

ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Ежова Алексея Дмитриевича
«Комплексные методы решения задач контактного теплообмена для
энергоэффективного управления тепловыми режимами»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»**

Проблема контактного термического сопротивления (КТС) является одной из ключевых в теплофизике, поскольку от точности его учета зависят надежность и ресурс теплонагруженных узлов авиационно-космической, энергетической и транспортной техники. Существующие аналитические и полуэмпирические модели дают разброс результатов от 50 % до 300 %, что делает невозможным достоверное прогнозирование тепловых режимов на этапе проектирования. Особенно остро эта проблема стоит при переходе к высокотемпературным эксплуатационным режимам, использованию композиционных материалов с анизотропией свойств и работе в условиях вакуума. В этой связи разработка универсальной, физически обоснованной методологии расчета КТС, объединяющей цифровое моделирование микрорельефа, многофизичное конечно-элементное моделирование и современные методы машинного обучения, является безусловно актуальной задачей.

В диссертации получен ряд новых результатов, имеющих фундаментальное и прикладное значение. Впервые предложена методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, сочетающая два алгоритма фильтрации – метод вершин и метод локальных экстремумов. В отличие от традиционных статистических и гауссовых моделей, данный подход сохраняет топологические особенности реальной поверхности, обеспечивая баланс между точностью и вычислительной сложностью. Автором модифицирована фрактальная модель на основе функции Вейерштрасса–Мандельброта, что позволило восстанавливать микрорельеф по профилограмме с погрешностью менее 0,15 %. Создана комплексная теоретическая модель контактного теплообмена, интегрирующая механику контакта, теплопередачу через пятна контакта, межконтактную среду и

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

30.04.2026

лучистый теплообмен. Экспериментально и численно обоснован значительный вклад излучения (до 46 % при 1073 К и давлении 0,14 МПа в вакууме), что опровергает традиционное мнение о его незначительности (1–3 %). Исследовано совместное влияние анизотропии композитов и микрогеометрии контакта на КТС, выявлены оптимальные углы армирования ($[0^\circ+90^\circ]$, $[\pm 60^\circ+90^\circ]$) для минимизации термического сопротивления. Создана нейросетевая модель (RBF, BP-ANN) на основе более 10 000 синтетических экспериментов, обеспечивающая прогнозирование КТС с точностью до 2,5 %. Все эти результаты являются оригинальными и вносят существенный вклад в теорию контактного теплообмена.

Разработанные методики и программные средства позволяют на ранних стадиях проектирования обеспечивать заданные тепловые режимы, повышать ресурс и надежность теплонагруженных агрегатов на 25–30 %, сокращать сроки отработки конструкций за счет перехода от итерационного к предсказательному моделированию. Практическая ценность подтверждена успешной оптимизацией узлов двух реальных объектов: камеры сгорания ЖРД малой тяги с композитной оболочкой (снижение термонапряжений в 2,5–3 раза) и замкового соединения керамической лопатки с металлическим диском газотурбинного двигателя. Созданные экспериментальные установки для измерения КТС в атмосферных условиях и контролируемых средах (вакуум, инертные газы) обеспечивают погрешность не более 7 % в широком диапазоне температур (от криогенных до 1000 °С) и давлений (0,1–10 МПа).

Автореферат изложен на 47 страницах, содержит 24 рисунка и 3 таблицы. Структура логична: в первой главе дан обзор проблемы, во второй – анализ существующих подходов, в третьей – разработка геометрической модели микрорельефа, в четвертой – моделирование механического контакта, в пятой – тепловая модель, в шестой – параметрические исследования, в седьмой – экспериментальная база, в восьмой – нейросетевые модели, в девятой – практические приложения. Такое построение позволяет проследить весь путь от фундаментальных исследований до инженерных решений.

Достоверность обеспечена использованием фундаментальных законов теплофизики и механики, верификацией конечно-элементных моделей на аналитических решениях и собственных экспериментальных данных (погрешность измерений $\leq 7\%$), а также сопоставлением с литературными данными. Основные результаты докладывались на более чем 30 международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 25 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК и двух свидетельствах о регистрации программ для ЭВМ. Личный вклад автора не вызывает сомнений.

По тексту автореферата имеются следующие замечания:

1. Недостаточная обоснованность выбора параметров фрактальной модели. В разделе 3 приведены подробные формулы для определения фрактальной размерности D , параметра Херста H и масштабного коэффициента G . Однако из текста не ясно, каким образом выбираются ключевые параметры модели Вейерштрасса–Мандельброта (например, шаг дискретизации τ при вычислении структурной функции, диапазон τ для усреднения, значение $\gamma=1.5$). Отсутствует анализ чувствительности восстановленного микрорельефа к этим параметрам, что затрудняет оценку методики для различных классов поверхностей.

2. Не раскрыта методика учета многократного переизлучения в сложной геометрии межконтактных полостей. В главах 5 и 6 подчеркивается важная роль лучистого теплообмена. Однако в автореферате не описано, каким образом определяются угловые коэффициенты для реальной трехмерной поверхности с множеством микрополостей. Используется ли приближение «серого» тела, учитывается ли отражение излучения от стенок неровностей? Без этих деталей вывод о величине вклада излучения остается недостаточно обоснованным.

3. Отсутствие данных о влиянии циклического нагружения на долговременную стабильность покрытий. В разделе 6 исследовано влияние мягкометаллических покрытий (свинец, медь, хром) и показано снижение КТС в 2–3 раза при оптимальной толщине 2–3 высоты микронеровностей.

Однако из автореферата не ясно, как ведут себя такие покрытия при термоциклировании. Не приведены данные по усталостной прочности покрытий, их окислению или расползанию при длительной эксплуатации. Это снижает ценность рекомендаций для практического проектирования ответственных узлов.

Указанные замечания не снижают научной ценности результатов, диссертационная работа Ежова А.Д. представляет собой законченное, оригинальное и практически значимое исследование, выполненное на высоком научно-техническом уровне. Диссертация «Комплексные методы решения задач контактного теплообмена для энергоэффективного управления тепловыми режимами» полностью соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Ежов Алексей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

13.04.2026 г.

Заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов»
Сибирского государственного университета науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева,
доктор технических наук, доцент

Зуев Александр Александрович

660037, Красноярский край, г. Красноярск,
просп. им. газеты "Красноярский рабочий", дом 31
Тел.: +7 (391) 291-90-56
E-mail: info@sibsau.ru



Подпись Зуева А.А. заверяю

А. А. Зуев
кад. Задуссенко /