

Отзыв

Официального оппонента по диссертации 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

Классические математические модели процессов переноса включают дифференциальные уравнения, вывод которых основан на принципе локального термодинамического равновесия и гипотезе сплошной среды. Такие модели описывают бесконечные скорости распространения потенциалов исследуемых полей и поэтому они не могут быть использованы для описания физических процессов в диапазоне пространственно – временных переменных, сопоставимых с длиной и временем свободного пробега носителей энергии (молекул, атомов, электронов, ионов и проч.). То есть они не могут быть использованы для исследования процессов переноса в области сверхмалых значений начального временного участка, сопоставимых со временем свободного пробега микрочастиц, для сверхтонких наноплёнок, толщина которых сопоставима с длиной их свободного пробега, а также для всех быстропотекающих процессов.

Учёт времени свободного пробега приводит к моделям, учитывающим конечные скорости распространения возмущений и, следовательно, учитывающим инерцию и релаксацию реальных физических процессов. В связи с чем, тему диссертации, посвящённой разработке моделей локально – неравновесных процессов, учитывающих релаксационные свойства материалов, без сомнения, следует считать актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В основе вывода новых локально-неравновесных математических моделей теплопереноса, термоупругости и колебаний упругих тел положены законы Фурье и Гука, представленные в модифицированном виде (с учётом релаксационных явлений), а также законы сохранения теплоты и импульса. Данные модели являются обобщающими и не противоречат классическим уравнениям переноса, а лишь дополняют их в областях сверхмалых значений временной и пространственной переменных. Сравнение полученных расчётных данных с экспериментальными показало качественное совпадение, следовательно предложенные математические модели колебаний упругих тел могут быть использованы на предприятии АО РКЦ

«Прогресс», что подтверждается приведенными в приложениях диссертации актами внедрения.

Научная новизна

1. Разработана нелинейная двухтемпературная модель теплообмена между свободными электронами и кристаллической решёткой в металлах, облучаемых сверхкороткими лазерными импульсами с учётом пространственно – временной нелокальности реальных физических процессов.

2. Выполнены детальные исследования влияния коэффициента объёмной теплоотдачи на интенсивность теплообмена между электронами и ионами кристаллической решётки с целью определения границ применимости двухтемпературной модели.

3. При волновом переносе теплоты, описываемом гиперболическим уравнением теплопроводности в сверхтонких плёнках, предложено определять действительное изменение температуры через нахождение квадрата амплитуды волновой функции.

4. Путём исследования локально – неравновесной модели динамической термоупругости при тепловом ударе на поверхности тела показано движение двух волн напряжений, определяемых скоростями перемещения тепловой и звуковой волн.

5. Показана возможность амплитудно – частотной модуляции волновых пакетов в локально – неравновесной модели продольных колебаний стержня с учётом внешней гармонической нагрузки.

Теоретическая значимость полученных результатов

Определены новые особенности протекания процессов теплопереноса, динамической термоупругости и колебаний упругих тел, не описываемые классическими моделями. И, в частности, показано, что в нанобъектах (сверхтонкие плёнки) наблюдаются связанные между собой волновой и баллистический переносы теплоты. Волновой и баллистический перенос имеют место при исследовании уравнений теплопроводности с однофазной и двухфазной релаксацией. Показано, что в результате представления температуры как квадрата амплитуды волновой функции, решения задач с однофазной и двухфазной релаксацией оказываются эквивалентными.

При исследовании несвязанной локально – неравновесной задачи динамической термоупругости показано движение двух волн напряжений – тепловой и звуковой. Их возникновение объясняется различными скоростями распространения теплоты и звука в твёрдых телах, что приводит к скачку напряжений с изменяющейся во времени его шириной и высотой.

Применительно к исследованию продольных локально – неравновесных колебаний закреплённого на одном из торцов упругого стержня при воздействии внешней гармонической нагрузки на незакреплённом торце показано, что при различных сочетаниях частот собственных колебаний стержня и внешней нагрузки происходит формирование волновых пакетов с амплитудно – частотной модуляцией.

Практическая значимость работы

Разработанная в диссертации нелинейная двухтемпературная модель теплообмена в кристаллических телах при воздействии ультракороткого лазерного излучения позволила определить температурные фронты как в электронах, так и в решётке, свидетельствующие о конечной скорости волнового и баллистического переноса теплоты. Полученные результаты могут быть использованы при обработке материалов лазерным излучением, а также в объектах микроэлектроники.

Показанная в диссертации возможность формирования амплитудно – частотной модуляции может быть использована для передачи информации по стержню. Так как колебательные процессы в газах и жидкостях описываются аналогичными дифференциальными уравнениями, то передачу информации можно организовать в данных средах со скоростью, равной скорости распространения звука в них.

Достоверность научных положений и выводов диссертации

Достоверность результатов исследований базируется на использовании при построении математических моделей классических законов сохранения – теплового баланса, законов Ньютона, равновесия, движения, а также модифицированных формул эмпирических законов Фурье и Гука. Достоверность определяется также сравнением с решениями других авторов, с результатами численных и экспериментальных исследований.

Публикация результатов работы и их апробация

Материалы диссертации опубликованы в 16 научных работах, из которых 11 являются публикациями в рецензируемых научных изданиях и публикациями, приравненными к ним. Наиболее важные материалы диссертации доложены и обсуждены на двух всероссийских и восьми международных конференциях, в том числе на XXIII семинаре молодых учёных под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (г. Екатеринбург, 2021 г.)

Автореферат соответствует тексту диссертации и содержит в краткой форме её основные положения.

Структура и содержание работы

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

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

В первой главе диссертации приведён обзор исследований по теме диссертации. Показано, что в настоящее время существуют различные модели локально – неравновесных процессов, однако отсутствует их единая непротиворечивая теория. Известные теории не всегда теоретически обоснованы. Показано, что, наряду с развитием известных моделей, необходима разработка новых теорий локально – неравновесных процессов.

Во второй главе диссертации приводятся результаты исследований двухтемпературных моделей нагрева металлов в случае, когда их поверхность облучается ультракороткими импульсами лазерного излучения. И, в частности, исследования выполнялись для трёх моделей: классической, локально – неравновесной и нелинейной локально – неравновесной двухтемпературных моделей. Проведено детальное исследование влияния объёмного коэффициента теплоотдачи Bi на температурное состояние системы. Так было показано, что его увеличение приводит к следующим изменениям в распределении температуры: максимальная температура электронного газа уменьшается, а кристаллической решётки увеличивается; перепад температуры в пределах толщины пластин как для электронов, так и для решётки, возрастает; при больших Bi ($Bi > 1000$), начиная с некоторого момента времени температура начинает превышать температуру электронов, что объясняется её большей тепловой инерционностью. Исследование локально – неравновесной модели применительно к никелевой наноплёнке позволило обнаружить профили температур в виде бегущей волны со скачком на её фронте.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследований точного аналитического решения уравнения теплопроводности для бесконечной пластины с однофазной и двухфазной релаксацией. Под однофазной релаксацией понимается релаксация лишь теплового потока в эмпирической формуле закона Фурье, а под двухфазной – релаксация теплового потока и градиента температуры в этой формуле. Детальный анализ результатов расчётов показал, что в зависимости от толщины пластины решение гиперболического уравнения, полученного с учётом однофазной релаксации в формуле закона Фурье, описывает совершенно различные температурные режимы. Так, при толщинах пластины, значительно превышающих

длину свободного пробега микрочастиц, изменение температуры в начальном диапазоне времени происходит в виде движущейся тепловой волны со скачком температуры на её фронте (подтверждение конечной скорости распространения теплоты). С течением времени высота скачка температуры уменьшается и после его исчезновения распределение температуры совпадает с классическим аналитическим решением параболического уравнения теплопроводности. При толщинах пластины, сопоставимых с длиной свободного пробега микрочастиц, во всем диапазоне времени нестационарного процесса наблюдается волновой перенос теплоты. Классическое понятие температуры в данном случае теряет смысл. Для оценки температурного состояния тела в диссертации вводится понятие температуры как квадрата амплитуды волновой функции, применимое лишь при волновом её изменении, получаемом из решения гиперболического уравнения теплопроводности. В диссертации показано, что температуры, получаемые путём определения квадрата амплитуды, совпадают с температурами, определяемыми из точного аналитического решения уравнения теплопроводности, полученного на основе двухфазной релаксации в формуле закона Фурье. Исследование аналитического решения этого уравнения показало, что для больших толщин пластины (значительно превышающих длину свободного пробега микрочастиц), граничное условие первого рода (тепловой удар) не может быть принято мгновенно – процесс его установления занимает некоторый диапазон начального временного участка. После установления граничного условия, изменение температуры совпадает с классическим точным аналитическим решением параболического уравнения теплопроводности. При толщинах пластины, сопоставимых с длиной свободного пробега микрочастиц, наблюдается баллистический перенос теплоты, при котором охлаждение (нагрев) тела происходит при практическом отсутствии градиента температуры по пространственной переменной. Температуры в этом случае совпадают с их значениями, полученными на основе определения квадрата амплитуды волновой функции.

В третьей главе диссертации представлены также результаты исследований динамических температурных напряжений при тепловом ударе на поверхности пластины в случае, когда используется точное аналитическое решение уравнения теплопроводности, выведенное с использованием формулы закона Фурье с однофазной релаксацией. Характерной особенностью используемой математической модели динамической термоупругости является введение в рассмотрение некоторого нового параметра, характеризующего отношение звуковой и тепловой волн, что оказалось возможным, благодаря использованию особой конструкции безразмерных переменных. Исследование полученного в диссертации точного аналитического решения динамической задачи термоупругости позволило обнаружить движение двух волн напряжений – тепловой и звуковой. Ввиду различия их скоростей,

были определены понятия продолжительности (во времени) и ширины (по пространственной переменной) скачка напряжений. В диссертации получены формулы, позволяющие определять продолжительность и ширину скачка напряжений до момента получения решения динамической задачи термоупругости.

В четвёртой главе диссертации представлены результаты разработки локально – неравновесной модели колебаний упругого стержня, закреплённого на одном из торцов и при воздействии внешней гармонической нагрузки на свободном торце. Гиперболическое уравнение модели получено путём многократной релаксации напряжения и градиента перемещения в эмпирической формуле закона Гука. В результате исследований полученного в диссертации точного аналитического решения показано, что колебания различных точек по длине стержня происходят в различных направлениях (в противофазе). Было показано, что различные сочетания частоты и амплитуды собственных колебаний стержня и колебаний внешней нагрузки приводят к волновым пакетам с различными амплитудно – частотными характеристиками. То есть путём изменения амплитуды и частоты колебаний внешней нагрузки можно изменять амплитуду и частоту собственных колебаний стержня. Следовательно, таким путём можно получать волновые пакеты с амплитудно – частотной модуляцией, что позволяет организовать передачу информации (изображение, звук и проч.) вдоль металлического стержня, со скоростью, равной скорости распространения звука в его материале. Учитывая, что колебания жидкости и газа в замкнутых трубопроводах описываются аналогичными дифференциальными уравнениями, то передачу информации можно организовать и по этим средам.

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

Замечания по диссертации

1. Необходимо пояснить, в какой части локально – неравновесной модели учитывается молекулярно – атомное строение вещества?
2. Непонятно, по какому параметру наблюдается локальное неравновесие модели?
3. Уравнение продольных колебаний стержня выведено с учётом гипотезы плоских сечений, которая выполняется лишь приближённо.
4. В диссертации рассматриваются только несвязанные задачи динамической термоупругости, то есть не учитывается влияние деформации на изменение температурного состояния.

Заключение по диссертации

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают общую положительную оценку работы. В целом диссертация представляет законченную научно – исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, соответствующую специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния. Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021 г.), а её автор, Михеева Галина Вениаминовна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико – математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:
Заслуженный деятель науки
Российской Федерации, доктор физико – математических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)

Формалев
Владимир
Фёдорович

19 сентября 2022 г.

Подпись Формалева В.Ф. заверяю:

зам. зав. кафедрой физико-математических наук



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Почтовый адрес: Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, 125993

Телефон: +7 499 158-40-90

Электронная почта: formalev38@yandex.ru