

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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».

Вначале остановилось на общей характеристике представленной работы. Диссертация Ненахова Е.В. производит хорошее впечатление своей фундаментальностью. В ней представлены интересные математические модели теории теплового удара, развит математический аппарат; с помощью разработанных проблемно-ориентированных программ численного счета проведены многочисленные численные эксперименты, отражающие термическую реакцию системы на интенсивный нагрев и охлаждение; представлен численный счет при оценке времени релаксации в уравнениях гиперболического типа. Поскольку тепловой удар – это процессы микросекундной длительности и экспериментально описать их трудно, то совершенно уместно применение методов математического моделирования. Хочу отметить логику построения диссертации, которая хорошо вписывается в специальность 1.2.2. Вначале развиваются модельные представления определяющих соотношений теории теплового удара. Затем развивается теория обобщенных тепловых задач локально-неравновесного теплообмена, затем наступает необходимость развить специальный математический аппарат на базе операционного исчисления, то есть создается необходимая аналитика для завершающей стадии – непосредственное решение динамических задач большого числа для чисто практических интересов, обоснованных теплофизически в диссертации. Особенно, я бы сказал, эффективной является завершающая стадия диссертации. В диссертации на графиках много пиковых значений температурных напряжений. И диссертанту удалось, используя операционные решения динамических задач, разработать и предложить для этих напряжений инженерные оценки для их максимальной величины. На мой взгляд, это красивый и грамотный подход, имеющий большие практические приложения. Кроме того, становится ясным внимание соискателя к операционному исчислению, его стремление на всем протяжении изучения модельных задач теории теплового удара выписать операционные решения в форме, показывающей наличие скачков напряжений с их последующей обработкой в виде конкретных расчетных соотношений.

В целом диссертация посвящена разработке методологии математического моделирования теплового удара в терминах динамических задач на основе как локально-

14 12 2021 г.

неравновесного процесса переноса теплоты в твердых телах обобщенной феноменологии Максвелла, Каттанео-Лькова-Вернотта, так и классической феноменологии Фурье в условиях интенсивного температурного нагрева и охлаждения, теплового нагрева и охлаждения, нагрева и охлаждения средой, а также при действии внутренних источников теплоты. Важно, что в диссертации много внимания уделено теплофизике, а именно обширному экспериментальному материалу в различных областях науки и техники, обосновывающему постановку соответствующих математических моделей. Этим самым создается доверие к изучаемым моделям, а именно – их практической значимости. Если учесть, что время действия инерционных эффектов в динамических моделях составляет времена микросекундной длительности и даже за эти малые времена их действие может быть разрушающим в твердых телах – элементах конструкций массового назначения – то становится ясной **актуальность** представленной диссертации: разработка соответствующих модельных представлений для описания термической реакции конструкционных материалов в условиях интенсивного нагрева и охлаждения. В диссертации эта цель достигнута полным образом. Для достижения цели и задач диссертации соискателю потребовалось предварительно развить необходимый математический аппарат, подготовить для предстоящих исследований необходимую аналитику, разработать для проведения численных экспериментов проблемно-ориентированные программы, разработать конечно-разностную схему и невязки для оценки параметра тепловой релаксации. все это вместе взятое несомненно составляет **научную новизну** диссертации.

Решение обозначенных выше задач теории теплового удара позволило соискателю получить **ряд новых научных результатов**, представленных в диссертации.

1. Разработаны модельные представления процессов переноса теплоты в твердых телах для уравнений гиперболического типа с учетом релаксационных явлений в модифицированном законе Фурье и выведены обобщенные граничные условия в эквивалентных формах – дифференциальной и интегральной.

2. Разработаны новые функциональные соотношения операционного исчисления для их последующего приложения к исследованию проблемы теплового удара в терминах обобщенной термомеханики.

3. Получены новые функциональные конструкции для аналитических решений обобщенных задач и доказана их эквивалентность.

4. Выведены (с помощью тензорной алгебры) определяющие соотношения для уравнений совместности в напряжениях для динамической термоупругости,

представляющие самостоятельный интерес для термомеханики, а также уравнения «совместности» в перемещениях для областей с криволинейными границами.

5. Проведены комплексные исследования ряда новых математических моделей теории теплового удара в рамках обобщенной термомеханики с учетом конечной скорости теплопереноса при различных режимах интенсивного нагрева и охлаждения границы твердого тела, а также аналогичные исследования ряда классических моделей теплового удара.

6. Отдельно следует отметить достаточно сложную для исследования проблему, рассмотренную в диссертации: термическую реакцию массивного тела с внутренней цилиндрической полостью.

7. На основе операционных решений большого числа конкретных прикладных задач разработаны практические инженерные соотношения для оценки максимума температурных напряжений.

8. Представлен исчерпывающий численный счет в соответствии со специальностью 1.2.2: конечно-разностная схема и невязки для оценки параметра тепловой релаксации и программные комплексы для проведения в диссертации большого числа численных экспериментов.

Практическая ценность проведенных исследований заключается прежде всего в том, что полученные решения динамических задач теории теплового удара готовы к применению на практике.

Диссертационная работа 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 наименование.

Введение построено традиционно: обоснована актуальность исследований, практическая значимость работы, изложены цели и задачи, научная новизна.

В первой главе дается обширный литературный обзор по проблеме теплового удара, начиная с ранних работ Дюгамеля и Неймана середины 19 века и до настоящих дней. Автор убедительно показывает, что несмотря на достигнутые успехи в этой области, модельные представления указанной теории в терминах обобщенной термомеханики требуют своего дальнейшего развития. Не изучены также и многие вопросы классической теории теплового удара. К интересным результатам первой главы относятся тензорный вывод уравнения совместности в напряжениях для динамических задач, а также уравнения «совместности» в перемещениях. Все эти соотношения используются в последующих главах.

Вторая глава посвящена математическим моделям для уравнений гиперболического типа, вопросам их корректной постановки, развитию специального аппарата операционного исчисления, новым функциональным конструкциям аналитических решений гиперболических моделей и доказательству их эквивалентности, построению алгоритма на основе конечно-разностной схемы для оценки времени релаксации, комплексам ориентированных программ для проведения численных экспериментов.

Третья глава диссертации посвящена исследованию комплекса классических математических моделей теории теплового удара для упругого полупространства при различных режимах интенсивного нагрева и охлаждения границы области. Важно отметить, что все виды теплового воздействия объяснены конкретными практическими ситуациями в различных областях науки и техники. Получены точные аналитические решения, проведены численные эксперименты, дан физический анализ кинетике термической реакции тела.

Глава четвертая продолжает эти исследования, но уже для локально-неравновесных процессов с учетом конечной скорости распространения теплоты в твердых телах. Несмотря на сравнительно несложную постановку изучаемых математических моделей, нахождение их аналитических решений требует высокой математической культуры и умения проводить длительные вычислительные операции. Автор справляется с этими трудностями и благодаря развитому в главе 2 математическому аппарату доводит все исследования до конца, завершая их численными экспериментами и анализом полученных результатов.

К числу интересных результатов главы 4 (как указывалось выше) относятся расчетные инженерные соотношения максимума температурных напряжений по операционным решениям математических моделей. Это одна из оригинальных составляющих диссертации.

Глава 5 посвящена программному комплексу для проведения (многочисленных в диссертации) численных экспериментов с целью оценки и анализа термической реакции изучаемых тел на интенсивный нагрев и охлаждение.

Следует отметить серьезную апробацию представленной диссертации. Основные результаты опубликованы в 23 научных работах, из которых 3 в международных индексируемых базах (Scopus); 7 в научных журналах, входящих в перечень ВАК; 13 в международных и всероссийских журналах.

По содержанию диссертации можно высказать некоторые замечания.

1. В главе 2 диссертации много внимания уделено аналитическим решениям гиперболических моделей теплопереноса на основе контурных интегралов Римана-Меллина. Сами по себе эти решения действительно новые и достаточно интересные, но в теории теплового удара они не используются. Возникает вопрос о возможности их использования непосредственно в моделях теплового удара.

2. Аналогично можно сказать о методе функций Грина во введении.

3. Объем диссертации 216 страниц, и он превышает среднестатистический объем кандидатской диссертации.

Указанные замечания носят рекомендательный характер, не снижают качество результатов исследований соискателя, общую высокую оценку их новизны, практической значимости.

Заключение. Диссертационная работа Ненахова Евгения Валентиновича является завершенной самостоятельной научно-исследовательской работой, содержащей новые научные результаты на актуальную тему с применением методов математического моделирования. Диссертация 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 Российской Федерации 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».

Официальный оппонент

заведующий лабораторией «Структурообразования в дисперсных системах» института физической химии и электрохимии им А.Н. Фрумкина РАН, доктор физико-математических наук, профессор


/ Ломовской В.А./
09.12.2021

Подпись профессора д.ф.-м.н. Ломовского В.А. заверяю



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук

Адрес: Ленинский пр. 31 корп.4, Москва, 119071

Телефон: +7(495) 955-46-54

E-mail: dir@phyche.ac.ru