



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "КАЛУЖСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ"
(ПАО "КАДВИ")

248021, г. Калуга, ул. Московская, 247
ИНН 400000255
ОГРН 1024001339779
Телефон (4842) 55 - 40 - 18
Факс (4842) 55 - 17 - 72
E-mail: kadvi@kaluga.ru
<http://www.kadvi.ru>

№ 59/161 от 24 ЯНВ 2022
На № _____ от _____

Председателю диссертационного совета
Д 212.125.08 на базе Московского
авиационного института (национального
исследовательского университета)
доктору технических наук, профессору
Равиковичу Ю.А.

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам в трёх экземплярах отзыв официального оппонента к.т.н., ведущего инженера-конструктора бюро расчётов и надёжности отдела опытно-конструкторских работ ПАО «Калужский двигатель» на диссертационную работу Жукова Виталия Владимировича на тему: «Исследование внутренних механизмов переноса тепла, массы, импульса с учетом релаксационных явлений», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заместитель генерального директора по
конструкторским работам

Телегин Д.В.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

27 01 2022

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Жукова Виталия Владимировича на тему «Исследование внутренних механизмов переноса тепла, массы, импульса с учётом релаксационных явлений», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертации

Развитие техники сопровождается усложнением условий её работы, всё большее применение находят быстропротекающие процессы переноса тепла, массы и импульса, для описания которых неприменимы классические феноменологические теории, такие как закон теплопроводности Фурье и закон упругой деформации Гука. Для создания современной эффективной, надёжной и конкурентоспособной техники сегодня активно используется математическое моделирование, которое позволяет спрогнозировать протекающие в ней физические процессы при минимальном привлечении натуральных экспериментов. При этом достоверность результатов математического моделирования напрямую зависит от достоверности уравнений, используемых для описания процессов переноса тепла, массы и импульса.

Представленная диссертационная работа посвящена разработке новых математических моделей процессов переноса тепла, массы и импульса, основанных на учёте релаксационных свойств материалов. Полученные модели использованы при решении ряда конкретных задач аналитическими и численными методами. В некоторых случаях проведена экспериментальная проверка найденных теоретических результатов. Поскольку полученные результаты могут найти применение в различных отраслях промышленности, в частности в энергетике, то представленная работа является актуальным научным исследованием. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

При выводе новых дифференциальных уравнений переноса тепла, массы и импульса используются классические законы сохранения, равновесия и движения. Феноменологические законы Фурье и Гука представлены в модифицированном виде – с учетом скорости изменения теплового потока и градиента температуры (в законе Фурье) и скорости изменения нормального напряжения и градиента перемещения (в законе Гука), что позволило учесть конечную скорость распространения потенциалов исследуемых полей. Полученные решения проверены на выполнение исходной постановки краевых задач – основного дифференциального уравнения, граничных и начальных условий; показана апостериорная сходимость для численных решений. Следовательно, выводы и рекомендации, предложенные на основе этих решений, обоснованы.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

27. 01 2022

Научная новизна представленных в диссертации результатов

1. Получены новые данные о причинах и условиях возникновения автомодельности, инерции и локализации теплоты в нелинейных задачах теплопроводности с нелинейным источником теплоты, позволившие сделать вывод о связи между линейным гиперболическим и нелинейным параболическим дифференциальными операторами.

2. На основе определения дополнительных искомым функций и дополнительных граничных условий разработан приближённый аналитический метод решения нелинейных задач теплопроводности с нелинейным источником теплоты, получен критерий, позволяющий отделить стационарные процессы от процессов неограниченного возрастания температуры (теплового взрыва).

3. На основе локально-неравновесных математических моделей, включающих релаксационные свойства материалов (время релаксации, характерный пространственный масштаб микроструктуры) выполнены исследования внутренних механизмов переноса теплоты.

4. Разработана математическая модель несвязанной задачи динамической термоупругости с учётом пространственно-временной нелокальности в тепловой и динамической задачах, позволяющая выполнять исследования ударных волн напряжений и перемещений при воздействии на материалы мощных энергетических потоков.

5. Разработана математическая модель колебаний газа с учётом его релаксационных свойств, позволяющая выполнять исследования резонансных и бифуркационно-флаттерных колебаний (биений) при воздействии внешней тепловой и механической нагрузки.

6. Разработана математическая модель продольных колебаний стержня с учётом релаксационных явлений и выполнена её верификация с использованием результатов экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость результатов исследования

1. Впервые получены аналитические решения ряда краевых задач, описывающих процессы теплопроводности, теплового взрыва, колебаний упругих твёрдых тел и газов с учётом релаксационных явлений.

2. Установлены новые особенности протекания процессов теплопроводности, теплового взрыва, колебаний упругих твёрдых тел и газов.

Практическая значимость работы

1. Разработана компьютерная программа для решения нестационарных трёхмерных задач локально-неравновесной теплопроводности, которая позволяет определять значения температур и тепловых потоков при быстропротекающих процессах в телах сложной геометрической формы.

2. Разработаны алгоритмы и комплексы программ, которые были использованы на предприятии РКЦ «Прогресс» при проектировании, доводке, испытаниях и эксплуатации изделий космической техники.

Достоверность результатов диссертации

Достоверность результатов исследования обосновывается адекватностью разработанных моделей реальным процессам, происходящим в конкретных устройствах, сопоставлением найденных решений с численными и экспериментальными данными, а также с точными решениями, приведёнными в независимых источниках.

Публикации результатов работы и их апробация

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них 15 работ являются публикациями в рецензируемых научных изданиях и публикациями, приравненными к ним. Наиболее важные положения диссертации были доложены и обсуждены на Десятой Всероссийской конференции с Международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2016 г.); XXIX Международной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ – 29» (Самара, 2016 г.); X Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (Самара, 2017); Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018 г.).

Автореферат соответствует тексту диссертации и содержит в сжатой форме её основные результаты.

Структура и содержание работы

Работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка используемой литературы, приложений, изложена на 146 страницах основного текста, содержит 92 рисунков. Список литературы включает 108 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, их достоверность, основные положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора исследования.

В первой главе проведён обзор исследований по теме диссертации. Показано, что в настоящее время существуют различные модели локально-неравновесных процессов, однако отсутствует единая непротиворечивая теория локально-неравновесных процессов. Показано, что наряду с совершенствованием известных моделей необходима разработка новых теорий локально-неравновесных процессов.

Во второй главе аналитически и численно исследованы нелинейные задачи теплопроводности с нелинейными источниками теплоты. Установлены автомодельность температуры, инерция и локализация теплоты в определённой области пространства. Также рассмотрено поле температуры в среде с переменными свойствами при действии нелинейного источника теплоты.

В третьей главе исследованы внутренние механизмы переноса теплоты с учётом нелокальности реальных физических процессов. Рассмотрены несколько моделей теплопроводности, для которых получены аналитические решения одномерной задачи теплопроводности и исследованы особенности полученных решений. Построена трёхмерная модель теплопроводности с учётом релаксационных эффектов, с помощью которой проведено численное исследование нестационарного поля температуры куба. Предложен альтернативный способ моделирования изменения температурных полей в теле, который отличается от классического тем, что интенсив-

ность теплообмена с окружающей средой учитывается не величиной коэффициента теплоотдачи, а температурой среды и коэффициентами релаксации тела. Рассмотрена аналогия процессов теплопроводности, диффузии, движения жидкости в трубопроводах, теплообмена в жидкостях, колебательных процессов в твёрдых телах, жидкостях и газах, а также электромагнитных колебаний.

В четвёртой главе проведено исследование ударных волн напряжений и перемещений при тепловом ударе на поверхности материала при помощи аналитического решения одномерной задачи несвязанной динамической термоупругости с учётом релаксационных эффектов. Также проведено численное моделирование остаточных напряжений при термопластическом упрочнении пограничного слоя твёрдого тела в квазистатической постановке.

В пятой главе диссертации представлены результаты теоретического и экспериментального исследования продольных и поперечных колебаний стержней. В ходе теоретических исследований получены аналитические решения динамических задач теории стержней, учитывающих релаксационные свойства материала. Аналитические решения использованы для сравнения с результатами специально поставленных экспериментов.

В шестой главе диссертации приведены результаты разработки математической модели колебаний газа с учётом локальной неравновесности реальных процессов, а также результаты исследований условий возникновения автоколебательных процессов в термоакустике. Получен критерий, определяющий условия возникновения автоколебаний. Показано, что автоколебания возникают в случае, если величина критерия больше или равна его критическому значению. Даны рекомендации по регулированию параметров термоакустического двигателя, позволяющие обеспечить его эффективную и стабильную работу.

В заключении приводятся основные научные результаты и выводы, полученные в ходе проведённых исследований.

Замечания по диссертационной работе

1. Результаты расчётов для пластины в п. 2.1 показывают, что при зависимости коэффициента теплопроводности от температуры возможна автомодельность поля температуры, однако диссертантом не установлена автомодельная переменная и условия возникновения автомодельности. Кроме того, явление автомодельности характерно для полупространства, в пластине же этому мешает наличие второй границы.
2. В п. 2.3 найденная аналитическая зависимость используется для решения обратной задачи теплопроводности, где в качестве экспериментальных данных принимаются значения температуры в одной точке пластины для двух моментов времени, однако корректность такого примера не обоснована, поскольку обычно в экспериментах проводятся измерения в нескольких точках тела для многих моментов времени.
3. В п. 3.1 терминология, принятая для дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, некорректно применяется к дифференциальным уравнениям в частных производных третьего порядка.
4. В п. 3.1 рассматриваются модели теплопроводности (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), однако не делается вывод, какая из них предпочтительнее.

5. В п. 3.2 диссертант выводит трёхмерную модель теплопроводности с учётом релаксационных явлений, пригодную в том числе для наноразмерных тел, однако не учитывает, что на наномасштабах начинает проявляться анизотропия реальных кристаллических твердых тел. Кроме того, не обоснован выбор конкретной модели теплопроводности.
6. В п. 3.2 отсутствует объяснение различий в результатах двух расчётов температуры в центре куба на начальном этапе прогрева, представленных на рис. 3.9.
7. Из текста п. 3.3 можно заключить, что ставится задача нахождения нестационарного коэффициента теплоотдачи, однако задача теплопроводности (3.51) – (3.55) решается при постоянном коэффициенте теплоотдаче. Кроме того, в целях упрощения решения неклассическое уравнение теплопроводности (3.51) аналитически интегрируется при классическом граничном условии 3-го рода (3.55). Однако подобная постановка задачи является недостоверной с физической точки зрения, о чём подробно написано в книге Э.М. Карташова «Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел». Поскольку использование правильного граничного условия не позволяет в общем случае получить аналитическое решение неклассической задачи теплопроводности, следовало бы решать её численно.
8. В п. 3.3 непонятна методика определения коэффициента теплоотдачи из решения неклассической задачи теплопроводности. Следует дать подробное пояснение методики, ведь, вообще говоря, в задачах теплопроводности коэффициент теплоотдачи является заданной величиной.
9. В главе 4 рассматриваются только несвязанные задачи термоупругости с учётом релаксационных эффектов, однако отсутствует обоснование того, что влияние связанности теплового и напряжённого состояний на процесс будет существенно меньше, чем влияние релаксационных эффектов.
10. Из п. 4.2 неясно, какую модель пластичности диссертант использовал при расчётах и почему использовал классическую модель теплопроводности без учёта релаксационных эффектов.
11. В п. 5.1 не обоснован подход, когда уравнение продольных колебаний стержня выводится с учётом гипотезы плоских сечений, которая выполняется лишь приближенно и приводит к известным парадоксам при распространении продольных волн в стержнях, но учитываются релаксационные эффекты, которые должны иметь крайне малую величину.
12. В п. 5.3 сравниваются результаты экспериментального исследования продольных колебаний стержня с расчётами по формулам п. 5.1, однако теоретическая модель не полностью соответствует физической. В эксперименте имеет место внешнее и внутреннее трение, на торце стержня закреплена втулка, начальная скорость равна нулю, заделка является податливой. В теоретической модели п. 5.1 фактически учитывается только внешнее трение, незакрепленный торец стержня свободен от напряжений, начальная скорость не равна нулю, заделка стержня является абсолютно жёсткой. Поэтому допустимость сравнения расчётных данных с экспериментальными требует пояснения.
13. В п. 5.3 на с. 111 утверждается, что «колебания ... совершаются с двумя амплитудами», однако не построен спектр зарегистрированного сигнала, чтобы делать подобные утверждения. Из теоретического решения следует, что сигнал должен быть представлен рядом гармоник, а не двумя.


14.В п. 5.4 приводится мало данных по сравнению расчётов с экспериментами, что не позволяет сделать какие-либо выводы.

Общее заключение по работе

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают общего положительного впечатления о представленной работе. Диссертация Жукова Виталия Владимировича «Исследование внутренних механизмов переноса тепла, массы, импульса с учётом релаксационных явлений» соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор
бюро расчётов и надёжности отдела опытно-конструкторских работ
ПАО «Калужский двигатель»
Супельняк Максим Игоревич


21.01.2022

Рабочий адрес: 248021, г. Калуга, ул. Московская, д.247

сайт организации: kadvi.ru

тел.: 8 (4842) 76-30-00

e-mail: marketing@kadvi.ru



Подпись Супельняка М.И. заверяю:

Зам. зам-ка по работе с персоналом
Александр А.С. Косышев

Я, Супельняк Максим Игоревич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Жукова Виталия Владимировича, и их дальнейшую обработку.

С отзывом официального оппонента ознакомлен


28.01.2022г.