

**Отзыв**  
официального оппонента на диссертационную работу  
Ежова Алексея Дмитриевича  
на тему «Комплексные методы решения задач контактного теплообмена  
для энергоэффективного управления тепловыми режимами»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по  
специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

**Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа посвящена разработке научно-методического и инструментального обеспечения для многопараметрического моделирования, анализа и оптимизации процесса контактного теплообмена в ответственных узлах конструкций перспективных энергоустановок различных отраслей промышленности. Обеспечение имеет физическое и математическое обоснование в виде методологии расчёта контактных термических сопротивлений, построенной на базе экспериментально-теоретического исследования спектра физико-химических процессов с учётом реальной микрогеометрии контактирующих поверхностей, рода материалов, анизотропии их свойств, характеристик покрытий и материалов, заполняющих межконтактное пространство, всех видов теплообмена в зоне контакта, а также с учетом возможного циклического нагружения в условиях эксплуатации изделий. Разработанная и апробированная методология позволит на раннем этапе проектирования изделий обеспечить требуемые тепловые режимы теплонапряжённых элементов конструкции агрегатов и машин, а, следовательно, надёжность и долговечность их эксплуатации.

**Научная новизна**

Научная новизна полученных автором результатов неоспорима и состоит в следующем:

1. Впервые разработана методика создания компьютерных моделей микрорельефа поверхности, объединяющая два взаимодополняющих алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. Данное решение преодолевает принципиальное ограничение традиционных подходов, описанных в работах классиков контактной механики, которые либо не учитывают особенности реального микрорельефа, либо требуют для моделирования слишком больших вычислительных ресурсов. Предложенная методика обеспечивает оптимальный баланс между точностью математического описания и вычислительной сложностью, что позволяет достаточно комфортно применять разработанный подход к тепловому проектированию.

2. Впервые создана комплексная теоретическая модель, интегрирующая механику контакта шероховатых поверхностей с теплообменом в контактной зоне при учете лучистого переноса и влияния анизотропии свойств материалов на теплообмен. В отличие от классических, которые дают значительную погрешность из-за упрощения микрогеометрии и пренебрежения нелинейными эффектами, предложенная модель учитывает реальную топографию поверхностей, анизотропию свойств контактирующих материалов и механизмы стягивания линий теплового потока к фактическим пятнам контакта.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

21.04.2026.

3. Экспериментально и численно обоснована значимая роль лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях. Показано, что игнорирование вклада излучения в теплообмен приводит к ошибке до 46%, что особенно критично для расчетов в безвоздушной среде.

4. Впервые проведено исследование совместного влияния анизотропии свойств композитов и микрогеометрии контакта на величину контактного термического сопротивления. Разработана методика параметризации углов ориентации волокон при моделировании композитных материалов, что позволило выявить оптимальные углы армирования углеродных композитов для минимизации термического сопротивления.

5. Впервые разработана и верифицирована нейросетевая модель для быстрого прогнозирования контактного термического сопротивления на основе виртуальных экспериментов, выполненных методом конечных элементов.

6. На основе комплексного подхода к моделированию контактного термического сопротивления впервые разработаны методики оптимизации конструкции замкового соединения керамических лопаток с металлическим диском газотурбинного двигателя и камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги с композитной оболочкой.

#### **Значимость результатов диссертационной работы для науки и практики**

- Расширена теория контактного теплообмена за счёт включения нелинейных, мультифизических и анизотропных эффектов;

- Разработаны новые математические и алгоритмические методы цифрового моделирования микрогеометрии поверхностей;

- Разработана методика определения и прогнозирования тепловой проводимости и возникающих напряжений при контактном взаимодействии в теплонагруженных узлах и агрегатах.

- Установлена роль лучистого теплообмена в контактных соединениях космических аппаратов.

- Разработанные методы позволяют повысить точность прогнозирования тепловых режимов и оптимизированы конструкции элементов авиационных и ракетных двигателей, ядерных реакторов, систем охлаждения микроэлектроники и теплообменного оборудования различного назначения за счет корректного учета контактного термического сопротивления.

#### **Достоверность**

Достоверность основных положений и выводов, сформулированных в диссертации в значительной степени обеспечиваются применением сертифицированного и тарированного оборудования и средств измерения с соответствующим уровнем точности, оценкой неопределенности, что позволяет сравнивать полученные данные с данными других авторов, а также использованием современных программных комплексов и компьютерных технологий и техники для обработки и прогнозирования данных.

По материалам диссертации опубликовано 75 печатных работ, из них: 25 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК, и приравненных к ним по научной специальности диссертации; 52 тезиса

докладов на научных конференциях; 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Соответствие паспорту специальности 1.3.14**

Исследование контактного термического сопротивления напрямую соответствует паспорту научной специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Данная тематика охватывает фундаментальные вопросы теплообмена, что подтверждается пунктами паспорта о механизмах переноса теплоты и методах исследования теплофизических процессов:

п.1. Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния.;

п.2. Аналитические и численные исследования теплофизических свойств веществ в различных агрегатных состояниях

п.8. Разработка методов исследования и расчета радиационного теплообмена в прозрачных и поглощающих средах

п.9. Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты.

### **Структура и краткая характеристика диссертации**

Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, списка обозначений, библиографии и 2 приложений. Общий объем диссертации 491 страница. Библиография включает 456 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель, раскрыта научная новизна, продемонстрирована практическая значимость полученных результатов, а также сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор фундаментальных работ, в которых заложены основы для прогнозирования теплопереноса в контактных зонах. Полуэмпирические модели остаются отправной точкой при анализе стационарных режимов. Однако современные требования к системам терморегулирования в авиакосмической отрасли, микроэлектронике и других отраслях выявили ряд ограничений в использовании классических подходов.

Вторая глава диссертации представляет собой систематизированный обзор существующих подходов к расчёту контактной термической проводимости и контактного термического сопротивления, подчёркивая сложный, междисциплинарный характер проблемы, сочетающий в себе геометрические, механические и тепловые аспекты. Анализ показывает, что полная термическая проводимость контакта складывается из трёх основных составляющих: теплопроводности через фактические площади контакта микронеровностей, теплопроводности межконтактной среды (например, воздуха или смазки) и радиационного теплообмена. Однако получение точного аналитического выражения для контактного термического сопротивления остаётся затруднительным по ряду причин: во-первых, из-за высокой сложности адекватного описания микрорельефа реальных поверхностей, который изменяется от макронеровностей до наноуровня и зависит от технологии изготовления и свойств материалов; во-вторых, из-за трудностей в моделировании контактной деформации, которая может быть упругой, пластической, упругопластической, а

также зависеть от температуры и времени (ползучесть); в-третьих, из-за тесного термомеханического взаимодействия. Ошибки в оценке реальной площади контакта напрямую приводят к существенным погрешностям в расчёте теплового сопротивления.

Третья глава посвящена разработке геометрической модели микрорельефа контактирующих поверхностей, что является ключевым этапом при решении задачи контактного теплообмена. Установлено, что традиционные подходы к моделированию шероховатости - будь то статистические модели или упрощённые геометрические аппроксимации в виде сфер или конусов - не обеспечивают достаточной точности при воспроизведении реальной площади контакта и, как следствие, не позволяют достоверно оценить контактное термическое сопротивление. На основе полученных профилограмм разработан оригинальный алгоритм формирования макета цифрового двойника шероховатой поверхности. Предложены два метода обработки исходных данных: метод вершин и метод локальных экстремумов. Оба подхода позволяют существенно снизить вычислительную сложность задачи за счёт фильтрации избыточной информации при сохранении ключевых характеристик микрорельефа - распределения высот, среднего шага неровностей и топологической структуры, определяющей фактическую площадь контакта. Предложенные методы реализованы в программное обеспечение.

В четвертой главе диссертации выполнен комплексный анализ контактного взаимодействия шероховатых поверхностей как с позиций механики деформируемого твердого тела, так и особенностей численного моделирования. Проведенные исследования позволяют выполнять оценки величины контактного термического сопротивления и точности расчётов теплообмена в сопряжениях твердых тел. Разработана и обоснована модель эквивалентной микрогеометрии, позволяющая заменить контакт двух фрактальных поверхностей на взаимодействие гладкой плоскости с одной эквивалентной шероховатой. Применение структурной функции для определения эквивалентных фрактальных параметров обеспечивает высокую физическую достоверность модели, учитывающую статистические особенности микрорельефа.

В пятой главе диссертации решена задача контактного теплообмена сопрягаемых шероховатых поверхностей с учётом многоуровневой геометрии контакта и физических механизмов переноса теплоты. Определена толщина зоны возмущения температурного поля вблизи средней плоскости контакта и соответствующее время релаксации, позволяющее применять классическую теорию теплопроводности в нестационарных режимах, если характерное время процесса превышает время релаксации. Разработана и реализована в виде программы для ЭВМ тепловая фрактальная модель контактного теплообмена, в которой учтены упругие, упругопластические и пластические деформации микроконтактов. На её основе получены аналитические выражения для контактной термической проводимости одиночного микроконтакта и суммарной проводимости всей контактной зоны.

В шестой главе диссертации на основе вычислительных экспериментов проведено комплексное исследование влияния ключевых факторов на контактное термическое сопротивление, охватывающее физико-механические свойства материалов конструкций, нормальное контактное давление, микрогеометрию

поверхностей, температуру в зоне контакта, межфазную среду, наличие покрытий, циклическое нагружение, а также анизотропию свойств композитных материалов. Продемонстрирована критическая роль лучистого теплообмена в условиях высоких температур и малых контактных давлений. Показано, что игнорирование механизма лучистого переноса тепла при наличии, например, вакуума в зазоре приводит к ошибке до 46 %.

В седьмой главе диссертации представлены разработанные автором методы и средства экспериментального определения контактных термических сопротивлений. Представлено описание проведённого экспериментального исследования, которое позволило разработать и обосновать комплексный подход к снижению неопределённости в расчётах контактной тепловой проводимости.

В восьмой главе диссертации представлено логическое развитие выполненных исследований, в которой рассмотрено применение искусственных нейронных сетей для решения задач контактного теплообмена и обратных задач теплопроводности. Показано, что использование нейросетевых моделей позволяет эффективно восстанавливать граничные тепловые потоки по дискретным измерениям температуры даже при наличии шума в данных. Среднеквадратичная ошибка прогнозирования составила около 2,5 %.

В девятой главе диссертации на основе разработанных подходов и методов выполнено комплексное исследование теплонапряжённого состояния конструкций жидкостных ракетных двигателей малой тяги, а также замковых соединений керамических лопаток газотурбинных двигателей с учётом контактного теплообмена. Предложены и обоснованы конструкции, позволяющие снизить термические сопротивления контакта и тем самым термонапряжения в местах контактов теплонапряжённых деталей.

В конце диссертации представлены заключение, приложения и акты внедрения результатов работы.

### **Замечания**

1. Диссертация значительно перегружена обзорным материалом. Обзору посвящены главы 1 и 2, значительные части обзоров имеются и в последующих главах.

2. Использование термина цифровой двойник не соответствует ГОСТ ГОСТР 57700.37- 2021. Более уместны выражения компьютерные модели, или более быденное словосочетание – цифровая тень.

3. Насколько новые методы вершин и локальных экстремумов снижают вычислительные сложности? В чем это выражается? На сколько процентов это в итоге влияет на оценку термического сопротивления?

4. Автор диссертации предложен комплекс новых методов и подходов оценки шероховатости, термического сопротивления, однако часто не показаны рекомендации по выбору того или иного метода для конкретных задач и нет сравнительных анализов оценки параметров по предложенным методам и описанным в обзорах многочисленных методах других авторов. В чем выигрыш (требуется четкое и визуальное (графическое) обоснование)? Например, в главе 5 есть верификация, но нет сравнения с методиками других авторов, так много описанных в главе 2.

5. В главе 6, наоборот – имеются сравнения результатов расчета с других авторов, но нет сравнения с экспериментом. Насколько и кто более близок к реальным данным? См. рис.6.4-6.6. Таблица 6.1 – важный результат, но для какой модели и нет описания и ссылки на таблицу по тексту. Рис.6.2-6.4 – оценка по какой модели шероховатости? Рис.6.15 – сравнение моделей с и без учета переизлучения, но как понять, что лучше, где линия эксперимента, истинного значения?

6. Глава 7 с экспериментом незаслуженно находится в конце диссертации, а ведь именно эти результаты должны быть основой для верификации моделей и валидации результатов расчетов.

7. Погрешность экспериментального исследования контактного термического сопротивления в 14,5% - это значительная величина. Что вносит наибольший вклад в такое значение и как его далее уменьшать?

8. Не обоснован выбор конкретного нейросетевого метода среди множества аналогов. Нет сравнительного анализа, показателей достаточности выборки обучения и тестирования.

9. Дежурное замечание, что при распечатке появились некорректные переносы заголовков разделов и рисунков, пропажа ссылок на источники.

Указанные недостатки носят рекомендательный характер и не затрагивают основных положений, выносимых на защиту.

### **Заключение**

Основные положения диссертационной работы полно представлены в научных публикациях, в том числе в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертационной работы.

Диссертационная работа Ежова Алексея Дмитриевича на тему «Комплексные методы решения задач контактного теплообмена для энергоэффективного управления тепловыми режимами» соответствуют требованиям пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в ред. От 01.10.2018), предъявляемым к диссертациям на соискания ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертационная работа имеет вид законченной научной работы, направленной на решение актуальной задачи по научно-методическому и инструментальному обеспечению для многопараметрического моделирования, анализа и оптимизации процесса контактного теплообмена в ответственных узлах конструкций перспективных энергоустановок различных отраслей промышленности. Предложенная Ежовым А.Д. методология позволяет на раннем этапе проектирования изделий обеспечить требуемые тепловые режимы теплонапряжённых элементов конструкции агрегатов и машин, а, следовательно, надёжность и долговечность их эксплуатации. Результаты работы Ежова А.Д. имеют значительную практическую значимость для авиационно-космической техники, ядерной и теплоэлектроэнергетики, силовой и микропроцессорной электроники.

Указанные в отзыве замечания не умаляют научной и практической значимости работы, которая, безусловно, заслуживает положительной оценки, а ее автор, Ежов Алексей Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 - «Теплофизика и теоретическая теплофизика».

Официальный оппонент, д.т.н, профессор,  
профессор кафедры теплотехники и  
энергетического машиностроения ФГБОУ ВО  
«Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н.Туполева -  
КАИ»  
420111, г. Казань ул. К. Маркса, 10  
Тел: +7 9196441609,  
e-mail: popov-igor-alex@yandex.ru



Попов  
Игорь  
Александрович

Дата 18.03.2016

Подпись Попов И.А.  
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля



Создан с помощью  
21.04.26 [Signature]