



Ленинградская ул., д. 24, г. Химки,
Московская область, 141402
ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566

Тел. +7 (495) 573-56-75, факс +7 (495) 573-35-95
e-mail: npol@laspace.ru
www.laspace.ru

от 21.04.26 № 05
на № 6392ВХ. от 26.03.2026

Ученому секретарю
диссертационного совета МАИ
24.2.327.06, д.т.н., доценту
В.М. Краеву

Волоколамское ш., д.4, г.Москва, 125993

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»

Создание перспективных образцов энергоэффективной техники, а также повышение её надёжности и долговечности является одной из приоритетных задач авиационно-космической, энергетической, транспортной и других отраслей. Ключевым фактором в обеспечении теплового режима большинства теплотехнологических изделий без преувеличения является контактное термическое сопротивление (КТС) в теплонагруженных узлах. В космических условиях влияние КТС на температурное состояние изделий имеет особое значение, при этом, неопределённость в расчётах КТС до сих пор может достигать 50-300%, что приводит к локальным перегревам, локальным переохлаждениям и, в результате, к преждевременным отказам техники. Несмотря на многочисленные исследования, проблема создания достоверных методов прогнозирования КТС с учётом реальной микрогеометрии, анизотропии материалов, радиационного теплообмена и циклического нагружения остаётся далёкой от решения. В связи с этим диссертационная работа **Ежова А.Е.**, направленная на разработку научно-методического и инструментального обеспечения для многопараметрического моделирования и оптимизации контактного теплообмена, является **безусловно актуальной**.

В соответствии с авторефератом, **целью диссертационной работы** является разработка научно-методического и инструментального обеспечения для многопараметрического моделирования, анализа и оптимизации процесса контактного теплообмена в ответственных узлах конструкций перспективных энер-

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

22.04 2026г.

гоустановок. Для достижения указанной цели автором решён комплекс взаимосвязанных задач, включающий: создание экспериментальных установок для определения КТС; разработку методик построения цифровых двойников микрорельефа поверхностей; создание многопараметрических конечно-элементных моделей; проведение экспериментальных исследований влияния различных факторов (микрогометрия, нагрузка, температура, анизотропия, циклическое нагружение, лучистый теплообмен) на КТС; разработку и верификацию нейросетевых моделей для быстрого прогнозирования КТС; а также практическую оптимизацию конструкций конкретных узлов жидкостных и газотурбинных двигателей.

В качестве **средств и методов исследования** автор использовал: теоретический анализ фундаментальных работ, экспериментальные методы (профилометрия, измерение КТС в стационарном и нестационарном режимах), численное моделирование (метод конечных элементов в ANSYS), цифровое моделирование микрорельефа с применением фрактального анализа (функция Вейерштрасса-Мандельброта), а также методы машинного обучения (обучение BP-ANN и RBF-сетей на результатах виртуальных экспериментов).

Научную новизну работы определяет следующее:

-впервые разработана методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, в которой объединены два взаимодополняющих алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. Данное решение позволило с высокой точностью воспроизводить реальную трёхмерную геометрию контактирующих поверхностей, сохраняя их топологические особенности. Кроме этого, создана комплексная математическая модель, интегрирующая механику контакта шероховатых поверхностей (с учётом упругопластических деформаций), теплопроводность в пятнах контакта и лучистый теплообмен в зазорах. В формате количественных оценок подтверждена критическая роль лучистого теплообмена в контактных соединениях при высоких температурах и низких контактных давлениях, характерных для условий эксплуатации космических аппаратов;

-разработана и верифицирована нейросетевая модель (BP-ANN, RBF) для быстрого прогнозирования КТС, обученная на базе порядка 10000 виртуальных экспериментов. В отличие от полуэмпирических зависимостей, нейросетевой подход более корректно учитывает нелинейные взаимосвязи между давлением, температурой, шероховатостью, свойствами материалов и средой контакта, что позволяет снизить неопределённость в расчётах до $\leq 2.5\%$.

-созданы оригинальные экспериментальные установки для определения КТС в широком диапазоне температур (от криогенных до 1000°C) и давлений (0,1–10 МПа) в атмосферных и контролируемых средах (вакуум, инертные газы), обеспечивающие погрешность измерений не более 7%.

Полученные результаты объективно имеют **практическую значимость** и уже внедрены:

-в авиационно-космической промышленности: для оптимизации замковых соединений керамических лопаток с металлическим диском газотурбинных двигателей, а также камер сгорания ЖРД малой тяги из композитных материалов.

Применение разработанных методик позволило снизить термонапряжения в конструкции в 2.5–3 раза при сохранении прочности и массогабаритных характеристик;

-в энергетической промышленности: для повышения КПД ребристых трубчатых теплообменников на 5-7% и снижения их массогабаритных показателей на 12-15%, а также для более точного прогнозирования теплового состояния топливных сборок ядерных реакторов.

-разработанные методики внедрены в учебный процесс МАИ по дисциплинам «Современные программные средства теплового проектирования», «Контактный теплообмен в элементах и агрегатах атмосферных и космических ЛА», «Нейросетевые вычислительные технологии в задачах теплотехники», «Проектирование информационных сетей тепловых процессов».

Все представленные в диссертации основные научные и практические результаты получены при непосредственном участии автора, что характеризует существенный **личный вклад**. Соискателю принадлежат научные идеи, положенные в основу работы. Автором лично разработаны методики построения цифровых двойников микрорельефа и нейросетевого прогнозирования КТС, созданы экспериментальные установки, проведены измерения, выполнены численные расчёты и оптимизация конструкций, а также подготовлены тематические публикации.

Достоверность исследований диссертационной работы обеспечена использованием фундаментальных законов теплофизики и термомеханики, верификацией конечно-элементных моделей на аналитических решениях и собственных экспериментальных данных (погрешность $\leq 7\%$), а также хорошей сходимостью расчётных и экспериментальных результатов.

Основные положения работы докладывались на более чем 30 всероссийских и международных конференциях, включая ММТТ-38, СТС-41, Минский международный форум по тепло- и массообмену (2016, 2022, 2024), Королёвские академические чтения, конференции «Авиация и космонавтика» (2014–2025) и другие.

По материалам диссертации опубликовано 75 печатных работ, из них 25 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК, 52 тезиса докладов на научных конференциях, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Это полностью отражает основные результаты диссертации и соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям.

В качестве некоторых замечаний к материалам, представленным в автореферате можно отметить следующее:

-из автореферата не до конца понятно реальное влияние на КТС циклического нагружения исследуемого образца (см. рис. 12). Нагляднее было бы представить количественную оценку именно изменения КТС по циклам нагружения.

-в разделе, посвящённом нейросетевому прогнозированию (стр. 33-34), отсутствует сравнение точности разработанной модели с известными классическими зависимостями (например, М. Michael Yovanovich, М. Cooper и др.). Обращает на себя внимание то, что виртуальная суррогатная модель КТС создан-

ная с помощью нейросети была обучена на результатах виртуальных же экспериментов, выполненных с помощью однотипных компьютерных моделей теплового контакта. Это предсказуемо должно способствовать хорошему совпадению.

-в названии работы указано, что диссертационная работа представляет «комплексные методы» (во множественном числе), а в заключении утверждается, что автор разработал один «комплексный метод».

-на практике, в космической технике, широко применяются фланцевые, резьбовые, шарнирные и др. соединения, представляющие собой комплексные контактные тепловые сопротивления, которые существенным образом могут влиять на «энергоэффективное управление тепловыми режимами» изделий однако, автор не уделил этому вопросу отдельного внимания.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и могут рассматриваться как направления для возможных дальнейших исследований. Диссертационная работа **Ежова Алексея Дмитриевича** заслуживает положительной оценки и судя по автореферату является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе совокупности экспериментальных, теоретических и численных методов решена важная научно-техническая проблема – существенное снижение неопределённости в расчётах контактного термического сопротивления теплонагруженных узлов. Разработанные методики и программные средства доведены до практического использования в авиакосмической и энергетической отраслях. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9–14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор **Ежов Алексей Дмитриевич** заслуживает присуждения искомой степени по специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Отзыв подготовил

Ведущий научный сотрудник АО «НПО Лавочкина», доктор технических наук (шифр и наименование специальности, по которой защищена диссертация, 2.5.13 – проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов).



Финченко В.С.

Подпись д.т.н. Финченко Валерия Семёновича заверяю

Заместитель генерального директора
по персоналу и общим вопросам

«___» _____ 2026 г.



И.В. Шолохова