

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: 24.2.327.06

Соискатель: Ежов Алексей Дмитриевич

Тема диссертации: Комплексные методы решения задач контактного теплообмена для энергоэффективного управления тепловыми режимами

Специальность: 1.3.14. – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации.

На заседании 27 мая 2026 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, приведенным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Ежову Алексею Дмитриевичу ученую степень доктора технических наук.

Присутствовали: председатель диссертационного совета Равикович Ю.А., ученый секретарь диссертационного совета Краев В.М., члены диссертационного совета: Агульник А.Б., Абашев В.М., Иванов А.В., Кочетков Ю.М., Молчанов А.М., Мякочин А.С., Надирадзе А.Б., Ненарокомов А.В., Никитин П.В., Силюянова М.В., Тимушев С.Ф., Хартов С.А.

Проректор по научной работе МАИ

д.т.н., доцент



А.В.Иванов

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.06,

д.т.н., доцент

В.М.Краев

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.06,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27 мая 2026 г. № 135

О присуждении Ежову Алексею Дмитриевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Комплексные методы решения задач контактного теплообмена для энергоэффективного управления тепловыми режимами» по специальности 1.3.14. — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» принята к защите 25.02.2026 г., (протокол заседания № 130) диссертационным советом 24.2.327.06, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; приказ Минобрнауки РФ о создании диссертационного совета — 669/нк.

Соискатель Ежов Алексей Дмитриевич, 1991 года рождения. В 2014 году окончил с отличием Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский авиационный институт (государственный технический университет) по специальности «Авиационная и ракетно-космическая теплотехника». В 2017 году досрочно окончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию «Тепловые процессы в контактных соединениях жидкостных ракетных двигателей малой

тяги» по специальности 01.04.14. – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (диплом КНД №039315). В период подготовки докторской диссертации работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в должностях доцента и научного сотрудника кафедры 204 «Авиационно-космическая теплотехника».

Диссертация выполнена на кафедре 204 «Авиационно-космическая теплотехника» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный консультант – Молчанов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, работает в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в должности профессора кафедры 204 «Авиационно-космическая теплотехника».

Официальные оппоненты:

Лившиц Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Попов Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань.

Мурашов Михаил Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры РК9 «Компьютерные системы автоматизации производства» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Все оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия», 141070, Московская область, г. Королёв, ул. Ленина, д. 4А) – представила положительный отзыв, подписанный главным научным сотрудником отдела аэрогазодинамики, доктором физико-математических наук Алексеевым А.К., ведущим научным сотрудником отдела проектирования и интеграции научных аппаратурных комплексов, доктором технических наук Евдокимовым Р.А., ведущим научным сотрудником отдела по тепловому проектированию космических аппаратов, кандидатом технических наук Прохоровым Ю.М. и утвержденный генеральным конструктором, заместителем генерального директора, доктором технических наук, академиком РАН Соловьёвым В.А.

В отзыве ведущей организации указано, что 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.

По результатам рассмотрения делается вывод, что 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», удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждения ученых степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Ежов Алексей Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по названной специальности.

Отзыв ведущей организации составлен на основании заседания секции №1 научно-технического совета ПАО РКК «Энергия» 25 марта 2026 года, протокол заседания №8.

По теме диссертации соискателем опубликованы 75 научных работ, в том числе 25 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, и приравненных к ним по научной специальности диссертации (из них 5 входят в перечень ВАК, а 13 – в базы данных Scopus/WoS) и 7 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, по смежным научным специальностям. Кроме того, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Научные работы соискателя посвящены различным аспектам моделирования контактного теплообмена и управления тепловыми режимами в энергетических установках, в том числе разработке комплексных методов моделирования и прогнозирования контактного термического сопротивления с учетом реальной микрогеометрии поверхностей, анизотропии свойств материалов и лучистого теплообмена, созданию моделей восстановления микрогеометрии контактирующих поверхностей, разработке и верификации нейросетевых моделей прогнозирования контактных термических сопротивлений, трехмерному конечно-элементному термо-механическому анализу контактных узлов, а также прикладным исследованиям по оптимизации тепловых режимов в теплонапряженных конструкциях.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах.

Наиболее значимые работы:

Статьи в рецензируемых изданиях Перечня ВАК, соответствующих научной специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (технические науки):

1. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю., Богачев Е.А., Разина А.С. Доработка и оптимизация элементов конструкции с учетом тепловых деформаций // Тепловые процессы в технике. 2015. № 11. С. 510–516. (0,4 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 2739). Личный вклад автора заключается в построении термомеханической модели контакта, проведении анализа влияния тепловых деформаций и формулировании рекомендаций по оптимизации геометрии узлов.

2. Киселев В.П., Ежов А.Д., Селиверстов С.Д., Быков Л.В., Сотник Е.В. Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 7. С. 329–334. (0,35 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 2739). Личный

вклад автора — разработка методики экспериментального определения анизотропии, анализ влияния технологии аддитивного производства на КТС.

3. Ежов А.Д., Полянский А.Г. Исследование применимости охлаждающего контура реактивного двигателя в целях повышения его термодинамической эффективности // *Тепловые процессы в технике*. 2023. Т. 15. № 7. С. 325–331. (0,4 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 2739). Личный вклад автора — моделирование тепловых потоков с учётом КТС, анализ эффективности регенеративного охлаждения.

4. Григоровский В.В., Котович И.В., Ежов А.Д., Сучкова П.И. Особенности процессов термогазодинамики и теплообмена на поверхности лопаток турбин ГТД // *Тепловые процессы в технике*. 2025. Т. 17. № 1. С. 12–18. (0,35 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 2739). Личный вклад автора — моделирование теплообмена на поверхности лопатки с учётом микронеровностей, анализ влияния КТС на эффективность охлаждения.

5. Ежов А.Д., Шилов М.С., Еремкина М.С., Светличная Е.В., Киселёв В.П. Исследование теплопроводности оксидного покрытия, сформированного на материале подложки AlSiMg // *Тепловые процессы в технике*. 2025. Т. 17. № 7. С. 313–320. (0,5 п.л., перечень ВАК(К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 2739). Личный вклад автора — постановка эксперимента, моделирование теплового контакта с учётом покрытия, анализ влияния микроструктуры на КТС.

Статьи в периодических изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Scopus/WoS):

6. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, S.Yu. Mesnyankin. Numerical Method for Determining the Real Contact Area of Contacting Bodies // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018. Vol. 12, Issue 5. P. 914–917. (0,25 п.л., Scopus, Web of Science). Личный вклад автора —

формулировка численной модели, подготовка данных и реализация метода определения площади контакта

7. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, S.V. Reznik. Effect of radiation on the contact thermal resistance in vacuum // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 927. 012076. (0,2 п.л., Scopus). Личный вклад автора — численное моделирование вклада лучистого теплообмена в общий КТС, исследование зависимости от температуры и давления в условиях вакуума.

8. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, N.S. Golikov. Assessment of the influence of contact surface roughness on thermal conductivity // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971. 042047. (0,2 п.л., Scopus). Личный вклад автора — анализ связи между параметрами шероховатости и эффективной теплопроводностью, валидация модели на синтетических данных.

9. Talalaeva P., Bykov L., Ezhov A. Investigation of the thermal characteristics of a metal-anisotropic composite contact pair // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1990. 012010. (0,25 п.л., Scopus). Личный вклад автора — постановка задачи моделирования теплового контакта между металлом и анизотропным композитом, разработка конечно-элементной модели с учётом ориентации армирующих волокон, выполнение численных расчётов и анализ влияния угла укладки на величину контактного термического сопротивления.

10. Bykov L.V., Ezhov A.D. Experimental Study of the Anisotropy of the Heat-Conducting Properties of SAE 316L Stainless Steel Samples Obtained by Additive Technology // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2503. 020007. (0,2 п.л., Scopus, Web of Science). Личный вклад автора — проведение экспериментов на специально разработанной установке, обработка данных и обобщение результатов по анизотропии аддитивных металлов.

11. Ezhov A.D., Bykov L.V., Krylova Yu.A. Determination of the contact area under cyclic loading of contact pairs of isotropic materials on the basis of 3D

surface microrelief modelling // PNRPU Mechanics Bulletin. 2022. № 4. P. 163–169. (0,45 п.л., Scopus). Личный вклад автора — разработка методики моделирования циклического нагружения контактных пар, построение трёхмерной модели микрорельефа на основе экспериментальных профилограмм, численное моделирование эволюции площади фактического контакта при многократном сжатии и разгрузке, а также верификация результатов с использованием данных собственных экспериментов.

12. Ezhov A.D., Bykov L.V., Kiselev V.P., Talalaeva P.I., Kotovich I.V., Platonov I.M. Prediction of thermal properties of solid contact // Russian Journal of Nonlinear Dynamics. 2024. Vol. 20. № 4. P. 601–617. (0,8 п.л., Scopus). Личный вклад автора — разработка и обучение нейросетевой модели прогнозирования КТС на основе синтетических данных, интеграция с цифровым двойником поверхности.

13. Molchanov A.M., Yanyshv D.S., Ezhov A.D., Bykov L.V. Solution of the inverse problem of heat conduction using neural networks // Heat Transfer Research. 2025. Vol. 56. Issue 7. P. 1–12. (0,7 п.л., Scopus, Web of Science). Личный вклад автора — адаптация нейросетевой модели для решения обратной задачи теплопроводности, подготовка обучающей выборки и валидация модели.

14. A.D. Ezhov, L.V. Bykov, N.V. Artemchuk. Related problems of designing heat-loaded structures from ceramic matrix // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 683. 012083. (0,3 п.л., Scopus). Личный вклад автора — исследование термомеханического поведения керамоматричных композитов, моделирование КМК–металлических контактов.

15. L.V. Bykov, A.D. Ezhov. Three-dimensional modeling microgeometry of contact pairs in technical systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 709. 022057. (0,2 п.л., Scopus). Личный вклад автора — разработка трёхмерной модели микрорельефа, программная реализация генератора цифрового двойника поверхности.

16. Martynyuk L.A. et al. The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1060. 012026. (0,3 п.л., Scopus). Личный вклад автора — термический анализ композитного рабочего колеса с учётом КТС и анизотропии.

17. Bykov L.V., Martynyuk L.A., Ezhov A.D. et al. Thermal Analysis of a Composite Centrifugal Compressor Impeller // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2022. Vol. 95. P. 625–635. (0,5 п.л., Scopus, Web of Science). Личный вклад автора — моделирование нестационарного теплообмена, учёт неидеальности контактных узлов.

18. Ezhov A.D., Kotovich I.V., Kiselev V.P. Influence of additive manufacturing technology of topologically optimized products from photopolymer resins on the anisotropy of their mechanical properties // PNRPU Mechanics Bulletin. 2024. № 2. P. 16–23. (0,5 п.л., Scopus). Личный вклад автора — экспериментальное и численное исследование анизотропии механических свойств, анализ влияния на тепловое сопротивление.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК по смежным специальностям:

19. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 5. С. 65–74. (0,5 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 1339). Личный вклад автора заключается в разработке методики трехмерного моделирования микрогеометрии контактирующих поверхностей, проведении конечно-элементного анализа и верификации результатов на основе экспериментальных данных.

20. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал C-Si-C и титановый сплав // Труды МАИ. 2015. № 82. (0,6 п.л., перечень ВАК (К1) по состоянию 25.11.2025 г., п. 2825).

Личный вклад автора — самостоятельное выполнение моделирования контактного теплообмена для металло-композитного сопряжения, анализ влияния различий в КТР и разработка методики расчёта КТС.]

21. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю. Моделирование шероховатых поверхностей для контактных задач с композиционными материалами // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. № 2. С. 272–281. (0,5 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п. 1759).
Личный вклад автора — разработка алгоритма реконструкции микрорельефа по профилограммам, адаптация модели для композитов и выполнение верификационных расчётов.

22. Ежов А.Д. Численное решение задачи контактного взаимодействия шероховатых поверхностей энергетических установок // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 68–79. (0,7 п.л., перечень ВАК(К1) по состоянию на 25.11.2025 г., п.567).
Личный вклад автора — разработка конечно-элементной модели шероховатого контакта, исследование зависимости реальной площади контакта от прижимного давления и микрогеометрии.

23. Быков Л.В., Ежов А.Д. Оптимизация конструкции теплонапряжённой энергетической установки на основании теплопрочностного расчёта // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 11. С. 483–486. (0,25 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п.182).
Личный вклад автора — выполнение сопряжённого термопрочностного расчёта, анализ напряжённо-деформированного состояния с учётом КТС.

24. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Численный метод определения фактической площади контакта соприкасающихся тел // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 9. С. 92–96. (0,4 п.л., перечень ВАК-МБД по состоянию на 31.12.2023 г., п. 926).
Личный вклад автора — разработка алгоритма фильтрации

исходных профилограмм и построение цифрового двойника микрорельефа для оценки площади контакта.

25. Ежов А.Д., Шилов М.С., Полетаев А.О., Сотник Е.В. Математическая модель и имитационный прибор стенда исследования массового расхода двухфазных криогенных потоков на основе эффекта Кориолиса // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78. № 9. С. 420–426. (0,4 п.л., перечень ВАК (К2) по состоянию на 25.11.2025 г., п.182). Личный вклад автора — разработка математической модели двухфазного течения, проектирование имитационного стенда.

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы (все отзывы положительные).

Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора технических наук, профессора Лившица Михаила Юрьевича. Отзыв заверен ученым секретарем ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Малиновской Ю.А. Отзыв положительный, содержит следующие основные замечания:

1. Из текста диссертации неясно, как полученные в главе 3 результаты геометрического моделирования микрорельефа контактирующих шероховатых поверхностей методам 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 детальна. 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 $L = \exp(-b/k)$; 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.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора технических наук, профессора Попова Игоря Александровича. Отзыв заверен начальником управления делопроизводства и контроля Бодряшкиной Д.С. Отзыв положительный, содержит следующие основные замечания:

1. Диссертация значительно перегружена обзорным материалом. Обзор посвящены главы 1 и 2, значительные части обзоров имеются и в последующих главах.

2. Использование термина цифровой двойник не соответствует ГОСТ Р 57700.37-2021. Более уместны выражения компьютерные модели, или более обыденное словосочетание – цифровая тень.

3. Насколько новые методы вершин и локальных экстремумов снижают вычислительные сложности? В чем это выражается? На сколько процентов это в итоге влияет на оценку термического сопротивления?

4. Автором диссертации предложен комплекс новых методов и подходов оценки шероховатости, термического сопротивления, однако часто не показаны рекомендации по выбору того или иного метода для конкретных задач и нет сравнительных анализов оценки параметров по предложенным методам и описанным в обзорах многочисленных методах других авторов. В чем выигрыш (требуется четкое и визуальное (графическое) обоснование)? Например, в главе 5 есть верификация, но нет сравнения с методиками других авторов, так много описанных в главе 2.

5. В главе 6, наоборот – имеются сравнения результатов расчета с других авторов, но нет сравнения с экспериментом. Насколько и кто более близок к реальным данным? См. рис.6.4-6.6. Таблица 6.1 – важный результат, но для какой модели и нет описания и ссылки на таблицу по тексту. Рис.6.2-6.4 – оценка по какой модели шероховатости? Рис.6.15 – сравнение моделей с и без учета переизлучения, но как понять, что лучше, где линия эксперимента, истинного значения?

6. Глава 7 с экспериментом незаслуженно находится в конце диссертации, а ведь именно эти результаты должны быть основой для верификации моделей и валидации результатов расчетов.

7. Погрешность экспериментального исследования контактного термического сопротивления в 14,5% – это значительная величина. Что вносит наибольший вклад в такое значение и как его далее уменьшать?

8. Не обоснован выбор конкретного нейросетевого метода среди множества аналогов. Нет сравнительного анализа, показателей достаточности выборки обучения и тестирования.

9. Дежурное замечание, что при распечатке появились некорректные переносы заголовков разделов и рисунков, пропажа ссылок на источники.

Отзыв на диссертацию официального оппонента, доктора технических наук, доцента Мурашова Михаила Владимировича. Отзыв заверен начальником отдела по организации работы единой приемной УКСИА МГТУ имени Н.Э. Баумана Киняпиной А.Н.. Отзыв положительный, содержит следующие основные замечания:

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 и R_q , но и характер распределения неровностей, неплоскостность, волнистость и особенности топографии, влияющие на замыкание поверхностей. Из текста не вполне ясно, каким образом эти факторы учитываются в итоговой модели контакта.

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 теплопотери, 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.

Отзыв на диссертацию ведущей организации – Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», содержит следующие замечания:

1. 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.

2. В главе 8 при описании нейросетевой модели недостаточно подробно описаны границы применимости модели за пределами диапазонов параметров, использованных при обучении (экстраполяция).

3. В главе 9 количественная оценка повышения ресурса в часах или циклах нагружения для конкретных изделий (ЖРД малой тяги, ГТД) приведена недостаточно подробно. Рекомендуются уточнить методику перевода снижения термонапряжений в процентное увеличение ресурса.

4. Язык и стиль диссертации в целом соответствуют требованиям, однако встречаются отдельные стилистические неточности и опечатки.

Отзыв на автореферат диссертации АО «Корпорация «Московский институт теплотехники» (МИТ), составленный начальником отдела, доктором технических наук Тихоновым Андреем Анатольевичем, содержит следующие замечания:

1. Необоснованно растянут на две главы обзор состояния вопроса определения термического сопротивления в контактных парах.

2. В описании главы 3 не понятно, чем метод локальных экстремумов отличается от существующих методов описания шероховатости контактирующих поверхностей и определения площадей контакта.

3. Во введении упоминается разработка и верификация нейросетевой модели для прогнозирования КТС, обученной на основе 8000+ виртуальных экспериментов, а в главе 8 говорится об обучении на 10 000 синтетических примеров.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), составленный доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником Полиловым Александром Николаевичем, содержит следующие замечания:

1. Для обоснования заявленного автором «нового научного направления» желательно располагать бóльшим числом единоличных публикаций в ведущих академических изданиях.

2. Построение сложных фрактальных моделей «странных аттракторов» для контактирующих поверхностей находится в противоречии с экспериментом, где можно определить лишь усреднённый коэффициент теплопроводности; разделить влияние разных параметров на основе одного типа экспериментов крайне затруднительно.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН), составленный главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, профессором РАН Пахомовым Максимом Александровичем, содержит следующие замечания:

1. В автореферате не указано разрешение и качество микрофотографий реальных шероховатых поверхностей контакта. Также не приведена оценка качества получаемых методом сплайновой интерполяции второго порядка цифровых двойников этих поверхностей.

2. Из текста не ясно, какие методы численной реализации использовались и какова точность полученных численных результатов, приведённых в главе 4 (с использованием метода конечных элементов в ANSYS Multiphysics) и в главе 5 («программа для ЭВМ»).

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» (ИжГТУ), составленный доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Тепловые двигатели и установки» Бендерским Борисом Яковлевичем, доктором физико-математических наук, доцентом, профессором кафедры «Тепловые двигатели и установки» Ветчаниным Евгением Владимировичем и доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры «Тепловые двигатели и установки» Черновой Алёной Алексеевной, содержит следующие замечания:

1. В автореферате используется термин «цифровой двойник шероховатой поверхности» для авторского алгоритма воссоздания микрорельефа, однако сущность цифрового двойника не раскрыта, показан только алгоритм восстановления рельефа и топологической структуры.

2. Уравнения (1)-(15) справедливы только для описания микрорельефа и не могут быть применены к тепловой задаче (возможно, имелось в виду, что задача расчёта контактных термических напряжений далее будет решена для восстановленного микрорельефа).

3. В автореферате хотелось бы более подробно увидеть физическую и математическую постановку задач – как взаимодействия шероховатых

поверхностей, так и задач контактного теплообмена и напряжённо-деформированного состояния анизотропных материалов.

4. В научной новизне отсутствуют количественные результаты.

5. В автореферате присутствует нарушение нумерации рисунков, не указано, для каких пар материалов получены температурные поля и поля эквивалентных напряжений.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет), составленный заведующим кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов, доктором технических наук, доцентом Болдыревым Андреем Вячеславовичем, содержит следующие замечания:

1. В седьмой главе работы представлены методы и средства экспериментального определения КТС, анализ погрешностей измерений – порядка 5–7%. В то же время в пункте 6 ЗАКЛЮЧЕНИЯ приводятся данные о разработке математической модели для быстрого прогнозирования КТС с погрешностью около 2,5%, что существенно меньше погрешности экспериментальных измерений. Не ясно, какие данные использованы в качестве эталонов для оценки точности математических прогнозов. Рассматривались ли только объекты, демонстрирующие работоспособность разработанных методов, или также объекты, имеющие особенности, потенциально создающие условия снижения точности?

2. При создании цифровых двойников микрорельефа поверхностей использована оригинальная методика на основе двух алгоритмов фильтрации. В автореферате не указаны ограничения к параметрам микрорельефа контактных поверхностей, обеспечивающие адекватность цифровых двойников.

Отзыв на автореферат диссертации «Опытно-конструкторского бюро имени А. Люльки» – филиала ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ОКБ им. А. Люльки), составленный главным специалистом по перспективным разработкам – начальником отдела многодисциплинарной оптимизации, доктором технических наук, профессором Кретининым Геннадием Валентиновичем и утверждённый первым заместителем генерального конструктора ОКБ им. А.Люльки Кузьминым М.В., содержит следующие замечания:

1. При анализе влияния циклического нагружения на КТС (гл. 6) рассматриваются в основном изотропные материалы. Для композитов, подверженных термоциклированию, хотелось бы видеть оценку изменения КТС после заданного числа циклов.

2. В нейросетевой модели (гл. 8) входными параметрами являются давление, температура, шероховатость и теплофизические свойства. Не совсем ясно, учитывается ли влияние газовой среды в межконтактном зазоре (воздух, продукты сгорания) и её давление, что может быть важно для приложений в камерах сгорания.

3. В экспериментальных установках (гл.7) для высокотемпературных измерений (до 1000°С) не указан тип используемых термопар и способ компенсации паразитных тепловых потоков через токоподводы. Впрочем, заявленная погрешность 5–7% является приемлемой для инженерных задач.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), составленный заведующим кафедрой

«Теплофизика», доктором физико-математических наук, доцентом Чирковым Алексеем Юрьевичем, содержит следующие замечания:

1. Автореферат диссертации перегружен материалами обзорного характера, относящимися к главам 1 и 2.

2. Описание влияния исследуемых параметров теплообмена и представленные иллюстрации (рис. 9–16) не дают возможности оценить вклад каждого параметра в теплообмен при комплексном тепловом и механическом нагружении контакта.

3. Из текста автореферата не ясно, рассматривалась ли взаимосвязь теплового и электрического контакта.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО «НПО Лавочкина»), составленный ведущим научным сотрудником, доктором технических наук Финченко Валерием Семёновичем, содержит следующие замечания:

1. 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.

2. 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, что виртуальная суррогатная модель КТС обучена на результатах виртуальных же экспериментов, выполненных с помощью однотипных компьютерных моделей теплового контакта, что предсказуемо способствует хорошему совпадению.

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

4. На практике в космической технике широко применяются фланцевые, резьбовые, шарнирные и другие 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.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «ОДК-Климов» (АО «ОДК-Климов»), составленный ведущим инженером-конструктором Кузнецовым Николаем Борисовичем, и.о. начальника отдела термо-газодинамических расчётов Дегтярёвым Николаем Дмитриевичем и заместителем главного конструктора по перспективным разработкам – начальником отдела, кандидатом технических наук Липиным Алексеем Владимировичем, утверждённый генеральным конструктором АО «ОДК-Климов» Е.С. Продановым, содержит следующие замечания:

1. Автор в процессе машинного обучения применяет несертифицированный (разработанный им) алгоритм, несмотря на наличие уже известных алгоритмов, используемых в платформах IOSO и pSeven. Чем это вызвано?

2. Не понятно, что представляет из себя «величина точности» 2,5% для нейросетевой модели, по которой оценивается эффективность быстрого прогнозирования КТС. Это относительная величина среднеквадратичного отклонения или относительная величина максимального отклонения? Почему не используется традиционный регрессионный анализ при аппроксимации основных зависимостей модели?

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. Решетнева),

составленный заведующим кафедрой «Двигатели летательных аппаратов», доктором технических наук, доцентом Зуевым Александром Александровичем, содержит следующие замечания:

1. Недостаточная обоснованность выбора параметров фрактальной модели. В разделе 3 приведены подробные формулы для определения фрактальной размерности D , параметра Хёрста 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 учёта многократного переизлучения в сложной геометрии межконтактных полостей. В главах 5 и 6 подчёркивается важная роль лучистого теплообмена, однако не описано, каким образом определяются угловые коэффициенты для реальной трёхмерной поверхности с множеством микрополостей. Используется ли приближение «серого» тела, учитывается ли отражение излучения от стенок неровностей? Без этих деталей вывод о величине вклада излучения остаётся 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. 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.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Силовые машины» (АО «Силовые машины»), составленный главным экспертом Сектора проектирования новых продуктов Специального конструкторского бюро «Турбина», доктором технических наук Гаевым Валерием Дмитриевичем, содержит следующие замечания:

1. Границы применимости нейросетевой модели: в автореферате недостаточно подробно описаны границы применимости нейросетевой модели за пределами диапазонов параметров, использованных при обучении (вопрос экстраполяции). Рекомендуется уточнить методику оценки границ применимости модели.

2. В автореферате указано, что достоверность результатов обеспечена использованием фундаментальных законов, верификацией моделей и экспериментальными данными. При этом также отмечается, что неопределённость в расчётах КТС остаётся чрезвычайно высокой – от 50% до 300%. Возможно, стоит дополнить работу пояснением, за счёт каких именно факторов или подходов в данном исследовании удалось достичь заявленной достоверности при таком высоком разбросе.

3. Количественная оценка повышения ресурса: в разделе «Практическая значимость» указано повышение ресурса и надёжности теплонагруженных узлов на 25–30%, однако количественная оценка в часах или циклах нагружения для конкретных изделий приведена недостаточно подробно. Рекомендуется уточнить методику перевода снижения термонапряжений в процентное увеличение ресурса.

4. В автореферате указано, что полученные результаты имеют широкую практическую значимость и могут быть применены для решения разнообразных задач в высокотехнологичных отраслях промышленности. В то же время, помимо приведённых двух примеров с использованием некоторых разработок, отсутствуют данные о том, где и в каком объёме результаты работы нашли практическое применение при проектировании различного вида оборудования.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»), составленный членом-корреспондентом РАН, доктором технических наук, профессором, начальником отдела «Двигатели и химмотология» Яновским Леонидом Самойловичем, содержит следующие замечания:

1. Предлагаемые автором методы не учитывают деформации микронеровностей, которые неизбежно имеют место при высоких температурах эксплуатации контактирующих поверхностей в условиях значительных сжимающих нагрузок, возникающих, например, при вхождении летательного аппарата в плотные слои атмосферы.

2. В работе автор также не коснулся вопросов, связанных с контактным теплообменом, возникающим при относительном движении трущихся поверхностей, что актуально для автоматических систем ствольного оружия.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), составленный ведущим научным сотрудником отдела 20011 Комплекса теплообмена и аэрогазодинамики, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Сенкевич Екатериной Аркадьевной, утверждённый заместителем генерального директора по прикладным исследованиям и проектам в области обеспечения безопасности деятельности в околоземном космическом пространстве, доктором технических наук, профессором Пеньковым М.М., содержит следующие замечания:

1. Отсутствие анализа применимости использованных физико-математических моделей переноса тепла и деформации поверхности при теплосиловом воздействии при малых толщинах зоны контакта.

2. Отсутствие разделения верификации разработанных программ численного решения задач и валидации полной физико-математической постановки с комплексом входящих в неё параметров для решения конкретных практических задач.

3. Отсутствие оценки погрешностей результатов измерений – как случайных, так и систематических – при экспериментальном определении КТС и характеристик поверхности, использованных для валидации методов расчётов.

4. Отсутствие обоснования достаточности предложенного метода валидации цифрового двойника по двум параметрам (среднеарифметическому и среднеквадратическому отклонению) на заданной базовой поверхности для задач переноса тепла через контактный разрыв.

5. По мнению рецензента, автореферат избыточен в части описания состояния вопроса (две главы) и фрактального анализа (три главы) в ущерб обоснованию подходов и результатов. Так, из описания пятой главы не ясно, о каком времени релаксации при установившемся режиме идёт речь, не понятно, удалось ли получить зависимости размерности фрактала, параметров модельной шероховатости, прочностных характеристик материала и др. от эффективной площади контакта.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина), составленный профессором кафедры термодинамики и тепловых двигателей, доктором технических наук, доцентом Антиповым Борисом Николаевичем, содержит следующие замечания:

1. Детализация методики экспериментальной верификации: в автореферате недостаточно подробно описана методика сличения результатов

численного моделирования с экспериментальными данными для пар материалов, характерных для нефтегазового оборудования (например, различные марки сталей, работающие в агрессивных средах). Рекомендуется добавить информацию о возможности адаптации разработанной методики для условий, характерных для нефтегазовой отрасли.

2. Вопросы сеточной независимости расчётов: в тексте автореферата отсутствует информация о результатах исследования представленных численных решений на сеточную независимость. Для задач контактного теплообмена, где важна точность описания микрогеометрии, этот аспект имеет критическое значение. Рекомендуется указать, проводился ли анализ сходимости решений при измельчении сетки.

3. Примеры практического применения: в тексте автореферата приведено ограниченное количество примеров практического применения разработанной комплексной методики за пределами аэрокосмической отрасли. Учитывая универсальный характер разработанных методов, целесообразно было бы уделить больше внимания возможностям их применения в энергетике, нефтегазовом машиностроении и других смежных областях.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Ракетно-космический центр «Прогресс» (АО «РКЦ «Прогресс»), составленный первым заместителем генерального конструктора – первым заместителем начальника ЦСКБ Филатовым Артемом Викторовичем, начальником отделения электрогидромеханических систем, систем разделения КА и РН, систем обеспечения теплового режима и двигательных установок КА Бурназяном Сергеем Римировичем, утверждённый первым заместителем генерального директора - генеральным конструктором – начальником ЦСКБ, доктором технических наук Ахметовым Р.Н. содержит следующие замечания::

1. Масштабируемость методики: не совсем ясно, насколько разработанная методика масштабируема на крупногабаритные стыковочные узлы корпусных конструкций ракет-носителей, где количество контактных пар может исчисляться сотнями, а требования к вычислительным ресурсам существенно выше.

2. Влияние вибрационных нагрузок: для ракетно-космической техники критическим фактором являются вибрационные нагрузки на участке выведения. Рекомендуется пояснить, учитывает ли разработанная модель изменение КТС под воздействием высокочастотных вибраций, характерных для запуска РН.

3. Интеграция с CAD/CAE-системами: в автореферате указано, что нейросетевая модель пригодна для интеграции в CAD/CAE-системы, однако отсутствуют подробности о форматах обмена данными и совместимости с промышленными программными комплексами (например, ANSYS, Siemens NX), широко используемыми в отрасли.

4. Деграция свойств в космическом пространстве: при учёте лучистого теплообмена в вакууме используются определённые значения степени черноты. Рекомендуется добавить комментарий о влиянии деграции оптических свойств поверхностей на долгосрочную точность прогноза КТС для космических аппаратов. Оценка влияния теплообмена излучением в межконтактных полостях (46%) требует дополнительного обоснования.

5. Использованное программное обеспечение: в свете проводимой государственной политики по импортозамещению и при наличии отечественных CAE-систем, аналогичных по своим возможностям в части спектра решаемых в работе задач (APM WinMachine, Fidesys, CADflo и др.), применение иностранного программного обеспечения видится ограничивающим фактором для дальнейшего развития направления.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», составленный профессором кафедры «Инженерной теплофизики», доктором технических наук, профессором Кузма-Кичта Юрием Альфредовичем, содержит следующие замечания:

1. Автор подробно рассматривает влияние циклического нагружения на микрогеометрию и КТС, однако в автореферате практически не затронуты механизмы постепенной деградации поверхностей (окисление, эрозия) в процессе длительной эксплуатации, что особенно важно для прогнозирования ресурса.

2. При создании нейросетевой модели использовались синтетические данные, полученные для сухих контактов и идеализированных условий. Целесообразно было бы оценить устойчивость модели к изменению состояния межконтактной среды, например, при появлении плёнок окислов или конвекции в зазорах, заполненных газом, при значительных градиентах температур.

3. В автореферате имеются грамматические ошибки.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), составленный и.о. первого заместителя генерального конструктора по проектированию изделий и комплексов, кандидатом технических наук Шевцовым А.И., начальником отдела аэрогазодинамики и теплообмена, кандидатом технических наук Мошкиным И.Ю., ведущим научным сотрудником, доктором технических наук Костиным Г.Ф., заместителем начальника отдела аэрогазодинамики и теплообмена Приданниковым А.В., содержит следующие замечания:

1. Не представлено сравнение результатов расчёта КТС, полученных с помощью существующих методов, с результатами, полученными на основе разработанных автором моделей, методик и программ.

2. Согласно автореферату, во второй главе диссертации указано, что существующие модели КТС не учитывают конвективный теплообмен, при этом в дальнейшем изложении этот тип теплообмена не упоминается.

3. В случае реализации больших тепловых потоков на поверхности контакта с течением времени будет увеличиваться скачок температур, приводящий к относительному движению сопряжённых поверхностей друг относительно друга за счёт температурного расширения тел. Влияние этого процесса на КТС не учтено.

Отзыв на автореферат диссертации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»), составленный заведующим кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», доктором технических наук, профессором Дмитриевым Андреем Владимировичем и доцентом кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», кандидатом технических наук Бадретдиновой Гузель Рамилевной, содержит следующие замечания:

1. В автореферате указано, что нейросетевая модель обучена на 8000+ (стр. 7) и 10 000 (стр. 33) синтетических примерах. Чем объясняется разница в цифрах? Каков минимальный объём выборки для обеспечения заявленной точности 2,5%?

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Производственно-конструкторское объединение «Теплообменник» (АО ПКО «Теплообменник»), составленный первым заместителем главного конструктора – начальником опытного конструкторского бюро, кандидатом технических наук Суворовым А.В., содержит следующие замечания:

1. В автореферате приводятся данные о влиянии циклического нагружения на КТС для изотропных материалов. В то же время для композитов, где эффекты термоциклирования могут приводить к расслоениям и изменению микрогеометрии контакта, подобных оценок не представлено. Было бы интересно узнать мнение автора о применимости полученных результатов для прогнозирования ресурса композитных соединений при длительной эксплуатации.

2. При обсуждении практической значимости для теплообменного оборудования упоминается потенциальное повышение КПД на 5–7% и снижение массы на 12–15%. Однако в автореферате не раскрыто, на каком типе теплообменного аппарата и при каких граничных условиях были получены эти оценки. Хотелось бы получить уточнение этого вопроса, поскольку для инженерной практики важен не только относительный, но и абсолютный выигрыш в характеристиках конкретного изделия.

Отзыв на автореферат диссертации Акционерного общества «Туполев» (АО «Туполев»), составленный начальником ПКЦ, кандидатом технических наук Челябином Оганесом Грачьевичем, содержит следующие замечания:

1. В главе 5 представлены результаты численного моделирования контактного теплообмена сопрягаемых шероховатых поверхностей. Приведенные на рис. 8 результаты представляются абсолютно нереалистичными – на пластине из 12Х18Н10Т размером 2мм получен перепад температур в 60 градусов. При этом не приведены оценки вклада теплопроводности в зазорах и теплового излучения в полученный результат. Оценить полученные результаты без подробного описания постановки задачи не представляется возможным.

2. Из автореферата неясно, каким образом в практической работе могут быть получены данные о микрорельефе конкретных контактных пар на основе «макета цифрового двойника» этих пар.

3. В разделе практической значимости указывается на повышение КПД ребристо-трубчатых теплообменников на 5–7% и снижение их массогабаритных показателей на 12–15%. Данные результаты выглядят значимо, однако сведения об объекте, условиях и методе их получения в автореферате отсутствуют.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в отрасли науки, к которой относится диссертационная работа Ежова А.Д., что подтверждается их научными публикациями в данной области.

Выбор Лившица Михаила Юрьевича, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», обосновывается его широким кругом работ в области управления тепловыми режимами, моделирования тепло- и массопереноса, идентификации теплофизических характеристик материалов и систем тепловой защиты. Им разработаны методы автоматической компенсации термодформационных помех в информационно-измерительных системах, модели и алгоритмы оптимального управления температурным режимом несущих конструкций, что непосредственно связано с тематикой диссертации Ежова А.Д. Наличие публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях подтверждает его компетентность в данной области.

Выбор Попова Игоря Александровича, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», обосновывается его многолетними исследованиями в области конвективного теплообмена, теплофизических свойств

композиционных материалов (в том числе углеродных полимерных композитов), а также разработкой методов интенсификации теплообмена и тепловой защиты. Им опубликованы работы по теплопроводности новых углеродных полимерных композитных материалов, по контактному теплообмену в элементах теплообменников, а также по применению искусственных нейронных сетей для прогнозирования коэффициентов трения и теплоотдачи, что полностью соответствует тематике представленной диссертации.

Выбор Мурашова Михаила Владимировича, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры РК9 «Компьютерные системы автоматизации производства» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», обосновывается его значительным опытом в области численного моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, термомеханического контакта, а также исследования тепловой контактной проводимости с использованием трёхмерных конечно-элементных моделей. Им развиты методы учёта влияния расположения пятен контакта на тепловую проводимость, разработаны подходы к моделированию деформирования шероховатых поверхностей. Наличие публикаций в рецензируемых изданиях по указанной тематике подтверждает его высокую квалификацию для оппонирования диссертационной работы Ежова А.Д.

Выбор ведущей организации – Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия») – обосновывается её высокими достижениями в области проектирования, создания и эксплуатации пилотируемых и беспилотных космических аппаратов, орбитальных станций и систем терморегулирования. ПАО «РКК «Энергия» является ведущим предприятием ракетно-космической отрасли России, где при разработке систем терморегулирования космических

аппаратов, стыковочных узлов, теплонагруженных элементов и возвращаемых аппаратов возникает необходимость в достоверном учёте контактного термического сопротивления (КТС). Сотрудники корпорации имеют значительное число публикаций в рецензируемых научных изданиях по тематике теплообмена, математического моделирования тепловых процессов, оптимизации тепловой защиты и тепловых аккумуляторов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании проведенных соискателем исследований:

1. Проведён анализ контактного теплообмена в ключевых отраслях техники. Систематизированы методы расчёта КТС, выявлены их ограничения - узкая применимость, упрощённая микрогеометрия, игнорирование анизотропии и излучения, и обоснована необходимость разработки универсальной методики, снижающей неопределённость расчётов до инженерного приемлемого уровня.

2. Экспериментально определены геометрические характеристики типичных контактирующих поверхностей и создана база данных микротопографий профилей.

3. Разработана методика построения макета цифрового двойника микрорельефа на основе данных измерения профилограмм поверхностей. Методика реализована в виде программы для ЭВМ.

4. Разработана методика численно-аналитического расчета контактного термического сопротивления для представления микрорельефа контактных поверхностей с учетом пластических и упруго-пластических деформаций. Методика реализована в виде программы для ЭВМ.

5. Создана оригинальная установка для определения КТС в парах различных материалов в атмосферных условиях и установка по определению КТС пар материалов в контролируемых средах;

6. Экспериментально определены КТС для пар материалов КМК-МС / 12Х18Н10Т / ТВ-36, образующих контактные соединения в ЖРД малой тяги,

в различных средах (вакуум, атмосфера) в широком диапазоне температур и давлений. На основе разработанной методики проведена оптимизация конструкции контактных узлов.

7. Исследовано влияние теплофизических, механических свойств, анизотропии композитов, микрогеометрии, нагрузок, покрытий, циклического нагружения и лучистого теплообмена на КТС.

8. На основе цифрового двойника создана конечно-элементная модель термомеханического взаимодействия с учётом анизотропии и сложного теплообмена; сформирована база расчетных данных по КТС.

9. Разработана и верифицирована нейросетевая модель (BP-ANN, RBF) для быстрого прогнозирования КТС.

10. На основе разработанной методики термомеханического взаимодействия контактных пар, проведена оптимизация узлов теплонапряжённых объектов: элементов конструкции газотурбинных и жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

1. В работе развиты различные направления прикладного моделирования контактного теплообмена в рамках единого методологического подхода: создание цифровых двойников микрорельефа (методы вершин и локальных экстремумов), конечно-элементное моделирование с учётом анизотропии, пластичности и излучения, а также нейросетевое прогнозирование КТС. Комплексная методика учитывает реальную микрогеометрию, разнородные материалы, среды, покрытия, циклическое нагружение и широкий диапазон температур и давлений.

2. Экспериментально и расчётно доказано: достоверное определение теплового состояния требует учёта реальной микрогеометрии, анизотропии материалов и лучистого теплообмена при высоких температурах и низких давлениях. Разработанная комплексная методика снижает

неопределённость расчётов КТС до $\leq 7\%$, а нейросетевая модель обеспечивает прогнозирование с точностью до 2,5%.

3. Результаты диссертации применимы для теплового и теплопрочностного проектирования авиационно-космической техники (ГТД, ЖРД малой тяги, систем терморегулирования, теплозащиты), а также для оптимизации теплообменников, ядерных реакторов, систем охлаждения электроники и тормозов транспортных машин.

4. Результаты работы внедрены в практическую деятельность и использовались:

- в производственной деятельности ПАО «Композит» при отработке состава и конструкции металлоперехода для камер сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги различного типоразмера, что подтверждается соответствующим актом;

- в научных исследованиях ОАО «Московский завод «САПФИР» при моделировании теплового состояния узла регулирования дроссельного микрокриогенного холодильника, что подтверждается соответствующим актом;

- при проектировании и отработке технологий изготовления конструктивно-подобных элементов деталей узла турбины из непрерывно-армированного композиционного материала в ПАО «ОДК-УМПО», что подтверждается соответствующим актом;

- в учебном процессе МАИ по дисциплинам «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», что подтверждается соответствующим актом.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается использованием фундаментальных законов термомеханики, строгим соблюдением принципов энергетического баланса в контактных зонах;

всесторонней верификацией разработанных конечно-элементных моделей — как на основе аналитических зависимостей, так и путём сопоставления с собственными экспериментальными данными и результатами, опубликованными в авторитетных научных источниках. Надёжность численных решений обеспечена исследованием сходимости при измельчении расчётных сеток, контролем устойчивости алгоритмов и воспроизводимостью результатов в широком диапазоне граничных условий. Основные теоретические положения подтверждены успешной практической реализацией при внедрении результатов исследования и прошли апробацию на ведущих всероссийских и международных научно-технических форумах

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в постановке целей и задач исследования, разработке вычислительных моделей и алгоритмов решения описанных в диссертации задач численного моделирования контактного теплообмена, разработке программного кода, реализующего представленные модели, проведении широкомасштабных численных и натурных экспериментов, анализе, верификации и обобщении полученных данных, сопоставлении полученных результатов с экспериментальными и расчётно-теоретическими данными, подготовке публикаций по теме диссертации, а также в выполнении прикладных исследований по оптимизации контактных узлов в конструкциях жидкостных ракетных двигателей малой тяги и замковых соединений керамических лопаток газотурбинных двигателей.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Диссертация Ежова Алексея Дмитриевича полностью удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года порядке присуждения ученых степеней».

На заседании 27 мая 2026 года диссертационный совет принял решение: за разработанные соискателем теоретические положения, методологию и

практические рекомендации на основании выполненных им исследований и представленные конкретные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, состоящее в разработке комплексных методов моделирования контактного термического сопротивления, объединяющих создание цифровых двойников микрорельефа поверхности, междисциплинарное конечно-элементное моделирование с учётом анизотропии свойств материалов, пластических деформаций и лучистого теплообмена, нейросетевое прогнозирование на основе синтетических данных, а также экспериментальную верификацию на оригинальных установках, что позволяет существенно снизить неопределённость расчётов КТС и применять их для энергоэффективного управления тепловыми режимами теплонагруженных узлов авиационной, ракетно-космической и энергетической техники, присудить Ежову Алексею Дмитриевичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 6 докторов наук по специальности 1.3.14. – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», участвовавших в заседании; из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 14, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Проректор по научной работе,
д.т.н., доцент

А.В.Иванов

Председатель
диссертационного совета 24.2.327.06,
д.т.н., профессор

Ю.А.Равикович

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06,
д.т.н., доцент

В.М.Краев

27 мая 2026 г.