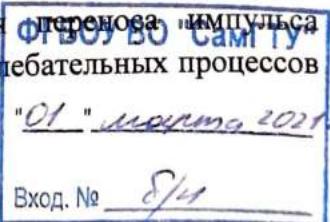


ОТЗЫВ

официального оппонента Карташова Эдуарда Михайловича на диссертацию Еремина Антона Владимировича «Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы. Разработка методов математического моделирования процессов переноса потенциалов физических полей с учетом релаксационных свойств среды является важнейшим направлением развития современной теоретической науки. Отличительной особенностью известных математических моделей процессов переноса является получаемая из их решения бесконечная скорость распространения потенциалов исследуемых полей, которая заложена в формулах феноменологических законов Фурье, Фика, Ньютона, Гука, Ома. Полученные на их основе дифференциальные уравнения переноса не учитывают пространственно – временную нелокальность исследуемых процессов. Причиной получаемой из решения этих уравнений бесконечной скорости распространения потенциалов является неучет в перечисленных законах временной зависимости движущих сил (градиентов соответствующих величин) и их следствий (потоков тепла, массы, импульса, количества электричества). Пространственно – временная нелокальность реальных процессов в наибольшей степени проявляется при времени их протекания, сопоставимом с временем релаксации, а также для любых других процессов при сверхмалых значениях временной и пространственной переменных. При исследовании локально – неравновесных процессов появляется возможность определения неизвестных ранее закономерностей изменения искомых параметров, которые могут быть использованы в научных исследованиях, при разработке и оптимизации производственных процессов. Однако для их описания классическая термодинамика, основанная на принципе локального термодинамического равновесия, не может быть использована. В связи с этим возникает проблема разработки методов математического моделирования процессов переноса с учетом их локальной неравновесности. Поэтому тему диссертации, посвященной разработке нового научного направления исследования процессов переноса с учетом релаксационных явлений, можно считать актуальной.

В первой главе представлены обзор и анализ работ по избранному направлению исследований. Отмечается, что исследованию локально – неравновесных процессов посвящено большое количество научных работ. При выводе дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса с учетом релаксационных явлений, используются различные физические подходы к описанию переноса энергии внутри твердых тел (фонон – электронное взаимодействие, фононное рассеивание, двухфазное запаздывание и др.). Применительно к теории колебательных процессов в механических системах используют различные модели строения твердых тел (Максвелла, Кельвина – Фойхта, многопараметрические модели), в том числе и усложненные модели, учитывающие инерционность исследуемых процессов. Несмотря на наличие большого количества теорий локально – неравновесного переноса, делается вывод об отсутствии единой методологии математического моделирования в данной области исследований. Отмечается, что в наименьшей степени разработана теория переноса импульса применительно к обширной области локально – неравновесных колебательных процессов



(стержней, пружин, струн, упругих жидкостей, газов, распространения электромагнитных колебаний и проч.).

Во второй главе диссертации приведены результаты разработки метода математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса тепла на основе модифицированного уравнения теплового баланса. Согласно предлагаемому подходу инерционные слагаемые, учитывающие запаздывание отклика системы на внешнее возмущение, вводятся непосредственно в уравнение сохранения энергии (уравнение теплового баланса). При этом в процессе вывода модифицированного уравнения теплопроводности используется классическая форма закона Фурье, устанавливающая линейную зависимость между потоком переноса (тепловым потоком) и градиентом потенциала переноса (градиентом температуры). Показано, что разработанный подход согласуется (с точностью до постоянных множителей) с получившей широкое распространение теорией двухфазного запаздывания. На его основе выполнены исследования процессов, имеющих большое прикладное значение, а именно: тепловое воспламенение и взрыв в конденсированных средах; нагрев поверхности твердых тел мощными сверхкороткими лазерными импульсами; теплопроводность в двухслойной пластине; теплообмен в стержне в условиях вынужденной конвекции и др. Из анализа полученных результатов установлены новые, неизвестные ранее закономерности. Например, в п. 2.3, 2.4 установлен факт задержки теплового воспламенения при учете релаксационных слагаемых; в п. 2.7 впервые теоретически описано наличие скачка температуры на контакте двух слоев, имеющих в начальный момент времени разные температуры и др.

Используя метод конечных элементов, предложена дискретная модель теплопроводности с учетом инерционности процесса переноса тепла. Разработанный на ее основе программный комплекс позволил исследовать процессы, протекающие в телах сложной (произвольной) геометрической формы.

В параграфе 2.9 приведены результаты разработки приближенного аналитического метода решения задачи Стефана. Несмотря на решение параболического уравнения, в котором заложена бесконечная скорость распространения теплового возмущения, в рассмотрение вводится температурный фронт, скорость которого конечна. Разделение исследуемого процесса на три стадии по времени позволило получить простые по форме решения краевой задачи во всем диапазоне изменения временной и пространственной переменных.

В третьей главе диссертации представлены результаты разработки методов математического моделирования теплообмена в движущихся жидкостях. При выводе дифференциального уравнения, описывающего исследуемый процесс, выполнена релаксация конвективной и диффузационной компонент вектора теплового потока. На основе метода конечных разностей получено и детально исследовано решение задачи теплообмена в установившемся ламинарном потоке жидкости с учетом диссипации энергии. При построении конечно – разностного аналога сформулированной краевой задачи использовались нестандартные схемы аппроксимации дифференциальных операторов. Из анализа полученных результатов установлено, что ввиду инерционности изменения теплового потока во времени от нулевого его значения до некоторой максимальной величины, физическое установление граничного условия первого рода занимает некоторый промежуток времени, зависящий от коэффициентов релаксации.

С целью определения границ применимости локально – неравновесных моделей в третьей главе диссертации рассмотрен ряд задач теплообмена в жидкости при равенстве нулю коэффициентов релаксации (задача Гретца – Нуссельта), а также задач в стационарных постановках, имеющих большую практическую значимость. При получении решений указанных задач использованы разработанные в диссертации приближенные аналитические методы, основанные на введении новых искомых функций. Развиваемые в диссертации методы позволяют свести решение дифференциальных уравнений в частных производных к решению обыкновенных дифференциальных уравнений.

В четвертой главе приводятся результаты разработки математических моделей колебательных процессов с учетом пространственно – временной нелокальности. Исследованы продольные и поперечные колебания упругих стержней, колебания газа с учетом внешней гармонической нагрузки. При выводе дифференциальных уравнений колебательных процессов использован единый подход, основанный на введении инерционных слагаемых непосредственно в уравнение движения. В п. 4.3, 4.5 выполнен анализ результатов экспериментальных исследований. При их проведении использовано специализированное оборудование РКЦ «Прогресс». Используя данные эксперимента, из решения обратной задачи определены коэффициенты сопротивления и релаксации среды при продольных колебаниях стержня. Выполненные исследования позволили обнаружить некоторые новые закономерности протекания колебательных процессов (наличие «хлопка» при поперечных колебаниях стержня; закон изменения коэффициентов сопротивления во времени; параметры внешней нагрузки, при которых возникают биения газа и др.).

В пятой главе диссертации приведены результаты разработки метода математического моделирования электромагнитных волн, описываемых телеграфным уравнением. Выполнена оценка влияния релаксационных слагаемых на процесс распространения электромагнитных волн в проводнике (в линии с равномерно распределенными параметрами). В частности, учет инерционных слагаемых приводит к сглаживанию профиля волны, устранив скачкообразное изменение искомых функций напряжения и силы тока. В п. 5.4 приведены также результаты исследования плотности электронов в плазме на основе аналитического решения релятивистского уравнения Клейна – Гордона. Из анализа полученных результатов сделан вывод о самосогласованности (взаимосвязанности) колебаний во всем объеме плазмы. В то же время отмечается, что колебания в различных точках имеют различную амплитуду, которая в каждой точке с течением времени может уменьшаться или возрастать. Причем изменение амплитуды во времени в различных точках происходит несогласованно – увеличение во времени амплитуды колебаний в какой – то одной точке может сопровождаться её уменьшением в другой.

В шестой главе диссертации рассматриваются теоретические положения, связанные с построением компьютерных моделей сложных трубопроводных систем. Широкое распространение при их анализе получил метод электрогидравлических аналогий. В частности, используя два закона Кирхгофа, могут быть построены уравнения потокораспределения в трубопроводных системах. Используя указанные законы, построены компьютерные модели конкретных гидравлических систем. Особенностью разработанного в диссертации подхода является использование алгоритма автоматизированной идентификации параметров системы. Отмечается, что при

построении компьютерных моделей гидравлических систем использованы найденные в главе 3 решения задач для динамического и теплового пограничного слоя.

В седьмой главе приведены алгоритмы и комплексы программ, реализующие разработанные в диссертации методы математического моделирования процессов переноса теплоты, массы, импульса с учетом релаксационных явлений. В частности, приведена блок – схема разработанного на языке APDL алгоритма решения трехмерных задач теплопроводности с учетом релаксационных явлений. В п. 7.2, 7.3 представлены результаты численного решения задачи теплопроводности для двухслойной пластины и задачи о нагреве поверхности сверхкороткими лазерными импульсами на базе программного комплекса MathCAD 15.

Научная новизна:

1. Разработана методология математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса на основе модифицированных представлений законов сохранения, в которых учитываются релаксационные явления.

2. Выполнены комплексные исследования разработанных в диссертации математических моделей, описывающих локально – неравновесные процессы тепломассопереноса (тепловое воспламенение и взрыв в конденсированных средах; нагрев поверхности твердых тел мощными сверхкороткими лазерными импульсами; теплопроводность в двухслойной пластине; теплообмен в стержне в условиях вынужденной конвекции; взаимосвязанный тепломассоперенос).

3. Получено модифицированное дифференциальное уравнение неравновесного тепломассопереноса в движущейся жидкости, учитывающее релаксационные слагаемые высшего порядка и диссиацию теплоты вследствие внутреннего трения.

4. Разработан приближенный аналитический метод решения одномерных краевых задач тепломассобмена в жидкости на основе введения дополнительных искомых функций. В отличие от существующих методов в качестве дополнительной искомой функции предложено использовать зависимость плотности теплового потока на поверхности канала от продольной координаты.

5. Сформулированы и детально исследованы математические модели колебательных процессов (продольных и поперечных колебаний упругих тел, вынужденных колебаний сжимаемых жидкостей) и выполнена их верификация.

6. Разработан метод математического моделирования электромагнитных колебаний, описываемых полученным в диссертации телеграфным уравнением, учитывающим запаздывание тока и напряжения в формуле закона Ома.

7. Выполнено исследование распространения электромагнитных волн в ионизированном газе, позволяющее в сочетании с экспериментальными методами выполнять оценку концентрации электронов в плазме.

8. Разработан метод дискретизации трехмерной математической модели локально – неравновесного теплопереноса, а также APDL – алгоритм, реализующий разработанный метод на базе проблемно – ориентированного программного комплекса Ansys.

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики. Теоретическая и практическая значимость состоит в том, что в диссертации впервые получены численные и аналитические решения ряда краевых задач, описывающих процессы теплопроводности, теплового воспламенения, колебаний упругих твердых тел, электромагнитных колебаний с учетом релаксационных явлений. Найденные решения, ввиду учета релаксационных свойств материалов, являются наиболее приближенными к

протеканию реальных физических процессов. Они позволили получить некоторые новые, неизвестные ранее особенности протекания реальных физических процессов. К их числу относятся: невозможность мгновенного принятия граничных условий в реальных физических процессах – их установление включает некоторый диапазон времени начального временного участка; наличие в поперечных колебаниях закрепленного на одном из торцов стержня практически мгновенного перескока (хлопка) при переходе его свободного торца из одного крайнего положения в другое; теоретическое подтверждение самосогласованности электромагнитных колебаний в плазме (колебания с одинаковой частотой в различных точках плазменного потока) и др.

Разработанные в диссертации приближенные методы моделирования гидравлических и тепловых процессов в движущихся жидкостях, позволяют исследовать и оптимизировать режимы работы сложных трубопроводных систем.

Практическая значимость разработок автора диссертации подтверждается актами о внедрении результатов исследований на конкретных предприятиях. Общий экономический эффект превышает 14 млн. руб.

Рекомендации по использованию результатов работы. Полученные результаты могут быть использованы в научно – исследовательских организациях и конструкторских бюро при проектировании и изготовлении тепломассообменного оборудования; создании новых технологий получения наноматериалов и покрытий с уникальными физико – химическими свойствами; при оптимизации режимов лазерной обработки изделий; при разработке режимов охлаждения компонентов наноэлектроники и нанотехники и др. Рекомендуется использование полученных теоретических результатов в учебном процессе высших учебных заведений.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений. Обоснованность и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, полученных в диссертации, подтверждается соответствием разработанных моделей физическим процессам и явлениям, протекающим в реальных технических системах; сравнением результатов с данными натурных экспериментов, а также с опубликованными в открытой печати результатами, полученными другими авторами; непротиворечивостью полученных результатов современному представлению о внутреннем строении веществ и механизмах переноса (тепла, массы, импульса) в них. Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием теории переноса (тепла, массы, импульса), методов математического моделирования, численных методов решения краевых задач. Отмечается, что результаты диссертационной работы прошли апробацию на многих научно-технических конференциях, симпозиумах, семинарах.

Общая характеристика диссертационной работы. Диссертация в полной мере соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней. Соблюdenы основные принципы соответствия: соответствие темы диссертации паспорту научной специальности; соответствие целей и задач; соответствие автореферата и диссертации; соответствие содержания диссертации содержанию опубликованных работ.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в открытой печати в 160 научных трудах. В автореферате приводятся 50 основных научных работ, из которых 26 статей – в международных журналах, индексируемых в базе цитирования Web

of Science, 10 статей – в журналах из базы цитирования Scopus, 14 статей – в журналах из списка ВАК.

Прилагаемые к диссертации документы (свидетельства о регистрации ЭВМ, акты о внедрении разработок) свидетельствуют о практической полезности результатов диссертационной работы.

Замечания и вопросы по диссертации.

1. В п. 2.1 приведены результаты решения нелинейной задачи теплопроводности с учетом инерционности процесса переноса теплоты и зависимости теплофизических свойств (коэффициента теплопроводности) от температуры. В диссертации не указано каким образом было получено численное решение сформулированной краевой задачи. Какие использовались разностные схемы, методы оценки погрешности вычислений?

2. Не выполнен анализ влияния релаксационных слагаемых τ_i , r_i в граничных условиях третьего рода (2.92), (2.93) на критические условия теплового взрыва и период индукции.

3. На рис. 2.34 – 2.37 приведены графики распределения температур в двухслойной пластине. Из анализа представленных результатов и текста диссертации следует, что на контакте слоев отмечается скачок температур. Однако математическая постановка задачи (2.172) – (2.178) включает условие сопряжения (2.176) – условие равенства температур в точке контакта. Необходимо пояснить причины несоответствия результатов решения краевым условиям.

4. На рис. 3.3 приведены графики распределения температуры по ширине канала. Из их анализа видно, что с течением времени происходит практически безградиентное снижение температуры. Следовало бы указать в каких случаях реализуются такие режимы охлаждения/нагрева жидкости. При каких конкретных (в размерном виде) значениях параметров модели?

5. В п. 4.1, 4.2 получены аналитические решения задач о продольных колебаниях упругого стержня с учетом пространственно – временной нелокальности. Решения получены в форме бесконечных рядов. Однако, при анализе результатов не указывается какое количество слагаемых использовано в каждом конкретном случае (см. рис. 4.1, 4.2, 4.6, 4.7 и др.), что существенно усложняет проверку выполненных решений.

6. В главе 6 недостаточно подробно описан механизм автоматизированной идентификации параметров математической модели. Какие параметры варьируются при калибровке гидравлической системы? В каких диапазонах?

Заключение. Диссертация Еремина Антона Владимировича «Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности» представляет собой законченную научно – квалификационную работу, содержащую эффективное решение крупной научной проблемы в области математического моделирования – проблемы создания единой методологии моделирования процессов переноса тепла, массы, импульса с учетом пространственно – временной нелокальности.

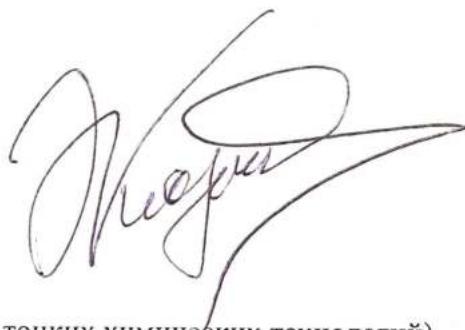
Диссертационная работа «Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности» полностью отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени

доктора технических наук, соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (а именно, пунктам: 1) «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; 2) «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей»; 3) «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; 4) «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»; 5) «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования»), а ее автор, Еремин Антон Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (технические науки).

Официальный оппонент:

Заслуженный деятель науки
Российской Федерации, доктор
физико – математических наук,
профессор, профессор кафедры
«Высшая и прикладная математика»
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский
технологический университет» (Институт тонких химических технологий)

_____ Э.М. Карташов



ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет».

Почтовый адрес: 119454, г. Москва, пр. Вернадского, д. 78.

Тел. +74992156565.

E-mail: kartashov@mitht.ru.



С опозданием однажды

01.03.2021 г. /А.В. Еремин/