

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертационную работу 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**

На основе изучения диссертационной работы и опубликованных работ соискателя по теме диссертации считаю необходимым отметить следующее.

**Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Ежова А.Д. посвящена разработке комплексных методов решения задач контактного теплообмена в узлах теплонагруженных технических систем. Рассматриваемая проблема имеет существенное научное и практическое значение, поскольку в реальных конструкциях теплопередача между деталями практически всегда происходит через поверхности с микронеровностями, промежуточными зазорами, покрытиями и средами, а также при наличии механической нагрузки, температурных градиентов, анизотропии свойств и эксплуатационного изменения состояния контакта.

Контактная тепловая проводимость и обратная ей величина - контактное термическое сопротивление - являются одними из ключевых параметров, определяющих достоверность расчета теплового состояния изделий авиационной, ракетно-космической, энергетической, электронной и машиностроительной техники. Особую сложность представляют контакты разнородных материалов, в том числе металлов с композиционными и керамикоматричными материалами, а также соединения, работающие при высоких температурах, пониженных давлениях, в вакууме, инертных газах и при циклическом нагружении. В таких условиях использование упрощенных эмпирических зависимостей для тепловой контактной проводимости может приводить к значительной неопределенности в расчетах теплового и напряженно-деформированного состояния.

Поставленная автором цель - разработка научно-методического и инструментального обеспечения для многопараметрического моделирования, анализа и оптимизации контактного теплообмена в ответственных узлах перспективных энергоустановок - соответствует современному направлению развития расчетно-экспериментальных методов теплофизики и теоретической теплотехники. Работа ориентирована не только на развитие моделей контактного теплообмена, но и на их применение в инженерных расчетах, включая конечно-элементное моделирование, построение цифровых двойников микрорельефа поверхности и использование нейросетевых моделей для оперативного прогнозирования характеристик контакта. В связи с этим тема диссертации является актуальной.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ  
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ  
ДОКУМЕНТОВ МАИ

## Структура и содержание работы

Диссертация изложена на 491 странице и состоит из введения, девяти глав, заключения, списка обозначений, библиографии и двух приложений. Библиография включает 456 наименований. Структура работы в целом логична и соответствует последовательности решения поставленных задач: от анализа состояния проблемы и постановки задач до разработки расчетно-экспериментальных методов, их верификации и демонстрации на прикладных задачах теплонагруженных конструкций.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, представлены положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, степень достоверности и сведения об апробации результатов.

В первой главе выполнен анализ областей применения расчетов контактного теплообмена в теплонагруженных узлах энергетических установок. Автор показывает, что контактные сопротивления оказывают влияние на тепловое состояние газотурбинных двигателей, теплообменных аппаратов, ядерно-энергетических установок, систем накопления энергии, жидкостных ракетных двигателей малой тяги, космических аппаратов, элементов тепловой защиты, микроэлектроники и транспортных систем. Рассмотрение столь широкого круга приложений позволяет обосновать необходимость универсального расчетно-экспериментального подхода к оценке тепловой контактной проводимости.

Во второй главе приведен обзор теоретических и расчетных подходов к определению контактной термической проводимости и контактного термического сопротивления. Рассмотрены механизмы теплопередачи через реальные пятна контакта, через промежуточную среду и за счет излучения, а также основные ограничения классических аналитических моделей. Автор обоснованно делает вывод о необходимости комплексного подхода, сочетающего детальное описание микрогеометрии поверхности, механики контакта и теплопередачи.

Третья глава посвящена построению геометрической модели микрорельефа. Предложены методы формирования цифрового двойника поверхности по данным профилометрии, в том числе метод вершин и метод локальных экстремумов. Рассмотрено использование фрактальной модели Вейерштрасса-Мандельброта, расчет параметров фрактальной размерности и масштабного коэффициента, а также сопоставление построенных поверхностей по параметрам шероховатости и относительной опорной кривой. Данный раздел является одним из центральных в работе, поскольку от корректности восстановления микрорельефа зависит последующее определение фактической площади контакта и тепловой контактной проводимости.

В четвертой главе рассматривается механика контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. Предложена расчетная схема определения фактической площади контакта на основе геометрических моделей поверхностей, анализа пересечения микронеровностей, выделения контактных пятен и оценки режимов деформирования. Приведены результаты конечно-элементного моделирования контакта шероховатых поверхностей с учетом давления, параметров сетки и размеров расчетной области.

Пятая глава посвящена формулировке тепловой задачи контактного теплообмена. Автор рассматривает вклад теплопроводности через фактические пятна контакта, теплопередачи через промежуточную среду и лучистого теплообмена в межконтактных зазорах. Приведены аналитические соотношения и конечно-элементные постановки, позволяющие определять контактное термическое сопротивление на основе цифрового двойника поверхности.

В шестой главе выполнен обширный параметрический анализ факторов, влияющих на контактное термическое сопротивление. Рассмотрено влияние шероховатости, контактного давления, теплопроводности материалов, температуры, излучения, промежуточных сред, покрытий, циклического нагружения, низких температур и анизотропии теплопроводности композиционных материалов. Представленные результаты показывают, что вклад отдельных механизмов теплопередачи существенно зависит от совокупности условий контакта, а не может быть надежно оценен по одному изолированному параметру.

Седьмая глава содержит описание экспериментальных установок и методик определения контактного термического сопротивления в атмосферных условиях и в контролируемых средах. Приведены конструктивные схемы установок, система измерения температур, давления и силы прижима, методики обработки результатов стационарного и нестационарного экспериментов, а также оценка погрешности измерений. Экспериментальная часть является важным элементом работы, поскольку обеспечивает базу для верификации расчетных моделей.

В восьмой главе рассматривается применение методов искусственного интеллекта к задачам контактного теплообмена и обратным тепловым задачам. Автор использует синтетические данные, полученные на основе конечно-элементного моделирования, для обучения нейросетевых моделей, предназначенных для быстрого прогнозирования тепловых характеристик контакта.

В девятой главе приведена практическая реализация разработанных подходов при решении задач теплового и прочностного анализа узлов жидкостного ракетного двигателя малой тяги и газотурбинного двигателя. Рассмотрены контактные соединения разнородных материалов, включая пары с керамикоматричными и металлическими материалами, проведена оптимизация геометрии и условий контакта. Данный раздел демонстрирует

инженерную направленность диссертации и возможность использования разработанных моделей в расчетно-конструкторской практике.

### **Научная новизна, обоснованность и достоверность результатов**

К наиболее значимым научным результатам диссертации следует отнести разработку методики построения цифровых двойников микрорельефа контактирующих поверхностей по данным профилометрии; развитие расчетного подхода к определению фактической площади контакта и контактного термического сопротивления на основе восстановленной микрогеометрии; учет в единой постановке механики контакта, теплопередачи через пятна фактического контакта, теплопередачи через промежуточную среду, лучистого теплообмена и анизотропии теплофизических свойств материалов; получение расчетно-экспериментальных данных о влиянии температуры, давления, шероховатости, покрытий, циклического нагружения и ориентации слоев композиционных материалов на тепловую контактную проводимость; разработку нейросетевых моделей для быстрого прогнозирования тепловых характеристик контакта; применение предложенных подходов к задачам оптимизации теплонагруженных элементов ракетно-космической и газотурбинной техники.

Достоверность основных результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов теплопроводности, теплового излучения, механики деформируемого твердого тела и численных методов конечных элементов; сопоставлением расчетных результатов с известными аналитическими зависимостями, литературными и собственными экспериментальными данными; проведением параметрических расчетов в широком диапазоне давлений, температур, шероховатостей и свойств материалов; разработкой и использованием экспериментальных установок для определения контактного термического сопротивления; анализом погрешностей измерений.

Следует отметить, что работа имеет ярко выраженный комплексный характер. Автор не ограничивается построением одной расчетной модели, а последовательно рассматривает цепочку «измерение микрогеометрии - построение цифрового двойника поверхности - механический расчет контакта - тепловой расчет - экспериментальная проверка - нейросетевое обобщение - инженерное применение». Именно эта связка расчетных, экспериментальных и алгоритмических средств определяет основной научный и практический результат диссертации.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость диссертации состоит в развитии методов моделирования контактного теплообмена с учетом реальной микрогеометрии поверхностей и многофакторной природы теплопередачи в зоне контакта. Полученные автором результаты расширяют представления о влиянии микрорельефа, фактической площади контакта, межконтактных зазоров,

лучистого теплообмена, промежуточных сред и анизотропии материалов на величину контактного термического сопротивления.

Практическая значимость результатов определяется возможностью их применения при тепловом и теплопрочностном проектировании узлов, в которых контактные сопротивления оказывают определяющее влияние на температурное поле и напряженно-деформированное состояние конструкции. Представленные методики могут быть использованы при расчетах соединений металлов с композиционными материалами, контактных узлов газотурбинных двигателей, элементов жидкостных ракетных двигателей малой тяги, соединений с покрытиями, а также в задачах, где требуется повысить достоверность задания граничных условий теплопередачи в расчетных моделях.

Отдельно следует отметить практическую ценность созданных экспериментальных установок и программных средств для построения цифровой микрогеометрии и расчета контактной термической проводимости. Такие инструменты позволяют перейти от условного задания контактной проводимости к более обоснованному определению этого параметра с учетом технологического состояния поверхности и условий эксплуатации.

### **Публикации и апробация**

Основные результаты диссертации опубликованы в значительном числе работ по теме исследования. Согласно сведениям, приведенным в диссертации, материалы опубликованы в 75 печатных работах, включая статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК или приравненных к ним по научной специальности диссертации, публикации в изданиях, индексируемых международными базами, тезисы и материалы научных конференций. Кроме того, в перечень результатов включены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Выборочное ознакомление с опубликованными работами по теме диссертации показывает, что основные положения исследования отражены в публикациях, посвященных построению трехмерной модели микрорельефа поверхности, определению фактической площади контакта, влиянию лучистого теплообмена на контактное термическое сопротивление в вакууме, моделированию контактного взаимодействия при циклическом нагружении, оценке влияния анизотропии и применению нейросетевых моделей к задачам контактного теплообмена. Результаты докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, что свидетельствует об апробации основных положений работы в научном сообществе.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В работе предложена методика построения цифрового двойника поверхности преимущественно на основе профилограмм. При этом для последующих контактных расчетов существенно важны не только параметры

$R_a$ ,  $R_q$  и относительная опорная кривая, но и пространственная корреляция неровностей, спектральный состав микрорельефа, асимметрия и эксцесс распределения высот, а также направленность следов обработки. В диссертации желательно было бы подробнее обосновать, в каких пределах реконструированная по профилограмме трехмерная поверхность эквивалентна реальной поверхности для задач определения фактической площади контакта и тепловой контактной проводимости.

2. Параметры фильтрации микрорельефа в методе вершин и методе локальных экстремумов имеют в значительной мере эмпирический характер. Между тем в главе 6 показано, что выбор параметров фильтрации заметно влияет на расчетную величину контактного термического сопротивления. Поэтому в работе следовало бы более строго сформулировать критерий выбора этих параметров для разных типов поверхности и оценить вклад процедуры фильтрации в итоговую неопределенность расчета.

3. В разделе, посвященном механике контактного взаимодействия, результаты указывают на существенную роль пластических деформаций микровыступов, а в ряде примеров фактически все контактные пятна отнесены к пластическому режиму. При этом конечно-элементная постановка местами описывается как линейно-упругая задача малых деформаций. Представляется необходимым более четко согласовать используемые механические предпосылки с выводами о пластическом деформировании, а также подробнее описать применяемые диаграммы деформирования, критерии перехода к пластичности, упрочнение и температурную зависимость механических свойств материалов.

4. Один из важных результатов диссертации связан с учетом лучистого теплообмена в межконтактных зазорах и показанным значительным вкладом излучения при высоких температурах и малых давлениях. Вместе с тем в работе хотелось бы видеть более подробное описание используемых значений коэффициентов излучения, угловых коэффициентов, допущений о шероховатости поверхностей, температурной и спектральной зависимости излучательных свойств, а также границ применимости принятых приближений. Особенно это важно потому, что в тексте обсуждаются как классические, так и ближнепольные механизмы радиационного теплообмена.

5. При анализе теплопередачи через промежуточную среду используются усредненные характеристики межконтактного зазора. Такой подход удобен для инженерных расчетов, однако реальный зазор имеет существенно неоднородное распределение по площади контакта. Для газовых сред при малых зазорах и изменении давления могут становиться существенными эффекты разрежения, аккомодации, локальной температуры газа, а также ограничения, связанные с химической активностью среды при высоких температурах. Эти обстоятельства следовало бы обсудить подробнее при формулировке области применимости предложенной методики.

6. В восьмой главе рассматривается применение нейросетевых моделей для прогнозирования тепловых характеристик контакта. Однако обучающая

выборка в значительной степени формируется на основе синтетических данных конечно-элементного моделирования. В таком случае нейросеть в первую очередь аппроксимирует исходную расчетную модель и наследует ее допущения. Желательно было бы подробнее представить структуру обучающей и тестовой выборок, диапазоны изменения параметров, способы нормировки, архитектуры сетей, критерии остановки обучения, проверку на независимых экспериментальных данных и поведение модели за пределами обучающего диапазона.

7. Экспериментальная часть работы является важным достоинством диссертации, однако оценка неопределенности могла бы быть представлена более развернуто. Помимо погрешностей измерения температуры, расстояний между термопарами и теплопроводности материалов, существенное влияние на тепловую контактную проводимость могут оказывать боковые теплотери, радиационные потери, неоднородность теплового потока, погрешность задания силы прижима, состояние поверхности после нагрева и циклов нагружения, а также контактные сопротивления в элементах самой экспериментальной установки. Более детальный бюджет неопределенности повысил бы убедительность заявленного уровня погрешности 5-7%.

8. Практические разделы диссертации содержат сильные инженерные выводы, в том числе о снижении напряжений в теплонагруженных узлах, повышении ресурса и сокращении неопределенности расчетов. При этом часть таких результатов носит расчетно-прогнозный характер. В работе было бы полезно более отчетливо отделить результаты, непосредственно подтвержденные экспериментом, от результатов, полученных расчетным путем для конкретных моделей и граничных условий, а также указать требования к дальнейшей стендовой или эксплуатационной верификации предлагаемых решений.

9. В тексте встречаются отдельные редакционные и формальные неточности.

### **Заключение**

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Ежова Алексея Дмитриевича представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой решена крупная научно-техническая задача разработки комплексных расчетно-экспериментальных методов определения и прогнозирования контактного термического сопротивления для энергоэффективного управления тепловыми режимами теплонагруженных конструкций.

Полученные автором результаты обладают научной новизной, обоснованы теоретически и подтверждены расчетными, экспериментальными и сравнительными данными. Работа имеет существенную практическую значимость для проектирования узлов авиационной, ракетно-космической и энергетической техники, содержащих контактные соединения разнородных материалов и работающих в сложных тепловых и механических условиях.

