

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГАОУ
ВО «Национальный исследовательский
университет «Московский институт элек-
тронной техники», доктор технических
наук, профессор



С.А. Гаврилов

«06» декабря 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Ненахова Евгения Валентиновича** «Динамические задачи теории теплового удара», представленную на соискание ученой степени **кандидата физико-математических наук** по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Математическое моделирование процессов воздействия тепловых нагрузок на твердые тела является необходимым этапом изучения проблемы термической прочности, актуальность которой особенно возросла в последние десятилетия. В различных процессах обработки материалов концентрированными потоками энергии используется тепловое действие плазменного потока, лазерного или электронного лучей. Быстрый нагрев вещества происходит при горении и взрыве, обработке в инфракрасных печах, плазмохимических реакторах, гелиоустановках. Мощные радиационные излучатели используют для термической закалки и упрочнения поверхностей изделий. Интенсивному тепловому воздействию подвергаются поверхности авиационно-космических аппаратов и пусковых установок и т.д. Характерным признаком кратковременного нагрева является неравномерность распределения температуры по объему тела, возникновение в нем значительных по величине градиентов температуры и термических напряжений, изменяющихся во времени. Эти напряжения могут вызвать как образование трещин, так и распространение уже имеющихся, а также хрупкое разрушение материала (или термическую усталость). В связи с этим теоретические методы оценок прочности твердых тел (без длительных лабораторных испытаний) приобретают большое значение. Указанная проблема одна из актуальных в физике и механике прочности как в практическом, так и в научном плане. Ее решение осложняется необходимостью учета влияния на прочность твердых тел различных эксплуатационных факторов, особенно при их совместном действии. Данные обстоятельства обуславливают **актуальность** диссертационной работы Е.В. Ненахова.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«14» 12 2021 г.

Основной **целью** диссертационной работы Ненахова Е.В. является разработка и исследование обширного класса математических моделей теплового удара как в рамках классической феноменологии Фурье о распространении теплоты в твердых телах, так и в терминах обобщенной термомеханики, описывающей локально-неравновесный перенос теплоты с учетом конечной скорости ее распространения.

Для достижения поставленной цели диссертанту потребовалось решить ряд **задач исследовательского и прикладного характера**.

Прежде всего, Е.В. Ненахову удалось развить и усовершенствовать модельные представления о процессах переноса теплоты на уровне элементарных актов и с помощью уравнения энергии перейти к основным дифференциальным соотношениям, положенным в основу разработанных моделей исследования. Значительных усилий от диссертанта потребовала также реализация довольно большого объема вычислительных работ аналитического характера, требуемых для отработки и оценки эффективности предлагаемых методов и алгоритмов. Здесь следует подчеркнуть, что аналитическая часть, широко представленная в диссертации, оказалась естественным образом вписанной в классические и обобщенные математические модели теории теплового удара.

Необходимо отметить также, что диссертантом:

- развиты подходы к корректной постановке граничных условий для краевых задач нестационарной теплопроводности для уравнений гиперболического типа;
- разработаны новые аналитические методы решения гиперболических моделей теплопереноса с целью получения оригинальных функциональных конструкций в качестве аналитических решений рассматриваемых моделей для различных режимов интенсивного нагрева и охлаждения;
- развит математический аппарат в гиперболических моделях для приложения полученных результатов к исследованию проблемы теплового удара в твердых телах в терминах динамической термоупругости с целью проведения численных экспериментов и их анализа.

Кроме того, развитые в диссертации подходы позволили разработать теоретически обоснованные математические модели и новые методы расчета ряда важных параметров термической прочности тел, что позволяет эффективно прогнозировать их долговечность и кинетику процессов разрушения под действием тепловых нагрузок.

Решение обозначенных задач позволило Е.В. Ненахову получить ряд **новых научных результатов**, представленных в диссертации. К ним относятся:

1. Оригинальные подходы и методы математического моделирования теплофизических процессов переноса теплоты на основе уравнений параболического и гиперболического типов с учетом релаксационных явлений в модифицированном законе Фурье.
2. Разработка математического аппарата и получение новых функциональных конструкций в аналитических решениях гиперболических моделей теплопереноса с целью

приложения полученных соотношений к исследованию проблемы теплового удара в терминах динамической термоупругости.

3. Вывод определяющих соотношений для динамической термоупругости, а именно: уравнения совместности в напряжениях (обобщенное соотношение Бельтрами-Митчелла для квазистатических случаев) и уравнения «совместности» в перемещениях.

4. Разработка и исследование новых математических моделей теплового удара как в рамках классической феноменологии Фурье о распространении теплоты в твердых телах, так и в рамках обобщенной термомеханики для локально-неравновесных процессов с учетом конечной скорости теплопереноса.

5. Проведение комплексного исследования ряда классических моделей теплового удара для массивного тела – сплошного и с внутренней цилиндрической полостью – в условиях температурного нагрева и охлаждения; теплового нагрева и охлаждения; нагрева и охлаждения средой; при действии внутреннего источника теплоты; теплового потока экспоненциального типа; линейного теплового потока.

6. Развитие обобщенных моделей теплового удара для массивного тела при различных режимах термического воздействия при нагревании и охлаждении.

7. Нахождение практических инженерных соотношений для оценок температурных напряжений на основе операционных решений динамических задач по теории теплового удара.

8. Построение численной оценки времени релаксации в гиперболическом уравнении теплопроводности.

Общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой главе, общих выводов, списка литературы; изложена на 216 страницах, включая 36 рисунков. Список литературы содержит 231 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследования, приведен обширный перечень практических и теоретических ситуаций, в которых возникает необходимость построения и изучения предложенных в работе математических моделей теплового удара в рамках классической феноменологии Фурье и терминах обобщенной термомеханики. Изложены цели и задачи диссертационной работы, научная новизна исследования, практическая значимость полученных результатов.

В первой главе дается историческая справка и обширный литературный обзор по проблеме теплового удара, начиная с ранних работ Дюгамеля, Неймана и до настоящего времени. Показано, что исследования проблемы теплового удара на основе моделей динамической и квазистатической термоупругости получили широкое развитие. В то же время, несмотря на наличие значительного числа достижений по теории теплового удара, можно заключить, что модельные представления указанной теории в терминах обобщенной термомеханики, по крайней мере, в рамках функциональных соотношений, полученных в диссертации и допускающих их реальное практическое применение, раз-

работаны в наименьшей степени и требуют дальнейшего развития. Кроме того, не изучены также и многие вопросы классической теории теплового удара. Поэтому разработанные автором теоретические модели и аналитические алгоритмы их исследования весьма востребованы и вполне обеспечивают инструментарий для применения на практике полученных результатов.

Следует также отметить важный результат первой главы – тензорный вывод уравнения совместности в напряжениях. Это уравнение обобщает известные представления Бельтрами-Митчелла для квазистатических случаев и представляет самостоятельный научный интерес для термомеханики. Еще один интересный результат первой главы – уравнение «совместности» в перемещениях, позволяющее учесть влияние кривизны поверхности твердого тела на температуру и напряжения (в работе рассматривались тела цилиндрической и шаровой формы в цилиндрических и сферических координатах).

Во второй главе создается математическая основа для проведения дальнейших исследований: развиваются математические модели локально-неравновесного теплообмена, с помощью закона Максвелла-Каттанео-Лыкова-Вернетта выводятся граничные условия в интегральной и дифференциальной формах обобщенного типа; развивается новый математический аппарат на основе операционного исчисления; находятся новые функциональные соотношения для аналитических решений гиперболических моделей теплопереноса и устанавливается их эквивалентность решениям, полученным ранее в иной форме.

Также в главе 2 на основе конечно-разностной схемы разработан алгоритм для оценки времени релаксации в гиперболическом уравнении нестационарной теплопроводности. Численно показано существенное различие между решениями уравнений гиперболического и параболического типов. Эта часть диссертации представляет самостоятельный интерес для аналитической теории краевых задач гиперболического типа дифференциальных уравнений математической физики.

К числу интересных результатов второй главы можно отнести также исследования эффекта связности в моделях теплового удара. При этом диссертантом выделен класс традиционных конструкторских, потребительских и строительных материалов, для которых термодинамический эффект взаимодействия деформационных и температурных полей незначителен.

В третьей главе диссертации рассматриваются математические модели теплового удара классического типа для упругого полупространства одновременно в условиях интенсивного нагрева и интенсивного охлаждения при различных режимах теплофизического воздействия на границу твердого тела. Причем все виды неизотермического воздействия объяснены конкретными практическими ситуациями в различных областях науки и техники. При этом следует отдельно выделить оригинальное решение ком-

плексной задачи, имеющей важное практическое применение, – модели теплового удара для массивного тела с внутренней цилиндрической полостью.

К еще одному важному результату третьей главы следует отнести проведенный диссертантом анализ термической реакции бесконечной пластины и упругого полупространства и доказательство их идентичности.

Важно также, что все математические модели третьей главы (и следующей главы 4) исследуются по единообразной методике: обоснованная с точки зрения теплофизики постановка задачи в безразмерных переменных, ее операционное решение, переход к оригиналам, численные эксперименты и их подробный анализ. На протяжении всей диссертации соискатель демонстрирует достаточно высокую математическую культуру, учитывая, что рассматриваемые классы математических моделей, не отличаясь сложностью их постановки, в то же время требуют для их решения серьезной техники в области вычислительной математики.

Глава 4 – центральная в диссертации. В ней рассмотрен ряд новых математических моделей теплового удара в рамках обобщенной термомеханики при различных режимах нагрева и охлаждения. На основе численных экспериментов диссертантом проведен сравнительный анализ напряжений, указан наиболее опасный режим. Следует отметить, что все аналитические решения динамических моделей главы 4 получены на основе математического аппарата, развитого для этих целей в главе 2, т.е. материал главы 2 органично вписан в исследования обобщенной теории теплового удара главы 4. Кроме того, по операционным решениям динамических задач в главах 3 и 4 диссертации предложены расчетные инженерные соотношения для оценки термических напряжений (через скачки напряжений на фронте термоупругой волны). Последние содержат физико-механические характеристики материала, условия теплового воздействия, что позволяет оперативно оценивать напряжения по справочным данным параметров, входящих в эти оценки.

В главе 5 описан разработанный программный комплекс для проведения численных экспериментов и анализа полученных результатов на основе решений, полученных в предыдущих главах диссертации.

Достоверность и обоснованность рассмотренных моделей теплового удара и их аналитических решений подтверждается соответствием этих моделей реальным теплофизическим процессам (приведенным в диссертации), протекающим в конкретных технических устройствах, а также согласованием полученных результатов с результатами других авторов в частных и предельных случаях.

Научная новизна заключается в разработке оригинальных подходов и методов математического моделирования теплового удара в условиях локально-неравновесного процесса переноса теплоты на основе обобщенной теории, которые позволяют учитывать члены тепловой инерции как в уравнении нестационарной теплопроводности, так

и в граничных условиях задачи. Использование разработанных подходов и методов дало возможность обнаружить новые закономерности протекания исследуемых процессов. Кроме того, несомненную новизну имеют проведенные в диссертации исследования в классических моделях теплового удара для широкого класса тепловых воздействий на твердое тело.

Практическая значимость. Разработанные в диссертации математические модели теплового удара и математический аппарат для нахождения их аналитических решений, численные эксперименты, описывающие кинетику термических напряжений, разработанные расчетные инженерные оценки для максимума температурных напряжений позволяют получать важную информацию об особенностях теплового и термонапряженного состояний, возникающих в твердых телах при интенсивном нагревании и охлаждении. Последнее представляет значительный практический интерес для областей науки и техники, где имеют место процессы интенсивного нагрева или охлаждения материалов (авиационно-космическая, химическая технология и др.): обработка концентрированными потоками энергии (плазменными потоками, лазерными или электронными лучами), горение, взрыв, обработка в инфракрасных печах, плазмохимических реакторах, гелиоустановках. Проведенные в диссертации исследования представляют также интерес для микро- и нанoeлектроники (термоэлектрические системы охлаждения, многоуровневая металлизация интегральных схем и др.).

Область исследования диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Разработанные в диссертации аналитические методы для изучения проблемы теплового удара и результаты проведенных исследований могут найти применение в различных областях науки и техники, связанных с авиацией и космическими исследованиями, в химической технологии, электронной технике и других отраслях в таких организациях, как МГТУ им. Н.Э. Баумана, МЭИ, МФТИ, МИФИ, МГСУ, МАИ, МИЭТ, ИПМ РАН, РНЦ «Курчатовский институт», АО «НПО Стеклопластик», МИТХТ им. М.В. Ломоносова и ряде других. Фрагменты диссертации могут быть использованы в учебном процессе университетов и технических вузов при изучении специальных дисциплин студентами и аспирантами естественно-научных специальностей, занимающихся вопросами разработки математических моделей и аналитическими методами их решений в области моделирования локально-неравновесных процессов, таких как перенос теплоты, массы, электричества, напряжений, фильтрации, поглощения звуковых волн и др.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и позволяет получить о ней достаточно полное представление.

Материалы диссертации прошли серьезную апробацию, доложены на многочисленных российских и международных конференциях (10 тезисов и научных статей), опубликованы в 9 статьях в научных журналах (из них 7 – в журналах ВАК, 2 – в журналах Scopus), 1 статья принята к публикации в журнале, индексируемом в Scopus.

Общие замечания и пожелания. По содержанию диссертации можно высказать следующие замечания и пожелания.

1. Проблема теплового удара – чисто теоретическое направление в математическом моделировании. Между тем, имеются научные публикации, посвященные экспериментальным исследованиям, например, по быстрому импульсному нагреву твердых тел, где приводятся экспериментальные кривые импульсных напряжений (см. Вовненко Н.В., Зимин Б.А., Судьенков Ю.В. Экспериментальные исследования термоупругих напряжений в тепло- и нетеплопроводящих твердых телах при субмикросекундных длительностях лазерного нагрева // ЖТФ, 2011, т. 81, вып. 6, с. 57–62). В диссертации упущен вопрос, связанный с сопоставлением известных экспериментальных данных с приведенными в работе расчетными (теоретическими), что имеет важное значение для подтверждения достоверности ее результатов.

2. Значительная часть исследований в диссертации уделена краевым задачам для уравнений гиперболического типа с обобщенными граничными условиями. Так как это новый класс задач, то в работе было бы уместно коснуться общих вопросов корректности их постановок.

3. В работе приведено решение комплексной задачи в модели теплового удара для массивного тела с внутренней цилиндрической полостью. Однако для завершенности исследований важно было бы рассмотреть случаи, когда форма полости отлична от цилиндрической, а также когда полость заполнена каким-либо веществом, находящимся в жидком или твердом состоянии.

Следует подчеркнуть, что указанные замечания носят рекомендательный характер, не снижают качества результатов проведенных исследований, общую высокую оценку их новизны и практической значимости.

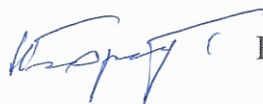
Заключение. Диссертация Ненахова Евгения Валентиновича на тему «Динамические задачи теории теплового удара» является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой на актуальную тему, содержащей новые научные результаты, полученные с применением классических методов математического моделирования. Работа соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки). Диссертация отвечает всем требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Ненахов Евгений Валентинович, заслуживает присуждения ученой степени **кандидата физико-**

математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук, доцентом, профессором Института физики и прикладной математики Национального исследовательского университета МИЭТ Бардушкиным Владимиром Валентиновичем.

Диссертация и отзыв рассмотрены и обсуждены на расширенном заседании научно-технического совета Института физики и прикладной математики НИУ МИЭТ 02 декабря 2021 года (протокол № 2).

Директор Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, д.ф.-м.н., профессор



Николай Иванович Боргардт

Профессор Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, д.ф.-м.н., профессор РАН



Виктор Борисович Яковлев

Профессор Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, д.ф.-м.н., доцент



Владимир Валентинович Бардушкин

Доцент Института физики
и прикладной математики
НИУ МИЭТ, к.ф.-м.н., доцент



Игорь Викторович Лавров

Почтовый адрес: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»;

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1;

тел.: (499) 731-44-41; факс: (499) 710-22-33;

телеграф: 124498, Москва, АТ 205264;

E-mail: netadm@miee.ru.

Сайт: <https://www.miet.ru>.

Институт физики и прикладной математики;
тел.: 8 (499) 720-85-58, e-mail: fpm@lenta.ru.

ПОДПИСИ

Боргардта Николая Ивановича, Яковлева Виктора Борисовича,
Бардушкина Владимира Валентиновича, Лаврова Игоря Викторовича

УДОСТОВЕРЯЮ

