



Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«National Research Tomsk Polytechnic University» (TPU)
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russia
Tel, +7-3822-606333, +7-3822-701779,
Fax +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
OKPO (National Classification of Enterprises and Organizations):
02069303,
Company Number: 027000890168,
VAT/KPP (Code of Reason for Registration)
7018007264/701701001, BIC 016902004

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ)
Ленина, пр., д. 30, г. Томск, 634050, Россия
тел.: +7-3822-606333, +7-3822-701779,
факс: +7-3822-606444, e-mail: tpu@tpu.ru, tpu.ru
ОКПО 02069303, ОГРН 1027000890168,
ИНН/КПП 7018007264/701701001, БИК 016902004

12.09.2022 № 03/6802
на № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке и трансферу
технологий

Л. Г. Сухих
2022 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Михеевой Галины Вениаминовны
«Моделирование локально – неравновесных процессов теплопереноса и
механических колебаний в кристаллических телах», представленной на
соискание учёной степени кандидата физико – математических наук по
специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации

Диссертация Михеевой Г.В. посвящена разработке математических моделей локально – неравновесных процессов теплопереноса и механических колебаний в кристаллических телах с целью исследования их внутренних механизмов с учётом релаксационных явлений. Известно, что классические модели процессов теплопереноса основаны на параболических уравнениях, в которых не учитывается молекулярно – атомное строение среды. Неучёт внутреннего строения вещества связан с тем, что при выводе параболических уравнений принимается допущение о локальном термодинамическом равновесии и гипотеза сплошной среды. В связи с чем, классические модели описывают бесконечную скорость переноса теплоты, мгновенное изменение параметров и проч., определяемые как парадоксы классической теории. Построенные на таких уравнениях математические модели процессов теплопереноса в ряде случаев неадекватно описывают реальные физические процессы: например, при сверхмалых значениях начального временного участка, для наноплёнок. В этих случаях для адекватного описания процессов необходимо учитывать внутреннее состояние конденсированных сред, связанное с учётом их молекулярно – атомного строения, что возможно лишь в случаях, когда дифференциальные уравнения моделей будут включать такие важнейшие характеристики внутренней структуры тел, как

длина и время свободного пробега микрочастиц – носителей энергии (молекул, атомов, электронов, ионов, квазичастиц, фононов и проч.), позволяющих учитывать релаксационные свойства материалов. Именно учёт этих параметров позволяет выполнять оценку запаздывания (инерционности) реальных физических процессов. Учёт этих параметров позволяет распространить модели на область пространственно – временных диапазонов, где классические модели не могут быть использованы. То есть необходимо создать модели, совпадающие с классическими в области их адекватного описания реальных процессов и дополнить их в тех областях, где классические модели вообще неработоспособны. В связи с чем, тему диссертации, связанную с решением именно этой проблемы, следует признать актуальной.

Научная новизна работы

1. Разработаны двухтемпературные модели в металлах, облучаемых ультракороткими импульсами лазерного излучения, позволяющие учитывать нелинейность реальных физических процессов и их пространственно – временную нелокальность.

2. Определены пределы применимости двухтемпературных моделей теплообмена в зависимости от величины объёмного (внутреннего) коэффициента теплоотдачи между электронным газом и кристаллической решёткой.

3. Предложен аналог температуры – квадрат амплитуды волновой функции, позволяющий определять температурное состояние конденсированных сред из решения классического гиперболического уравнения теплопроводности, которое для нанообъектов (сверхтонкие плёнки) приводит к волновому изменению температуры.

4. Показано, что в динамических задачах термоупругости возникают скачки напряжений, обусловленные движением двух волн – тепловой и звуковой, имеющих различные скорости перемещения.

5. Показана возможность получения волновых пакетов с амплитудно – частотной модуляцией в упругих стержнях, подверженных воздействию внешней колебательной нагрузки.

Теоретическая значимость положений и выводов диссертации

Важным теоретическим результатом является детальное исследование влияния объёмного коэффициента теплоотдачи B_i на температурное состояние конструкции. Этот коэффициент, впервые введённый в работах Л.Д. Ландау и А.А. Власова, является основным параметром,

характеризующим теплообмен между высокотеплопроводным электронным газом и теплоинерционной кристаллической решёткой. Известные формулы его нахождения являются приближенными, так как они не могут учесть все факторы, определяющие теплообмен между электронами и решёткой. Наиболее полный их учёт возможен лишь путём верификации математических моделей с использованием результатов экспериментальных исследований с последующей идентификацией внутреннего коэффициента теплоотдачи. Для выполнения таких работ могут быть использованы результаты выполненных в диссертации многосторонних исследований влияния величины объёмного коэффициента на температурное состояние конструкции.

Другим важным теоретическим результатом является определение понятия температуры как квадрата амплитуды волновой функции, являющейся решением гиперболического уравнения теплопроводности, выведенного на основе однофазной релаксации (релаксации только теплового потока) в эмпирической формуле закона Фурье. Это решение применительно к нанообъектам (например, наноплёнкам) не может быть использовано, ввиду описания им колебательного (волнового) изменения температуры в область отрицательных её значений. В диссертации через определение квадрата амплитуды волновой функции впервые показана адекватность этого решения, что подтверждено сравнением с решением уравнения, выведенного на основе двухфазной релаксации в формуле закона Фурье (релаксация теплового потока и градиента температуры)

Применительно к решению динамических задач термоупругости впервые показано, что температурные напряжения формируются за счёт движение двух волн — тепловой и звуковой, каждая из которых влияет на возникновение скачка напряжений, определяя его ширину (по координате), продолжительность (во времени) и величину искомой функции (напряжений). Получение таких результатов связано с разработкой локально — неравновесной математической модели динамической термоупругости и получением её точного аналитического решения в форме бесконечного ряда.

Применительно к исследованию колебательных процессов в закреплённом на одном из торцов стержне с учётом гармонической нагрузки показана возможность формирования волновых пакетов с амплитудно — частотной модуляцией, что позволяет организовать передачу какой — либо информации по длине стержня, со скоростью, равной скорости звука в его материале. Формирование таких пакетов оказалось возможным, благодаря

разработке и исследованию локально – неравновесной модели, полученной на основе трёхфазной релаксации в эмпирической формуле закона Гука.

Практическая значимость результатов работы

Практическая значимость состоит в разработке, анализе и верификации математических локально – неравновесных моделей теплопроводности, термоупругости и колебательных процессов. Детальное исследование точных аналитических и численных решений позволили обнаружить некоторые новые неизвестные ранее особенности протекания указанных процессов. И, в частности, ввиду учёта релаксационных явлений, обнаружена невозможность мгновенного установления граничных условий первого рода – процесс их принятия протекает в течение некоторого диапазона начального времени. Следовательно, существует верхний предел в величинах коэффициентов теплоотдачи, превышение которого невозможно ни при каких условиях нагрева (охлаждения) конструкции. Показано, что в зависимости от толщины пластины, теплообмен может происходить в диффузном, волновом и баллистическом режимах, что свидетельствует о влиянии геометрических размерных характеристик на физические свойства веществ.

Практическое применение могут найти результаты, связанные с формированием волновых пакетов с амплитудно – частотной модуляцией, обнаруженных при исследовании колебательных процессов в стержнях с учётом внешней гармонической нагрузки. Возможность модуляции – управление амплитудой и частотой собственных колебаний стержня путём изменения данных параметров во внешней нагрузке позволяет организовать передачу информации (звук, изображение, тексты, коды и проч.) по металлическому стержню.

На основании вышесказанного результаты работы могут быть использованы в Ракетно-космическом центре «Прогресс», АО «ЦНИИмаш», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», а также в ФГАОУ ВО «Томский политехнический университет» и др.

Достоверность научных положений и выводов

Достоверность результатов диссертации базируется на использовании при разработке математических моделей классических законов сохранения энергии, а также модифицированных формул феноменологических законов Фурье и Гука. Достоверность определяется также соответствием полученных в диссертации результатов расчётов с решениями других авторов, с результатами численных и экспериментальных исследований.

Связь диссертации с государственными программами научных исследований

Исследования проводились при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-38-70021).

Внедрение полученных результатов

Результаты работы были применены в учебном процессе Самарского государственного технического университета, а также в Ракетно-космическом центре «Прогресс» (г. Самара).

Апробация материалов диссертации

Основные положения диссертации обсуждены на XI Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2019 г.), XXI международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 2019 г.), международной научно – технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологии обработки и оборудования в машиностроении 2021» (г. Севастополь, 2019 г.), Central European Symposium On Thermophysics (Eger, Hungary, 2020), III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2020 г.), VI Международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии» (г. Самара, 2020 г.), II Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (г. Красноярск, 2021 г.), XXIII семинар молодых учёных под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики в энергетических установках» (г. Екатеринбург, 2021 г.), III Международной конференции «прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (г. Красноярск, 2021 г.).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 16 научных работах, из которых 1 – индексирована в системе Web of Science, 6 – в системе Scopus, 1 – по списку ВАК, зарегистрированы 3 – программы для ЭВМ.

Личный вклад автора является определяющим на всех стадиях исследования, большая часть работ выполнена автором самостоятельно. В остальных работах автор в одинаковой степени с соавторами принимал участие в разработке моделей и нахождении решений.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы, приложений; изложена на 136 страницах основного текста (без приложений), содержит 89 рисунка, 2 таблицы. Список литературных источников включает 203 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы её цель и задачи исследований, приведены научная новизна, достоверность полученных результатов, положения, выносимые на защиту. Отмечен личный вклад автора диссертации.

В первой главе дан обзор работ по теме диссертации. Показано, что применительно к существующим в настоящее время моделям локально – неравновесных процессов отсутствует единая и непротиворечивая теория. Известные теории недостаточно теоретически обоснованы. Показано, что, вместе с развитием существующих моделей, требуется разработка новых теорий локально – неравновесных процессов.

Во второй главе приводятся результаты разработки двухтемпературных локально – неравновесных моделей нагрева металлов в случае облучения их поверхности сверхкороткими импульсами лазерными излучения. И, в частности, исследования выполнялись для линейной и нелинейной моделей. Показано, что при воздействии лазерного излучения в приповерхностном слое возникает зависящий от пространственной переменной и времени внутренний источник теплоты, за счёт которого происходит нагрев пластины. Температура электронов, ввиду их высокой теплопроводности, может значительно превышать температуры положительно заряженных ионов, составляющих кристаллическую решётку. Детальные исследования теплообмена при различных значениях объёмного коэффициента теплоотдачи позволили определить границы применения двухтемпературной модели. Кроме того, было обнаружено, что при определённых его значениях, начиная с некоторого момента времени, температура кристаллической решётки в отдельных точках пространства может превышать температуру электронов, что объясняется существенным различием их коэффициентов теплопроводности. Так, более высокотеплопроводные электроны, перегреваясь в зоне действия источника теплоты, быстро охлаждаются, передавая теплоту в непрогретые зоны, тогда как более теплоинерционная кристаллическая решётка после её прогрева электронами охлаждается значительно менее интенсивно.

В третьей главе приведены результаты исследований точных аналитических решений уравнений теплопроводности для бесконечной пластины с однофазной и двухфазной релаксацией. Анализ результатов расчётов позволил заключить, что в зависимости от толщины пластины, могут иметь место диффузный, волновой и баллистический режимы теплообмена. Так, при значительно превышающих длину свободного пробега микрочастиц толщинах пластины, изменение температуры в начальном диапазоне времени происходит в виде движущейся тепловой волны со скачком температуры на её фронте (модель с однофазной релаксацией). При толщинах пластины, сопоставимых с длиной свободного пробега микрочастиц, для этой же модели наблюдается волновой перенос теплоты, к которому неприменимо классическое понятие температуры. В связи с чем, в диссертации введено понятие температуры, получаемой после вычисления квадрата амплитуды волновой функции. Как показали исследования, полученные таким путём температуры полностью совпадают с температурами, получаемыми из точного решения модели теплопроводности с двухфазной релаксацией.

В третьей главе также приводятся результаты исследований динамических температурных напряжений при использовании в модели динамической термоупругости точного аналитического решения уравнения теплопроводности с однофазной релаксацией. Благодаря особой конструкции безразмерных переменных, в рассмотрение введен параметр, характеризующий отношение звуковой и тепловой волн. Исследование найденного в диссертации точного решения задачи термоупругости позволило обнаружить скачки напряжений, возникающих в результате движения двух волн — тепловой и звуковой. Были введены понятия продолжительности и ширины скачков применительно к задачам термоупругости, а также получены формулы для их определения.

В четвёртой главе представлены результаты разработки локально — неравновесной модели колебаний упругого стержня, полученной путём трёхфазной релаксации напряжения и градиента перемещения в формуле закона Гука. Исследования точного аналитического решения с учётом внешней гармонической нагрузки показали, что колебания различных точек стержня происходят в противофазе. Было показано, что изменяя частоту и амплитуду колебаний внешней нагрузки можно получать волновые пакеты с различными амплитудно-частотными характеристиками. То есть, таким путём можно получать волновые пакеты с амплитудно — частотной

модуляцией, что позволяет организовать передачу информации по металлическому стержню.

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

Автореферат полностью отражает основные положения и результаты диссертации.

Вопросы и замечания по диссертации

1. Слишком много положений, выносимых на защиту, для кандидатской диссертации. Сами положения написаны не конкретно, с использованием общих фраз. Правильнее было бы в положениях на защиту указать диапазон рабочих параметров моделей, диапазон применения модели.
2. Численные расчеты, позволяющие количественно оценить изменение искомых функций для разработанных в диссертации математических моделей применительно к конкретному материалу приведены только во второй главе диссертации. Работа смотрелась бы интереснее, если аналогичные расчеты были выполнены для задач, связанных с термомеханическими напряжениями. Тогда можно было бы показать значения прочностных характеристик материалов и величины параметров, при которых возникают напряжения, превышающие порог прочности и т.д.
3. Необходимо пояснить, какими параметрами локально-неравновесной модели учитываются длина и время свободного пробега микрочастиц.
4. Чем объясняется увеличение скачка динамических напряжений с увеличением времени нестационарного процесса?
5. Какими устройствами следует дополнить колебательную систему с амплитудно – частотной модуляцией для организации передачи информации по металлическому стержню?

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную тему. Её научные положения и выводы достаточно обоснованы. Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах. Следовательно, диссертационная работа соответствует требованиям, установленным «Положением о присуждении ученых

степеней», а её автор, Михеева Галина Вениаминовна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга, протокол от 2.09.2022 г. № 184.

Заведующий кафедрой - руководитель
научно-образовательного центра
на правах кафедры, доктор
физико-математических наук
(01.04.07 Физика конденсированного состояния)
(01.04.01 Экспериментальная физика)

В.П. Кривобоков

В.П. Кривобоков

02 сентября 2022 г.

Профессор научно – образовательного
центра Б.П. Вейнберга, доктор
физико-математических наук
(01.04.07 Физика конденсированного состояния)
(01.04.08 Физика плазмы)

С.Н. Янин

С.Н. Янин

5 сентября 2022 г.

Подписи В.П. Кривобокова и С.Н. Янина заверяю:

Учёный секретарь

Е.А. Кулинич

Е.А. Кулинич

7 сентября 2022 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30. Телефон: +7 (3822) 60-63-33. Факс: +7 (3822) 60-64-44. E-mail: tpu@tpu.ru