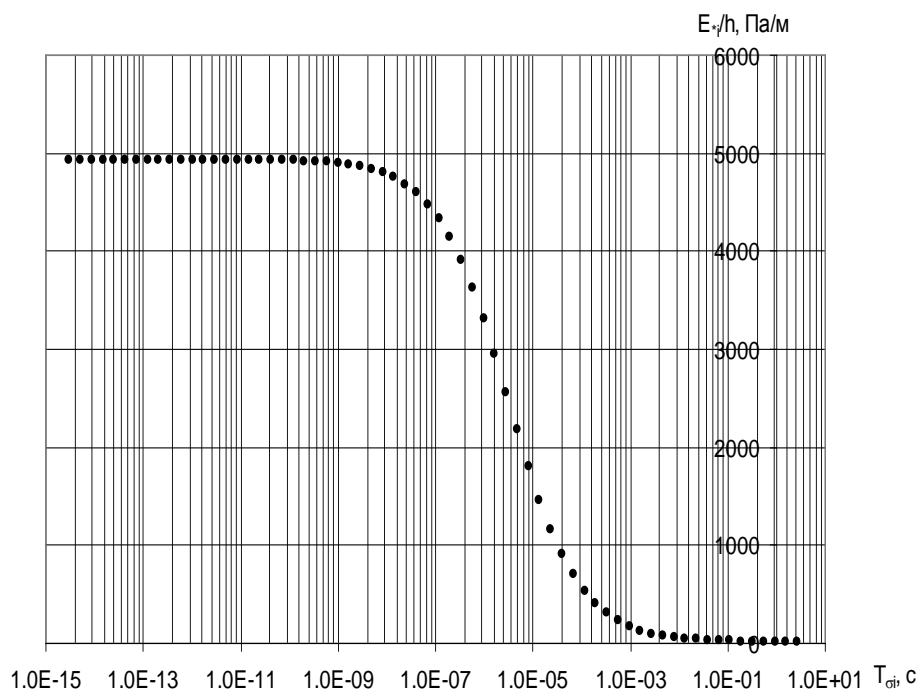


Рис. 3. Зависимость податливости материала от времени релаксации

Распределение контактного давления при минимальном внедрении, необходимом для поддержания полного контакта имеет вид, приведенный на рис. 4.

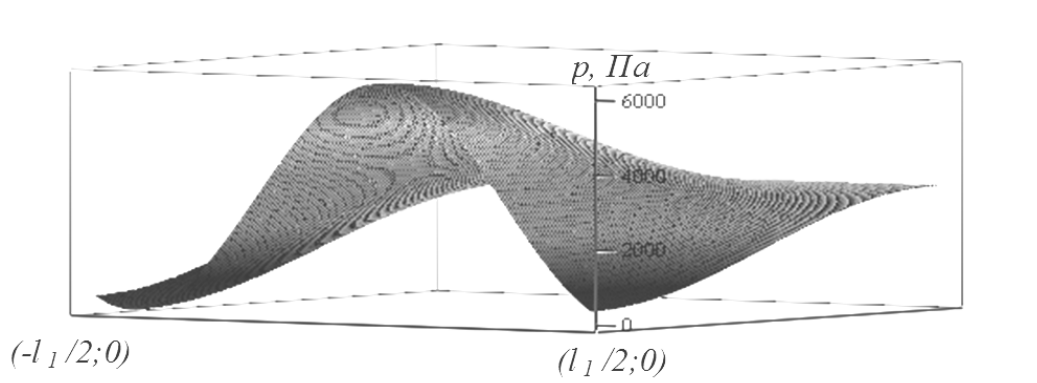


Рис. 4. Распределение контактного давления при минимальном внедрении, необходимом для поддержания полного контакта

Исследования показали, что значение коэффициента трения больше для системы неровностей с меньшим периодом.

Для второй постановки задачи разработанная модель трения применима как для дискретного, так и для полного контакта взаимодействующих поверхностей.

На основании значений ядра релаксации определяется ядро ползучести. Полученные выражения ядра ползучести используются для расчета деформационной составляющей силы трения при скольжении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому полупространству.

Для численно-аналитического решения задачи квадрат поверхности вязкоупругого основания, геометрически эквивалентный периоду системы неровностей регулярного рельефа штампа (рис. 5), разбит на m тонких полос, параллельных направлению скольжения. Для каждой полосы решается соответствующая плоская задача.

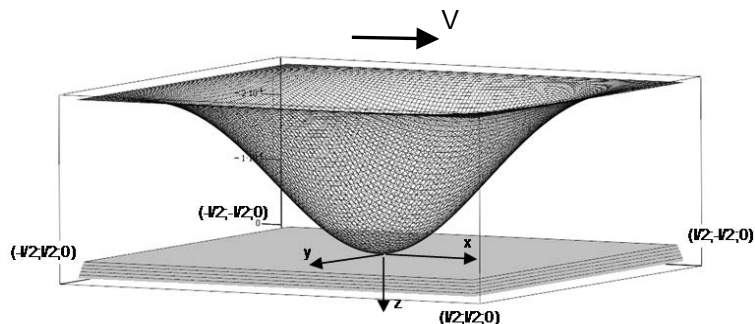


Рис. 5. Элемент основания, геометрически эквивалентный периоду системы неровностей

Получено решение для полного контакта поверхностей и алгоритм итерационного решения при дискретном контакте поверхностей. Деформационная составляющая коэффициента трения определяется аналогично решению при полном контакте поверхностей.

Для проведения сравнительного анализа с аналитическим решением рассмотрено распределение контактного давления в центральной полосе при фиксированной скорости проскальзывания и различной степени дискретизации вычислительной сетки. В качестве критерия сравнения решений принято отношение максимальных контактных давлений в центральной полосе, полученное при помощи численного и аналитического методов. Результаты исследования показали, что при описании периода системы неровностей массивом 20×20 точек относительная погрешность не превышает 5 %, а при сетке, имеющей большее 100×100 точек – отклонение от аналитического решения составляет менее 0,5 % (рис. 6).

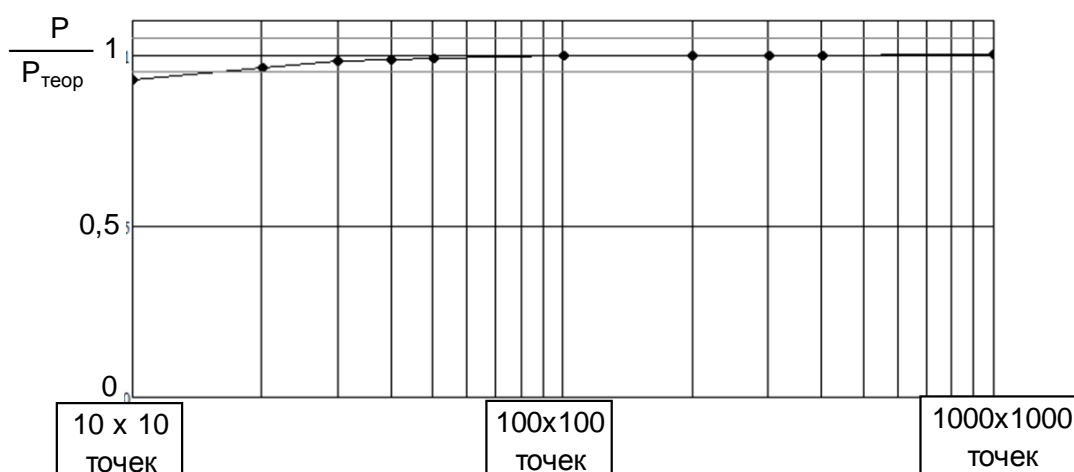


Рис. 6. Отношение максимальных контактных давлений в центральной полосе, полученное при помощи численного и аналитического методов

Исследованы два типа поверхностей: первая поверхность образована синусоидальной функцией, вторая – сферическими выступами. При одинаковой нагрузке для системы неровностей, образованной сферическими выступами, пло-

щадь пятна контакта меньше, а максимальное контактное давление выше, чем для системы, образованной синусоидальной функцией.

Как показали расчеты, для рассматриваемого вязкоупругого материала и заданного значения номинального давления, уменьшение в 2 раза расстояния между выступами приводит к росту коэффициента трения и смещению максимума исследуемой зависимости в сторону меньших значений скорости скольжения (рис. 7).

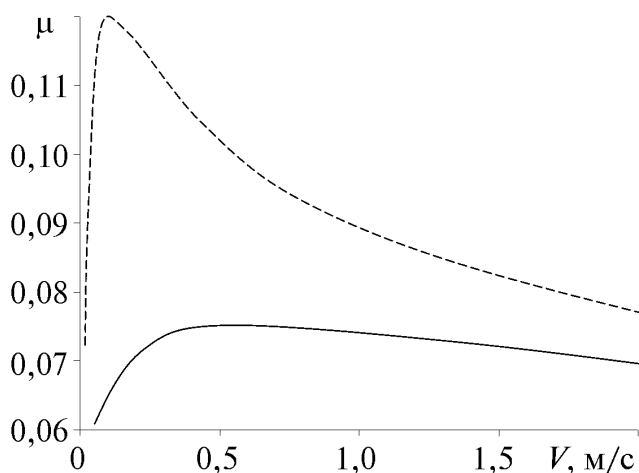


Рис. 7. Зависимость деформационной составляющей коэффициента трения от скорости скольжения для двух поверхностей с одинаковой высотой выступов: сплошная линия – шаг 0,001 м; пунктирная линия – шаг 0,0005 м

В третьей главе диссертации построена численно-аналитическая модель для расчета деформационной составляющей силы трения при скольжении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому полупространству. Регулярный рельеф штампа задается набором поверхностных точек.

Отличительная особенность постановки задачи – вязкоупругое основание представлено изотропным полупространством. Схема контактного взаимодействия показана на рис. 8.

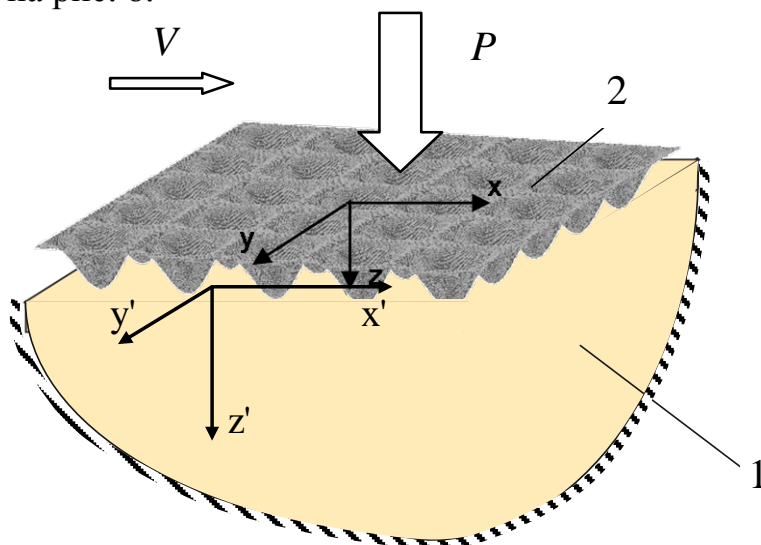


Рис. 8. Схема контактного взаимодействия: 1 – вязкоупругое полупространство; 2 – твердое тело с регулярным рельефом

Определяющие соотношения полупространства ($|x| < \infty$, $|y| < \infty$, $|z| > 0$) имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_x + \beta \dot{\sigma}_x &= \frac{2G}{1-2\mu} \left[(1-\mu)(\varepsilon_x + \alpha \dot{\varepsilon}_x) + \mu(\varepsilon_y + \alpha \dot{\varepsilon}_y) + \mu(\varepsilon_z + \alpha \dot{\varepsilon}_z) \right], \\ \sigma_y + \beta \dot{\sigma}_y &= \frac{2G}{1-2\mu} \left[(1-\mu)(\varepsilon_y + \alpha \dot{\varepsilon}_y) + \mu(\varepsilon_z + \alpha \dot{\varepsilon}_z) + \mu(\varepsilon_x + \alpha \dot{\varepsilon}_x) \right], \\ \sigma_z + \beta \dot{\sigma}_z &= \frac{2G}{1-2\mu} \left[(1-\mu)(\varepsilon_z + \alpha \dot{\varepsilon}_z) + \mu(\varepsilon_x + \alpha \dot{\varepsilon}_x) + \mu(\varepsilon_y + \alpha \dot{\varepsilon}_y) \right], \\ \tau_{xy} + \beta \dot{\tau}_{xy} &= G(\gamma_{xy} + \alpha \dot{\gamma}_{xy}), \\ \tau_{xz} + \beta \dot{\tau}_{xz} &= G(\gamma_{xz} + \alpha \dot{\gamma}_{xz}), \\ \tau_{yz} + \beta \dot{\tau}_{yz} &= G(\gamma_{yz} + \alpha \dot{\gamma}_{yz}),\end{aligned}\tag{11}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненты тензора напряжений; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – компоненты тензора деформаций; G и μ – модуль сдвига и коэффициент Пуассона соответственно; α и β – параметры, характеризующие вязкие свойства среды ($\alpha > \beta$).

Получена зависимость перемещения на участке основания, геометрически эквивалентного периоду рельефа твердого тела с учетом влияния окружающих выступов. Влияние удаленных выступов на перемещение вязкоупругого слоя в рассматриваемом участке представлено в виде воздействия сосредоточенных усилий (рис. 9).

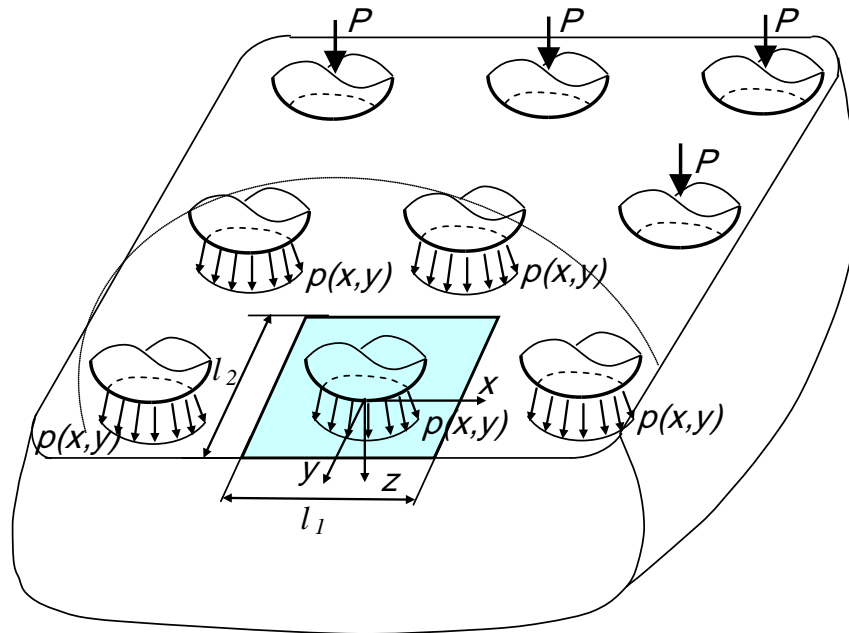


Рис. 9. Влияние окружающих выступов системы неровностей на перемещение точки вязкоупругого полупространства

Поверхность полупространства разбита на прямоугольники, геометрически эквивалентные периодам системы неровностей. Для определения напряженно-деформированного состояния всего полупространства, находящегося в зоне контакта, при размерах выступов много меньших размеров контактной зоны достаточно провести расчет в одном из прямоугольников с учетом взаимного

влияния окружающих выступов регулярного рельефа. Область прямоугольника делится на прямоугольные зоны, давление в каждой из которых постоянно. Число прямоугольников вдоль осей x и y соответственно N_1 и N_2 . Таким образом, для каждого элемента необходимо найти матрицу коэффициентов размерностью $N_1 \times N_2$. Ранг общей матрицы равен $(N_1 \times N_2)^2$.

Для расчета контактного давления используется матрица w – связующая между давлением и перемещением границы полупространства. При наполнении матрицы w область окружающих выступов разделена на две области эллипсоидной формы (рис. 10).

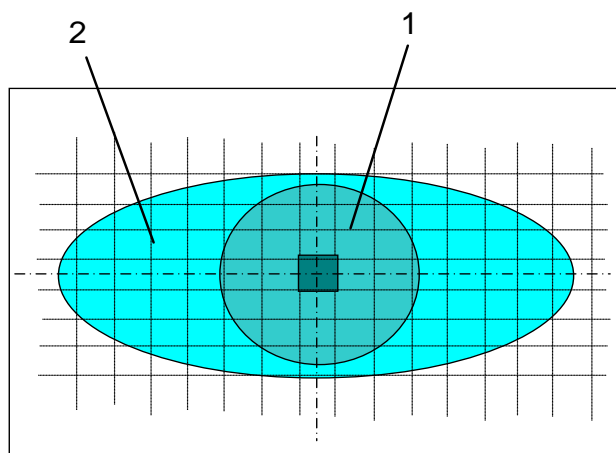


Рис. 10. Области влияния геометрии формы неровностей для формирования матрицы коэффициентов: 1 – область, выступы которой моделируются дискретным набором точек; 2 – область, в которой влияние неровности моделируется сосредоточенным в центре выступа усилием

Матрица w вычисляется однократно для определенного сочетания периода и скорости проскальзывания (Δ и V соответственно). Решение полученной системы линейных уравнений в постановке задачи при полном контакте является конечным. При частичном контакте появляются отрицательные давления в элементах-прямоугольниках. Для определения контура пятна контакта итерационно исключаются элементы, соответствующие отрицательным зонам давления. Ранг текущей матрицы соответствует количеству квадратов, находящихся в зоне контакта.

Получены соотношения для определения эффективной глубины вязкоупругого слоя на основе трехмерной модели основания. Величина глубины слоя может быть использована при расчете контактного взаимодействия по упрощенной модели основания, описанной в главе 2. Применение упрощенных моделей основания позволяет существенно сократить время вычисления.

Сравнительный анализ результатов трехмерной модели основания и обобщенной модели Кельвина при эффективной толщине вязкоупругого слоя показал достаточную сходимость результатов для двух моделей оснований.

На основе анализа результатов установлено, что упрощенная модель основания (модель вязкоупругого слоя на жестком основании) может использоваться для расчетов коэффициента трения при решении прикладных задач трения, для решения более емких задач трения необходимо использовать модель трехмерного основания.

В четвертой главе диссертации представлены результаты разработки программного комплекса для определения характеристик взаимодействия контактной пары – системы неровностей и вязкоупругого основания. Основное назначение разрабатываемого комплекса – расчет пространственной функции коэффициента трения $\mu(V,p)$ от входных параметров: номинальное давление на контактную поверхность, скорость проскальзывания. Внешний вид функции $\mu(p,V)$, полученной при помощи программного комплекса, показан на рис. 11.

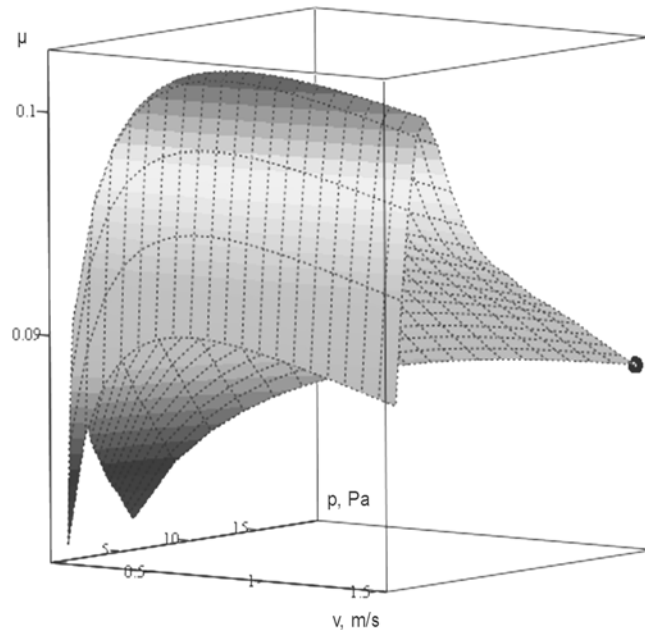


Рис. 11. Пространственная функция коэффициента трения $\mu(V,p)$

Структурная схема расчетного блока показана на рис. 12.

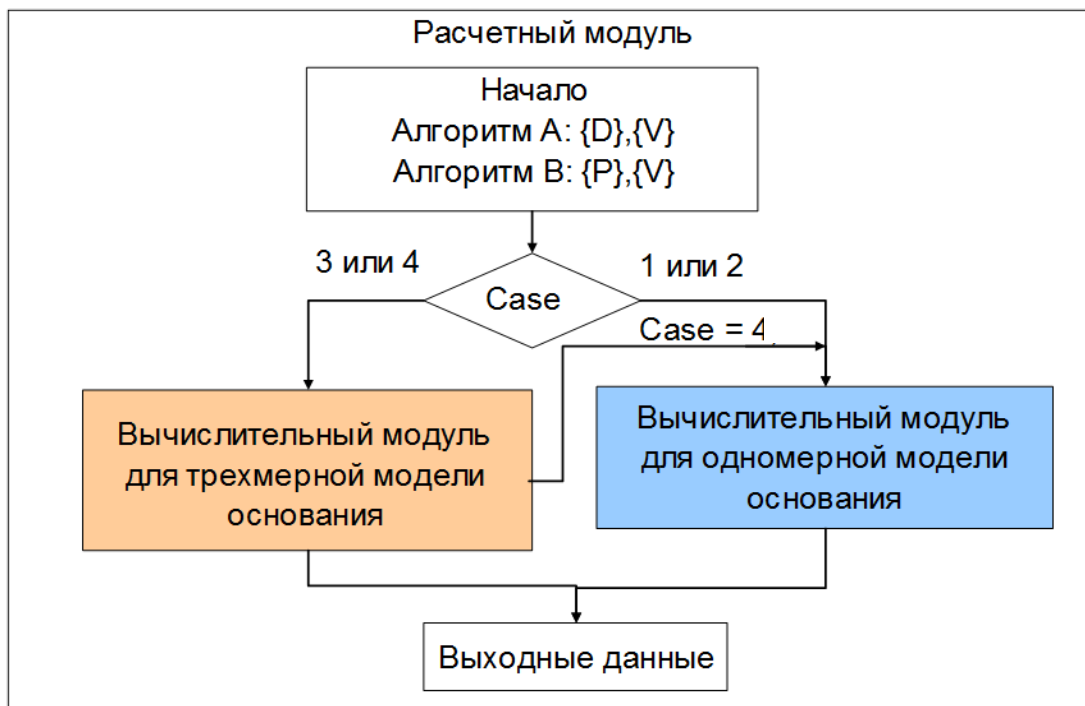


Рис. 12. Структурная схема основного расчетного блока

Расчетный блок состоит из двух основных процедур. Процедура расчета по трехмерной модели основания предназначена для расчета распределения контактного давления, вычисления деформационной составляющей коэффициента трения и определения эффективной глубины вязкоупругого основания для модели вязкоупругого слоя.

Данный модуль может быть использован изолированно или совместно с процедурой, работающей по алгоритму модели вязкоупругого слоя. Процедура расчета по модели основания, выраженного вязкоупругим слоем, предназначена для расчета распределения контактного давления и определения деформационной составляющей коэффициента трения.

При полном контакте поверхностей, условия которого определяются минимальной величиной внедрения штампа, и системы неровностей штампа, описанной синусоидальной функцией, используется аналитическое решение, полученное во второй главе диссертации. Модуль может применяться как совместно с процедурой для трехмерной модели основания, так и изолированно (при заданной толщине вязкоупругого слоя).

В качестве примера применения разработанного программного комплекса показан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния колесной шины при контактом взаимодействии с твердым покрытием (рис. 13).

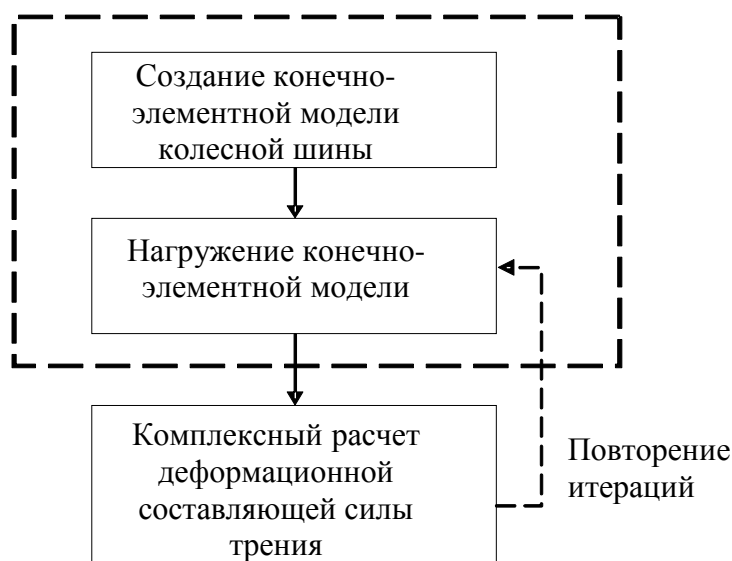


Рис. 13. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния колесной шины при контактом взаимодействии с твердым покрытием

При определении деформационной составляющей силы трения на колесную шину происходит комплексная обработка контактного давления в области пятна контакта. Для решения задачи предварительно, при помощи разработанного программного продукта, формируется пространственная функция зависимости деформационной составляющей коэффициента трения от скорости проскальзывания и номинального давления шины на покрытие. Функция $\mu(V,p)$ определяется для ряда синусоидальных функций, моделирующих покрытие, соответственно реализуется принцип суперпозиции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана аналитическая модель контактного давления и деформационной составляющей коэффициента трения при полном контакте периодической системы неровностей, образованной синусоидальной функцией, и вязкоупругого основания. Основание моделируется телом Кельвина со спектром времен релаксации.

2. Для аналитической модели контактного взаимодействия твердого тела и вязкоупругого основания определен коэффициент минимального внедрения, соответствующего полному контакту поверхностей.

3. Разработана численно-аналитическая модель определения контактных параметров для общего случая контакта, работоспособность которой подтверждается результатами, полученными с использованием аналитической модели.

4. Решена задача контакта штампа с регулярным рельефом и вязкоупругого полупространства. Вязкоупругие свойства основания моделируются ядром со спектром времен релаксации. Решение реализовано на основе площадки контактной поверхности, геометрически эквивалентной периоду системы неровностей, образующей регулярный рельеф штампа. Разрешающая матрица предварительно вычисляется для определенного сочетания периода и скорости проскальзывания и затем многократно используется при итерационном решении задачи.

5. Разработан алгоритм определения эффективной глубины полупространства для решения задачи контактного взаимодействия при помощи модели вязкоупругого слоя.

6. Реализован, на основании разработанных моделей трения, программный комплекс, предназначенный для расчета пространственной функции коэффициента трения от входных параметров – скорости проскальзывания и номинального давления на контактную поверхность.

Основные публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Ноздрин, М.А.** Расчет деформационной составляющей силы трения при скольжении тела по вязкоупругому основанию / М.А. Ноздрин, Ю.Ю. Маховская, Б.В.Шептунов // Вестн. ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 48–50.

2. **Шептунов, Б.В.** Контактная задача о движении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому основанию / Б.В. Шептунов, И.Г. Горячева, М.А. Ноздрин // Трение и износ. – 2013. – Т. 34. – № 2. – С. 109–119.

Свидетельства об официальной регистрации программ на ЭВМ

1. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ. Комплекс расчета деформационной составляющей коэффициента трения при скольжении шероховатого тела с регулярным рельефом по вязкоупругому основанию, моделируемому телом Кельвина со спектром времен релаксаций / Б.В. Шептунов, М.А. Ноздрин. – № 2013616513; 10.07.2013.

2. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Комплекс расчета деформационной составляющей коэффициента трения при скольжении шероховатого тела с регулярным рельефом по вязкоупругому полупространству, моделируемому ядром со спектром времен релаксаций / Б.В. Шептунов, М.А. Ноздрин. – № 2013616614; 12.07.2013.

Публикации в других изданиях

1. **Кашфразиев, Ю.А.** Разработка методики численно-аналитического моделирования контактного взаимодействия авиационной шины с влажным аэродромным покрытием / Ю.А. Кашфразиев, М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов, В.А. Шейкина // Принципы и механизмы формирования инновационной системы Российской Федерации: материалы всерос. науч.-практ. конф. М.: ИЭ РАН, 2012. – С. 154–160.

2. **Ноздрин, М.А.** Деформации при скольжении тела по вязкоупругому основанию в условиях полного контакта / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов, Ю.Ю. Маховская // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XV Бенардосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. / Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2009. – Т. 2. – С. 132.

3. **Ноздрин, М.А.** Деформационная составляющая силы трения / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Техника и технологии трибологических исследований: II междунар. семинар, Иваново, 22–23 октября 2009 г. / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет». – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2012. – С. 929.

4. **Ноздрин, М.А.** Задача о движении шероховатого тела по вязкоупругому основанию / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVI Бенардосовские чтения): сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / Федеральное агентство по образованию, ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»; Академия электротехн. наук Российской Федерации. – Иваново, 2011. Т. 3. – С. 9–11.

5. **Горячева, И.Г.** Контактная задача для периодической системы неровностей и вязкоупругого основания / И.Г. Горячева, М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // XVII междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС 2011), Алушта, 25–31 мая 2011 г. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. – С. 317–318.

6. **Горячева, И.Г.** Моделирование контакта твёрдого тела с регулярным рельефом и вязкоупругого основания / И.Г. Горячева, М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Техника и технологии трибологических исследований: III междунар. науч. семинар, Иваново, 18–19 октября 2012 г. / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет». – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2012. – С. 17–18.

7. **Ноздрин, М.А.** Задача о скольжении твердого тела с регулярным рельефом по вязкоупругому полупространству / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»; Академия электротехн. наук Российской Федерации. – Иваново, 2013. – Т. 3. – С. 14–17.

8. **Ноздрин, М.А.** Скольжение тела в условиях полного контакта с основанием / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Энергия 2009: материалы 4-й регион.

науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2009. – Т. 2. – С. 84–85.

9. **Ноздрин, М.А.** Контактная задача для шероховатого тела и вязкоупругого основания / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Энергия 2011: материалы 6-й регион. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – Т. 7. – С. 9–10.

10. **Ноздрин, М.А.** Деформационная составляющая силы трения / М.А. Ноздрин, Б.В. Шептунов // Физика, химия и механика трибосистем: межвуз. сб. науч. тр. / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный университет». – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2009. – Вып. 8. – С. 21–24.

11. **Кашфразиев, Ю.А.** Влияние покрытия на износ шин / Ю.А. Кашфразиев, Б.В. Шептунов, Ю.М. Шептунова // Аэропорты. – 2013. – № 2[59]. – С. 14–17.

ШЕПТУНОВ БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА
С РЕГУЛЯРНЫМ РЕЛЬЕФОМ И ВЯЗКОУПРУГОГО ОСНОВАНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1, 16. Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

