

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента на диссертацию**  
**Ежова Алексея Дмитриевича**  
**«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.** Диссертационная работа Ежова Алексея Дмитриевича посвящена решению одной из важнейших проблем современной теплофизики и теплотехники – проблемы достоверного прогнозирования и проектирования контактного теплообмена в ответственных узлах энергонапряженных конструкций. Контактное термическое сопротивление (КТС) в значительной степени определяет эффективность теплообмена, надежность и ресурс изделий в аэрокосмической отрасли, энергетике, машиностроении, микроэлектронике и других отраслях.

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности и надежности современных энергоустановок. В диссертации проведен всесторонний анализ тепловых процессов в контактных узлах различных отраслей промышленности: газотурбинных установок, теплообменных аппаратов, атомной энергетики, ракетных двигателей и космических аппаратов. Автор убедительно доказывает, что игнорирование КТС или использование слишком упрощенных моделей для их анализа приводит к локальным перегревам, возникновению критических термонапряжений и преждевременным отказам. В работе показано, что, несмотря на большое количество исследований, проблема надежного прогнозирования КТС остается актуальной. Существующие подходы часто фрагментарны и не обеспечивают достаточной точности за пределами условий, в которых были получены. Это обосновывает необходимость разработки универсальной, физически обоснованной методологии решения задач контактного теплообмена, что и является целью диссертации. Особенно остро эта проблема стоит при использовании в аэрокосмической и энергетическом машиностроении разнородных материалов (металл-композит, керамика-

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«04 05 2026»

металл), где различие в коэффициентах теплового расширения усугубляется влиянием микрогеометрии контактирующих поверхностей.

Критическую значимость учет КТС приобретает при проектировании паро- и газотурбинных машин в энергетике, аэрокосмической технике и т.д. еще и потому, что наиболее перспективным направлением в повышении эффективности такого рода машин является их работа на повышенных рабочих температурах. Температура газа в районе первых ступеней современных газотурбинных машин превышает 1300 °С, а диапазон скоростей во первых изменяется в широких пределах, достигая при форсаже десятков тысяч оборотов в минуту. Эти обстоятельства обусловили широкое применение лопаток из керамических, жаропрочных и термостойких композитных материалов на основе углепластиков с одной стороны и термобарьерных их покрытий и организация интенсивного охлаждения- с другой стороны. Реализация этих направлений повышения ресурса невозможна без тщательного анализа КТС.

Этот анализ сдерживается рядом нерешенных проблем.

Во-первых, это анизотропия свойств КТС, зависящая от способа укладки волокон.

Во-вторых, это существенная роль излучения в теплопередаче при контакте волнистых, шероховатых поверхностей, где характер шероховатости зависит от вида материалов контактной пары способа обработки поверхности, качества изготовления инструмента и т.п.

В-третьих, существенное затруднение и зачастую невозможность изготовления ротора и лопатки из одного материала, что из-за различного коэффициента линейного расширения нарушает плотность контакта замкового соединения лопаток с диском турбины. При этом для большинства турбин эксплуатационные особенности характеризуются циклическими нагрузками с высоким уровнем растягивающих напряжений в замковой части лопатки. Большинство известных современных керамических и композитных материалов на основе углепластика при повышенной термостойкости, плохо переносят циклические растягивающие напряжения, что приводит к увеличению числа отказов, снижению межремонтного периода, повышенным эксплуатационным затратам, а иногда к авариям и даже катастрофам.

Необходимость уточненного расчета КТС возникает на современном этапе развития космических аппаратов (КА)- искусственных спутников Земли. Эффективность функционирования КА в определяющей степени зависит от качества и достоверности информации, полученной от бортовой информационно-измерительной системы (ИИС). Существенную часть оптической погрешности информационно-измерительной информации, составляет термодформационная компонента погрешности измерений, из-за термодформационного смещения оптической оси при неравномерной тепловой нагрузке несущей конструкции. Источником этой неравномерности являются локальные тепловыделения

работающих приборов ИИС, тепловые потоки отраженного и прямого излучения через люки, теплопередача в узлах крепления несущей конструкции. На всех этих потоках определяющим образом сказывается КТС в узлах крепления приборов ИИС к несущей конструкции и самой несущей конструкции к элементам КА. Отсутствие надежных методов определения КТС приводит к некачественному тепловому проектированию КА, завышению массогабаритных показателей, существенному снижению точности ИИС.

Сложность проблемы усугубляется большим количеством эксплуатационных, конструктивных и технологических факторов, влияющих на КТС. На КТС влияет волнистость (следы вибраций в системе станок-деталь) и шероховатость на макроуровне и микроуровнях, упругопластическая деформация цикличность нагрузки, температура, угол деформационного сдвига контакта в ходе эксплуатации, способ и направление шлифовки контакта, степень черноты, заполнителя, наличие покрытия и т.п. Поэтому даже постановка задачи определения КТС требует тщательного системного анализа, широкой междисциплинарной эрудиции в области геометрии, механики, теплофизики. Одной из наиболее сложных, даже в постановочном плане, является термомеханическая задача в зоне КТС с учетом микрошероховатости в силу стягивания потоков теплообмена между контактирующими поверхностями к зоне наименьшего сопротивления с учетом излучения и деформации. Эта сугубо нелинейная задача остается актуальной, хотя автор диссертации существенно продвинулся в ее решении. Нельзя утверждать, что все эти компоненты анализа КТС не рассматривались ранее. Они исследовались в работах В.М.Попова, Ю.П.Малькова, Lambert, Йоваковича и других авторов. Но в комплексе эти явления системно впервые рассмотрел А.Д.Ежов.

**ОБЗОР СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ.** Комплексный характер исследования поставила перед автором ряд сложных задач, с большинством из которых он с успехом справился. В первую очередь это относится к аналитическому обзору современного состояния исследований. Автору удалось сконцентрировать основные положения обзора в первой и второй главе, а по необходимости, совершенно оправдано анализировать соответствующие публикации в остальных главах. При этом следует отметить неформальный глубокий сравнительный анализ публикаций, обоснованные выводы и корректные заимствования наиболее пригодных для диссертационного исследования приемов, способов и методов. Так адаптированный аппарат фрактальных исследований позволил с помощью обоснованных методов профилометрии образцов построить на базе функции Вейерштрасса-Мандельброта модель микрогеометрии КТС, что обеспечило эффективность разработанного в диссертации цифрового двойника КТС. Обоснованно и весьма эффективно применение автором метода конечных элементов для формирования макета цифрового двойника.

Тщательно проанализированы и обобщены многочисленные экспериментальные материалы по влиянию на КТС физико-механических свойств контактирующих материалов, давления на КТС, шероховатости и свойств метафазной среды, влияния лучистого теплообмена, влияния напыления и других видов покрытия, влияние циклической механической и термической нагрузок. Исследовано КТС в широком диапазоне температур – от криогенных до предельно высоких. Проведена оценка влияния анизотропии контактирующих композитных материалов на КТС. Установлена не выявленная ранее критическая роль теплообмена излучением в высоком температурном диапазоне работы изделий. Для обоснования и верификации теоретических положений диссертации проведена серия экспериментальных исследований на разработанной автором оригинальной установке. В ходе этих исследований анализ теплового потока в КТС производился с помощью решения соответствующих обратных задач теплопроводности методами известной школы академика О.М.Алифанова, что обеспечило успешную идентификацию теплового потока в КТС по косвенным измерениям.

Для применения в инженерной практике автором разработаны прогностические модели на базе искусственных нейронных сетей. Эти модели достаточно просты в реализации, позволяют эффективно решать практические задачи контактного теплообмена, используя теоретическую и экспериментальную базу исследований автора в качестве обучающей выборки. Полученные результаты эффективно использованы автором для модернизации конструкции жидкостного ракетного двигателя малой тяги и при анализе и совершенствовании крепления лопатки к диску газотурбинного двигателя.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА, ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ.** В целом научная новизна работы заключается в создании комплексного, физически обоснованного подхода к моделированию и прогнозированию контактного термического сопротивления, базирующегося на цифровом двойнике микрорельефа поверхности, конечно-элементном моделировании с учетом анизотропии и лучистого теплообмена, а также машинном обучении.

В диссертации (глава 3) впервые разработана методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющая два взаимодополняющих алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. В отличие от традиционных статистических моделей (Гауссово распределение, сферические аспериты), предложенный подход сохраняет топологические особенности реальной поверхности. Это позволяет обеспечить оптимальный баланс между точностью математического описания и вычислительной сложностью. При этом оптимальное соотношение между точностью модели и затратой вычислительных ресурсов при распространении результатов анализа элемента конечного участка на всю контактную площадку эффективно обеспечивается фрактальной моделью Вейерштрасса-Мандельброта.

Верификация методики по параметрам  $R_a$ ,  $R_q$  и форме опорной кривой подтверждает высокую адекватность цифровой модели реальной поверхности.

Существенным вкладом в теорию контактного теплообмена является разработка комплексной теоретической модели, интегрирующей механику контакта шероховатых поверхностей с теплообменом в контактной зоне при учете лучистого переноса и влияния анизотропии свойств материалов (Глава 4 и Глава 5). Автор впервые обосновал и экспериментально подтвердил значимую роль лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях. Показано, что пренебрежение вкладом излучения в величину КТС приводит к существенной ошибке (до 46% при 0.14 МПа и 1073 К).

Новым научным результатом является исследование комплексного влияния факторов, влияющих на КТС, в том числе совместного влияния анизотропии свойств композитов и микрогеометрии контакта на величину КТС (Глава 6). Впервые выявлены оптимальные схемы армирования углеродных композитов ( $[0^\circ+90^\circ]$ ,  $[\pm 60^\circ+90^\circ]$ ), минимизирующие термическое сопротивление. Показано, что различие КТС между ориентациями  $[0^\circ]$  и  $[90^\circ]$  может достигать 54% при 0.2 МПа и 200 °С.

Существенно новым результатом является нейросетевое моделирование КТС с обучающей выборкой на основе виртуального эксперимента на цифровом верифицированном конечно-элементном двойнике.

**Достоверность научных положений и выводов** обеспечивается их соответствием фундаментальным законам теплофизики, термомеханики, верификацией численных и аналитических моделей на собственных экспериментальных данных, данных из сторонних независимых источников. В главе 7 описаны оригинальные экспериментальные установки для определения КТС в атмосферных условиях и контролируемых средах (вакуум, инертные газы). Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными подтверждает корректность разработанных моделей.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ.** Результаты диссертации А.Д.Ежова имеют широкие перспективы внедрения в научно-исследовательскую и расчетно-практическую области хозяйственной деятельности. Уточненный прогноз тепловых режимов газотурбинных и паротурбинных машин в энергетике и аэрокосмической отраслях с учетом КТС позволяют существенно повысить надежность, улучшить массогабаритные характеристики машин, обеспечить их работу в более широком диапазоне температур. Большие перспективы уточнение расчета КТС имеет в проектировании тепловой защиты летательных аппаратов. Повышение точности прогноза температурного распределения в несущих конструкциях космических аппаратов позволит существенно повысить достоверность информации за счет снижения термомодеформационной компоненты погрешности оптических измерений.

Нейросетевая модель для быстрого прогнозирования КТС пригодна для интеграции в CAD/CAE-системы и цифровые двойники, что позволяет сократить время численного моделирования тепловых процессов. Универсальный расчетно-аналитический инструмент обеспечивает снижение неопределённости в прогнозировании КТС, что позволяет на ранних стадиях проектирования обеспечивать заданные тепловые режимы, повышать ресурс и надёжность теплонапряжённых агрегатов.

Исследования, проведенные в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ №FSFF-2023-0006, подтверждают востребованность темы на государственном уровне. Практическая значимость работы подтверждена успешной оптимизацией контактных узлов в двух значимых объектах техники.

Для камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги с композитной оболочкой предложена и обоснована конструкция узла стыковки с изменяемым углом сопряжения. Это позволило снизить термонапряжения, вызванные несогласованностью коэффициентов теплового расширения, до приемлемого уровня.

Для замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газотурбинного двигателя выполнена оценка теплонапряженного состояния с учётом анизотропии свойств композита и реального КТС.

**ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ И АВТОРЕФЕРАТУ.** Несмотря на высокое качество работы, имеется ряд замечаний и вопросов, направленных на уточнение отдельных положений.

1. Из текста диссертации неясно, как полученные в главе 3 результаты геометрического моделирования микрорельефа контактирующих шероховатых поверхностей методами вершин и методам локальных экстремумов используются в дальнейшем совместно с фрактальной моделью Вейерштрасса-Мандельброта. В частности, неясно, как согласованы выражения (5.18) с формулами гл.4 на стр.43. Если они альтернативны, то какой критерий выбора? В каких разделах диссертации и в каком объеме использованы каждая из этих моделей? Какова методическая погрешность, вызванная эффектом самоподобия во фрактальной модели при случайном анизотропном характере микрорельефа?

2. Следовало бы модели в главах 3,4,5 оценить по критериям Фишера, Стьюдента,  $R^2$ , Дарбина-Уотсона. Необходимо также оценить статистические выборки, например, по критериям согласия Пирсона, Колмогорова, Смирнова и т.д.

3. В связи с критической значимостью экспериментальной части исследований для всей работы следовало бы уделить значительно больше внимания и тщательно исследовать влияние погрешностей на результаты моделирования КТС. Оценка погрешности в разделе 7.4.4 на стр.308 недостаточно детально. Во всех расчетных методиках отсутствует анализ

методической погрешности, погрешности каналов передачи информации. В главе 3 диссертации при описании методики построения фрактальной геометрии на основе параметра Хёрста и метода R/S анализа (раздел 3.5.2) приведены формулы (3.33–3.39). Однако в тексте недостаточно подробно раскрыт вопрос устойчивости определения параметра Хёрста при наличии шумов в экспериментальных профилограммах. Остается неясным как влияет уровень инструментальной погрешности - шума измерительного прибора (например, профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-210) на погрешность определения фрактальной размерности  $D$  и масштабного коэффициента  $G$ .

4. В главе 6 (раздел 6.6) продемонстрирована значительная роль лучистого теплообмена в вакууме. Однако в реальных условиях эксплуатации авиационных двигателей вакуум может нарушаться из-за утечек рабочих тел или продуктов сгорания. Не проводилось ли автором исследование влияния состава межконтактной среды (например, наличие продуктов сгорания углеводородного топлива) на коэффициент излучения поверхностей и, как следствие, на вклад радиационной составляющей в КТС?

5. В главе 8 при описании нейросетевой модели указано, что обучение проводилось на 10 000 синтетических примеров. Возникает вопрос о представительности выборки. Была ли проведена оценка границ применимости нейросетевой модели за пределами диапазонов параметров, использованных при обучении (экстраполяция)? Насколько корректно модель работает при выходе за пределы обученной области (например, при давлениях выше 10 МПа или температурах выше 1200 °С)? Как организовано предотвращение переобучения модели?

6. В автореферате на странице 10 в разделе «Практическая значимость работы» указано, что разработанные методики позволяют повысить ресурс и надежность теплонагруженных узлов на 25–30%. В тексте диссертации (Глава 9) приведены конкретные примеры оптимизации, однако количественная оценка повышения ресурса в часах или циклах нагружения для конкретных изделий (ЖРД малой тяги, ГТД) проведена недостаточно подробно. Рекомендуется уточнить методику перевода снижения термонапряжений в процентное увеличение ресурса.

7. В главе 9 (раздел 9.2.7) при расчете теплонапряженного состояния замкового соединения керамических лопаток упоминается предел прочности на растяжение керамического хвостовика. Однако, для керамических композиционных материалов статистический разброс прочности значителен. Учитывалась ли вероятностная природа прочности керамики при определении запаса прочности узла, или использовались детерминированные значения?

8. В автореферате и тексте диссертации встречаются отсылки на промышленное внедрение, однако в диссертации вообще не приведены подтверждающие внедрение документы.

9. Несмотря на грамотное и технически выверенное изложение диссертации, в тексте встречаются ошибки и опечатки: на стр.90 главы 3 повторяется текст главы 1; из уравнения (3.21) сразу следует простое решение  $L = \exp(-\frac{b}{k})$ ; обозначения на стр.80 и 130 не согласованы; таблица 4.1. на стр.145 содержит незаполненную строку; номера формул на стр.149 и 150 ошибочны; фраза в конце стр.181 не имеет смысла; подрисуночные подписи рис.9.1 и его описание на стр.329 противоречат друг другу и т.д.

Указанные замечания являются рекомендательными, носят частный характер и не снижают научной ценности работы в целом.

**СООТВЕТСТВИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ УКАЗАННОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ.** Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», в частности п.6 «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях»; п.9 «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Исследования направлены на развитие теории теплообмена, разработку методов расчета тепловых режимов, изучение теплофизических свойств контактных взаимодействий.

**СООТВЕТСТВИЕ СОДЕРЖАНИЯ АВТОРЕФЕРАТА СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ.** Автореферат в достаточно полной мере отражает основные положения диссертации, включая цели, задачи, методы исследования, научную новизну и практическую значимость, выводы и рекомендации. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы четко и соответствуют структуре диссертации. Структура, объем и оформление автореферата соответствуют требованиям ВАК.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОПОНЕНТА О СООТВЕТСТВИИ РАБОТЫ ТРЕБОВАНИЯМ ВАК.** Диссертационная работа Алексея Дмитриевича Ежова является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей новые научно-обоснованные технические решения, которые вносят значительный вклад в развитие страны за счет повышения энергоэффективности тепловых режимов машин и аппаратов с помощью моделирования и прогнозирования контактного термического сопротивления с учетом реальной микрогеометрии поверхностей, анизотропии свойств материалов и лучистого теплообмена.

Диссертационная работа А.Д. Ежова выполнена на высоком научном и методическом уровне, носит завершённый характер, логически структурирована, содержит

систематизированный анализ литературы, обоснованные теоретические экспериментально апробированные положения и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявленным к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Алексей Дмитриевич Ежов заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Управление и  
системный анализ теплоэнергетических  
и социотехнических комплексов»

ФГБОУ ВО «Самарский

государственный технический университет» \_\_\_\_\_ /М.Ю. Лившиц/

Адрес электронной почты: [usat@samgtu.ru](mailto:usat@samgtu.ru)

Телефон: +7 906 344 7924

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Почтовый адрес организации: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»: <https://samgtu.ru/>

Адрес электронной почты организации: [rector@samgtu.ru](mailto:rector@samgtu.ru)

Телефон: +7 (846) 278-43-53

Подпись Лившица Михаила Юрьевича удостоверяю:

Ученый секретарь

ФГБОУ ВО «Самарский

государственный технический

университет»



*[Handwritten signature]*

Малиновская Ю.А.

*Создан документ  
07.05.2026 [Signature]*