



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор, заместитель  
генерального директора  
ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»,  
доктор технических наук, академик РАН



В.А.Соловьёв

2026 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации - Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» 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».

### Общая характеристика работы и актуальность темы исследования

Диссертационная работа **Ежова Алексея Дмитриевича** посвящена решению одной из фундаментальных проблем современной теплофизики и теплотехники – проблеме достоверного прогнозирования и управления контактным теплообменом в ответственных узлах энергонапряженных конструкций. Актуальность темы исследования обусловлена критической зависимостью надежности и ресурса изделий аэрокосмической техники от точности учета контактного термического сопротивления (КТС) на этапах проектирования и эксплуатации.

В условиях тенденции к повышению рабочих температур, снижению массогабаритных характеристик конструкций и широкому внедрению композиционных материалов в ракетно-космической технике, традиционные

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

17.04.2026г.

методы расчета КТС, основанные на усредненных коэффициентах и упрощенных моделях шероховатости, становятся недостаточными: неопределенность в расчетах контактного термического сопротивления по известным методикам может достигать от 50 до 300%, что на этапе проектирования конструкций делает прогнозирование тепловых режимов весьма затруднительным. Это особенно критично для эксплуатируемых в вакууме и с большой тепловой нагрузкой изделий ракетно-космической техники, где надежность теплонагруженных узлов определяет успех и безопасность экипажа.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования РФ №FSFF-2023-0006, что подтверждает востребованность темы на государственном уровне. Результаты исследований имеют прямое отношение к задачам, решаемым РКК «Энергия» при проектировании систем терморегулирования космических аппаратов, стыковочных узлов орбитальных станций и теплонагруженных элементов ракетных двигателей.

Содержание работы Ежова А.Д. сосредоточено на разработке комплексных методов решения задач контактного теплообмена, используемых в авиационно-космической технике и энергетике. Работа охватывает широкий круг вопросов, связанных с моделированием контактных соединений, включая создание цифровых двойников микрорельефа, учет лучистого теплообмена, анизотропии свойств материалов и применение методов искусственного интеллекта.

Представленная диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, списка обозначений, библиографии и 2 приложений. Общий объем работы – 491 страница. Библиография включает 456 наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы, а также подчеркивается её научная новизна и практическая значимость.

Глава 1 представляет обзор текущего состояния исследований по ключевым направлениям, включая особенности тепловых процессов в контактных узлах газотурбинных установок, теплообменных аппаратов, атомной энергетики, ракетных двигателей и космических аппаратов.

В Главе 2 представлен систематизированный обзор существующих подходов к расчету контактной термической проводимости. Особое внимание уделяется

анализу существующих аналитических зависимостей, условиям их применимости и ограничениям.

Глава 3 посвящена разработке геометрической модели микрорельефа контактирующих поверхностей. Описываются методы получения профилограмм, формирование облика макета цифрового двойника поверхности на основе облака точек, а также моделирование трехмерной топографии на основе теории фракталов.

В Главе 4 выполнен комплексный анализ контактного взаимодействия шероховатых поверхностей с позиций механики деформируемого твердого тела. Рассматривается модель контактного взаимодействия на базе фрактальной теории и численное моделирование методом конечных элементов.

Глава 5 подробно рассматривает решение задачи контактного теплообмена сопрягаемых шероховатых поверхностей. Описывается общая схема протекания тепловых процессов, модель на базе фрактальной теории и численное моделирование теплового взаимодействия.

В Главе 6 проведена оценка влияния факторов, влияющих на контактную термическую проводимость. Анализируется влияние геометрии микрорельефа, давления, свойств материала, температуры, лучистого теплообмена, межконтактной среды, покрытий, циклической нагрузки и анизотропии свойств.

Глава 7 описывает экспериментальное исследование контактного термического сопротивления. Приводится анализ известных конструкций экспериментальных установок, описание оригинальных установок для исследований в вакууме и атмосферных условиях, а также методика проведения эксперимента.

В Главе 8 рассмотрено применение искусственного интеллекта при решении задач контактного теплообмена. Описывается решение обратной задачи теплопроводности и задачи контактного теплообмена с помощью нейронных сетей.

Глава 9 посвящена практической реализации научных решений. Приводятся результаты расчета тепловых процессов в конструкциях жидкостных ракетных двигателей малой тяги и в конструкциях лопатка-диск газотурбинного двигателя.

Заключение подводит итоги проделанной работы, указывая на достигнутые результаты. Среди них можно выделить следующие наиболее значительные:

- Создание методики разработки цифровых двойников микрорельефа. Автор разработал оригинальную методику создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющую два взаимодополняющих алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. Это позволяет обеспечить оптимальный баланс между точностью математического описания и вычислительной сложностью.

- Разработка комплексной теоретической модели. Впервые создана модель, интегрирующая механику контакта шероховатых поверхностей с теплообменом в контактной зоне при учете лучистого переноса и влияния анизотропии свойств материалов.

- Обоснование роли лучистого теплообмена. Экспериментально и численно обоснована значимая роль лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях. Показано, что игнорирование вклада излучения приводит к ошибке до 46%.

- Исследование анизотропии композитов. Впервые проведено исследование совместного влияния анизотропии свойств композитов и микрогеометрии контакта на величину КТС. Выявлены оптимальные схемы армирования углеродных композитов.

- Разработка нейросетевой модели. Впервые разработана и верифицирована нейросетевая модель для быстрого прогнозирования КТС на основе виртуальных экспериментов. Погрешность прогноза не превышает 2.5%.

- Оптимизация конструкций двигателей. На основе комплексного подхода разработаны методики оптимизации конструкции замкового соединения керамических лопаток ГТД и камеры сгорания ЖРД малой тяги.

- Создание экспериментальной базы. Получены экспериментальные данные значений КТС в атмосферных условиях и в контролируемых средах с погрешностью не более 7%.

- Снижение неопределенности расчетов. Сформирован универсальный расчетно-аналитический инструмент, обеспечивающий снижение неопределённости в прогнозировании КТС до величин  $\leq 7\%$ .

Все положения, выносимые на защиту, научно обоснованы и подтверждены сравнением с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

### **Анализ степени обоснованности и достоверности научных положений**

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена важная научная задача разработки комплексных методов моделирования и прогнозирования контактного термического сопротивления. Работа выполнена на высоком научном уровне, отличается глубиной проработки вопроса, сочетанием теоретических исследований, численного моделирования и экспериментальной верификации.

Первое научное положение – методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющая два алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. Данное положение обосновано в главе 3 диссертации, где автор подробно описывает алгоритмы обработки профилограмм поверхностей. Достоверность положения подтверждается верификацией по параметрам  $R_a$ ,  $R_q$  и форме опорной кривой, что обеспечивает высокую адекватность цифровой модели реальной поверхности. Однако следует отметить, что в разделе 3.5.2 при описании методики построения фрактальной геометрии на основе параметра Хёрста и метода R/S анализа недостаточно подробно раскрыт вопрос устойчивости определения параметра Хёрста при наличии шумов в экспериментальных профилограммах. Рекомендуется добавить оценку чувствительности метода к шумам измерений, что повысит достоверность положения.

Второе научное положение – комплексная теоретическая модель, интегрирующая механику контакта шероховатых поверхностей с теплообменом в контактной зоне при учете лучистого переноса и влияния анизотропии свойств материалов. Положение обосновано в главах 5 и 6 диссертации. Автор экспериментально и численно обосновал значимую роль лучистого теплообмена при высоких температурах и низких сжимающих давлениях. Показано, что игнорирование вклада излучения приводит к существенной ошибке (до 46% при давлении 0.14 МПа и температуре 1073 К).

Достоверность положения подтверждается сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на оригинальных установках.

Третье научное положение – исследование совместного влияния анизотропии свойств композитов и микрогеометрии контакта на величину контактного термического сопротивления. Положение обосновано в главе 6 (раздел 6.12) диссертации. Впервые, для элементов авиационных двигателей, 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.

Достоверность положения подтверждается серией из более чем 2500 вычислительных экспериментов и верификацией на экспериментальных данных.

Четвертое научное положение – нейросетевая модель для быстрого прогнозирования коэффициента термического сопротивления. Положение обосновано в главе 8 диссертации. Разработана и верифицирована нейросетевая модель (RBF, BP-ANN) для быстрого прогнозирования КТС с погрешностью до 2.5%. Достоверность положения подтверждается обучением на 10000 синтетических примеров и тестированием на независимой выборке. Однако возникает вопрос о представительности выборки и границах применимости нейросетевой модели за пределами диапазонов параметров, использованных при обучении (экстраполяция). Рекомендуется уточнить методику оценки границ применимости модели.

Пятое научное положение – комплексная методика расчета КТС, объединяющая измерение, конечно-элементное моделирование и машинное обучение. Положение обосновано в главах 3-8 диссертации. Методика позволяет снизить неопределённость в расчётах КТС до уровня  $\leq 7\%$ . Достоверность положения подтверждается успешной оптимизацией контактных узлов в двух значимых объектах техники (ЖРД малой тяги и ГТД), что подробно изложено в главе 9.

### **Анализ новизны проведенных исследований**

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, машинном обучении и экспериментальной верификации модели.

**Впервые разработано:**

- Методика создания цифровых двойников микрорельефа поверхности, объединяющая два взаимодополняющих алгоритма фильтрации: метод вершин и метод локальных экстремумов. В отличие от традиционных статистических и гауссовых моделей, предложенный подход сохраняет топологические особенности реальной поверхности.

- Комплексная теоретическая модель контактного теплообмена, интегрирующая механику контакта, теплопередачу через пятна контакта, межконтактную среду и лучистый теплообмен. Установлено, что при высоких температурах (до 1073 К) и низких сжимающих давлениях (0,14 МПа) в вакуумной среде вклад излучения может достигать 46%.

- Методика параметризации углов ориентации волокон при моделировании композитных материалов, что позволило выявить оптимальные углы армирования углеродных композитов для минимизации термического сопротивления.

- Нейросетевая модель для быстрого прогнозирования КТС на основе 10000 виртуальных экспериментов, выполненных методом конечных элементов. Принципиальное отличие заключается в использовании синтетических данных высокой достоверности в качестве обучающей выборки.

- Методики оптимизации конструкции замкового соединения керамических лопаток с металлическим диском газотурбинного двигателя и камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги с композитной оболочкой.

**Известно ранее:**

- Фундаментальные работы Попова, Шлыкова, Малькова, Купера, Микича, Йовановича, Томаса и Проберта заложили основу для прогнозирования теплопереноса в контактных зонах.

- Фрактальные модели Вейерштрасса–Мандельброта применялись для описания микрогеометрии поверхностей.

- Методы конечных элементов использовались для моделирования контактного взаимодействия.

- Нейронные сети применялись для решения обратных задач теплопроводности.

Новизна полученных результатов и выводов оценивается на момент их опубликования. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 75 печатных работах, 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.

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

Для науки:

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

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

- Установлена роль лучистого теплообмена в контактных соединениях космических аппаратов.

- Создана методология, сочетающая физическое экспериментальное исследование, многоуровневое численное моделирование и современные методы искусственного интеллекта.

Для практики:

- Разработанные методики позволяют повысить точность прогнозирования теплового состояния КА и его высоконагруженных в тепловом отношении элементов, в том числе, на этапе возвращения на Землю со второй космической скоростью, тепловых режимов и ресурса газотурбинных двигателей, оптимизировать конструкции камер сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги с композитными элементами, улучшить тепловую защиту возвращаемых аппаратов КА, повысить эффективность отвода избыточного тепла от оборудования

целевого назначения, компонентов систем энергоснабжения, ориентации и пр., работающих в условиях космического вакуума.

- Экономический эффект от внедрения разработанных методик и решений проявляется в сокращении времени и трудовых ресурсов за счет снижения количества итераций при проведении проектных расчетов на этапе разработки проекта космического аппарата, сокращения материально-технических затрат на реализацию резервирующих технических решений для парирования отрицательных эффектов, вызванных технической неопределенностью при создании новой техники, повышении ресурса и надежности теплонагруженных узлов и агрегатов, снижении материалоемкости конструкций.

### **Практическое использование результатов**

В диссертации приведены сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов. Практическая значимость работы подтверждена успешной оптимизацией контактных узлов в двух значимых объектах:

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

- Для замкового соединения керамической лопатки и металлического диска газотурбинного двигателя выполнена оценка теплонапряжённого состояния с учётом анизотропии свойств композита и реального контактного термического сопротивления.

- Результаты исследований внедрены в учебные дисциплины МАИ «Современные программные средства теплового проектирования», «Контактный теплообмен в элементах и агрегатах атмосферных и космических ЛА», «Контактные задачи теплообмена», «Нейросетевые вычислительные технологии в задачах теплотехники», «Проектирование информационных сетей тепловых процессов».

- Результаты работы многократно докладывались на российских и международных научных конференциях. Материалы диссертации опубликованы в 75 печатных работах, 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.

### **Рекомендации по использованию результатов**

Результаты диссертационных исследований рекомендуется использовать:

- при разработке средств отвода избыточного тепла от высокотемпературных элементов ракетных двигателей, атомных энергоустановок, радиоэлектронной аппаратуры
- при проведении адаптации теплонапряженного оборудования, расположенного вне гермоотсеков космических аппаратов и функционирующего в вакууме;
- элементов работающих в вакууме прецизионных механических систем космических аппаратов;
- тепловом проектировании радарных установок наземного и космического назначения
- разработке способов установки приборов и оборудования, функционирующих вне пределов диапазонов рабочих температур теплопроводных прокладок-заполнителей;
- конструировании мест сопряжения элементов конструкции с теплозащитной и/или теплоограждающей системой космического или наземного (напланетного) объекта.

### **Соответствие критериям ВАК**

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям:

Соответствие поставленных целей и полученных результатов. Цель диссертационной работы – создание средств математического моделирования контактного термического сопротивления, на основе разработки комплексных, физически обоснованных методов моделирования и верификации, обеспечивающих заданные тепловые режимы в перспективных энергоустановках. Все поставленные задачи решены, результаты соответствуют цели.

Соответствие содержания автореферата и содержания диссертации. Автореферат диссертации адекватно отражает основное содержание и результаты

исследований, изложенных в диссертационной работе. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы четко и соответствуют материалам глав диссертации. Структура автореферата соответствует требованиям ВАК.

**Соответствие содержания диссертации и содержания опубликованных работ.** Основные научные результаты диссертации соискателя опубликованы в научных изданиях. По докторской диссертации результаты опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, внесенных в Перечень журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией. В диссертации соблюдаются требования к ссылкам на автора и источник, откуда заимствуются материалы или отдельные результаты.

**Соответствие темы диссертации и научной специальности.** Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту научной специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника». Исследования направлены на развитие теории теплообмена, разработку методов расчета тепловых режимов, изучение теплофизических свойств материалов и контактных взаимодействий.

### **Замечания по диссертационной работе**

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

- В главе 6 диссертации дано большое количество данных по зависимости КТС от различных факторов, и данные верные их интерпретации, но на рис. 6.1., 6.7, 6.9 имеются опечатки в части обозначения кривых зависимостей контактных термических сопротивлений  $t$ .
- В главе 8 при описании нейросетевой модели недостаточно подробно описаны границы применимости модели за пределами диапазонов параметров, использованных при обучении (экстраполяция).
- В главе 9 количественная оценка повышения ресурса в часах или циклах нагружения для конкретных изделий (ЖРД малой тяги, ГТД) приведена недостаточно подробно. Рекомендуется уточнить методику перевода снижения термонапряжений в процентное увеличение ресурса.
- Язык и стиль диссертации в целом соответствуют требованиям, однако встречаются отдельные стилистические неточности и опечатки.

### **Оценка языка и стиля**

Диссертация написана грамотным научным языком, стиль изложения соответствует требованиям к докторским диссертациям. Терминология используется корректно, ссылки на литературные источники оформлены в соответствии с требованиями. Автореферат составлен четко, основные результаты сформулированы ясно и доступно. Структурно-содержательное оформление выводов демонстрирует умение соискателя систематизировать результаты проведенного исследования.

### **Заключение**

Диссертационная работа **Ежова Алексея Дмитриевича** представляет собой самостоятельное завершённое научное исследование, в котором разработаны теоретические основы и представлены результаты, образующие целостный научный вклад в виде создания комплексных методов моделирования контактного теплообмена. Данные результаты имеют существенное практическое значение для предприятий аэрокосмической отрасли. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Результаты, выносимые на защиту, являются обоснованными и достоверными, все полученные выводы научно обоснованы. Основные положения достаточно полно представлены в научных публикациях. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Таким образом, диссертационная работа **Ежова Алексея Дмитриевича** «Комплексные методы решения задач контактного теплообмена для энергоэффективного управления тепловыми режимами» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора технических наук, профессора **Молчанова Александра Михайловича**, содержащей новое решение актуальной научной задачи – разработки комплексной методологии моделирования и прогнозирования контактного термического сопротивления с учетом реальной микрогеометрии поверхностей, анизотропии свойств материалов и лучистого теплообмена, имеющей существенное значение для специальности 1.3.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Учитывая изложенное выше, диссертационная работа **Ежова Алексея Дмитриевича** удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявленным к диссертациям на соискание ученой степени

доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании секции №1 научно-технического совета ПАО РКК «Энергия» «25» марта 2026 г. Протокол заседания № 8

Главный научный сотрудник,  
отдела аэрогазодинамики,  
доктор физико-математических наук



Алексей Кириллович Алексеев

141070, Московская область  
г.Королёв, ул. Ленина, д.4А,  
ПАО «РКК «Энергия»  
[Aleksey.alekseev@rsce.ru](mailto:Aleksey.alekseev@rsce.ru)  
+7-916-846-81-51

Ведущий научный сотрудник  
отдел проектирования и интеграции  
научных аппаратурных комплексов  
доктор технических наук



Роман Александрович Евдокимов  
141070, Московская область  
г.Королёв, ул. Ленина, д.4А,  
ПАО «РКК «Энергия»  
[post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
(495)-513-79-42

Ведущий научный сотрудник,  
отдел по тепловому проектированию  
космических аппаратов,  
кандидат технических наук



Прохоров Юрий Максимович  
141070, Московская область  
г.Королёв, ул. Ленина, д.4А,  
ПАО «РКК «Энергия»  
[post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
+7-915-145-28-67

Подписи А.К. Алексеева и Р.А. Евдокимова,  
Ю.М. Прохорова заверяю  
ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия»,  
доктор физико-математических наук



Ольга Николаевна Хатунцева

Созывом сессии  
№ 04.26 [Signature] / [Signature] [Signature]