

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН)**  
ул. Лобачевского, д. 2/31, Казань, 420111  
для писем: а/я 261, Казань, 420111  
тел. (843) 292-75-97, 231-90-00  
факс (843) 292-77-45  
e-mail: presidium@knc.ru; http://www.knc.ru  
ОКПО 33859469, ОГРН 1021602842359,  
ИНН/КПП 1655022127/165501001

01.02.2021 № 17300/04-12-102

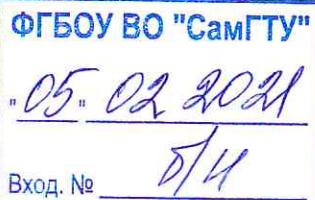
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

## ОТЗЫВ

Официального оппонента 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.**

Классические дифференциальные уравнения переноса импульса, массы, внутренней энергии справедливы в квазиравновесных условиях, при которых влияние конечности скоростей переноса этих субстанций практически ничтожно. На практике, в условиях сильной неравновесности, например, в материалах при лазерной обработке поверхностей, в элементах микроэлектроники и др., допущение о бесконечно большой скорости переноса становится причиной больших погрешностей в расчетах переходных процессов. Разработанная автором методология позволяет минимизировать такие погрешности в расчетах переходных процессов различной физической природы: теплопроводности, диффузии, упругих механических и электромагнитных колебательных процессов и др. Инерционность указанных процессов учитывается путем введения релаксационных слагаемых непосредственно в балансовые соотношения (теплового и материального баланса, уравнение движения и др.). Отличительной особенностью диссертации является разработка дискретной локально–неравновесной модели переноса применительно к трехмерным областям и программного комплекса, позволяющего исследовать температурные поля с учетом конечной скорости распространения температурного фронта, давать оценку влияния многократной релаксации на исследуемые процессы переноса, а также ученная впервые релаксация в уравнениях, описывающих электромагнитные колебания. В связи с этим тему диссертации А.В. Еремина, посвященной разработке методологии моделирования и методов исследования неравновесных процессов переноса, без сомнения, следует считать актуальной.



Диссертация, изложенная на 240 стр., состоит из введения, 7 глав, выводов, списка литературы из 254 наименований и приложения.

**В первой главе** диссертации дается обзор работ отечественных и зарубежных ученых по избранному направлению исследований. Отмечено, что, несмотря на наличие значительного числа теорий локально–неравновесного переноса, отсутствует единая теория, показана необходимость разработки новых теорий локально–неравновесных процессов.

**Во второй главе** представлены результаты разработки методологии математического моделирования локально–неравновесных процессов переноса внутренней энергии на основе модифицированной формы уравнения теплового баланса. Впервые рассмотрено влияние производных от температуры и плотности теплового потока по времени второго и третьего порядка в модифицированном уравнении теплового баланса на процесс переноса теплоты. Получено физически обоснованное решение одномерной краевой задачи с модифицированным дифференциальным уравнением теплопроводности, показавшим, что температура поверхности пластины, даже при принятом в задаче граничном условии первого рода, из-за явления тепловой релаксации и термического демпфирования не способна мгновенно принимать задаваемое значение – на это требуется некоторый промежуток времени.

В главе представлены также результаты разработки метода математического моделирования локально–неравновесного переноса внутренней энергии в трехмерном пространстве, позволяющего исследовать температурные поля в телах сложной геометрической формы. В качестве примера приведены результаты решения трехмерной задачи теплопроводности в шестиугольной прямой призме со сквозным круглым отверстием в центре.

На основе разработанной методологии исследованы процессы теплового воспламенения и взрыва в конденсированных средах, высокointенсивного нагрева поверхности твердых тел потоком лазерного излучения, переноса тепла в нанокомпозитах, взаимосвязанного тепломассопереноса. Даны решения задач для конкретных условий, полученные численным методом с использованием явной схемы аппроксимации дифференциальных операторов. Впервые исследованы локально–неравновесные сопряженные процессы тепло– и массопереноса с учетом их взаимного влияния друг на друга.

**В третьей главе** представлены результаты разработки методов математического моделирования теплообмена в движущихся жидкостях. В рамках разработанной методологии выполнена модификация уравнения энергии, описывающего теплообмен в стабилизированном потоке несжимаемой жидкости. С учетом релаксации конвективной и диффузационной компонент вектора теплового потока, получено локально–неравновесное уравнение теплообмена в установившемся ламинарном потоке жидкости с диссинацией энергии вследствие внутреннего трения. Разработан метод математического моделирования теплообмена в турбулентном пограничном слое при течении вдоль пластины.

**В четвертой главе** на основе единой методологии моделирования процессов переноса с модифицированными законами сохранения разработаны и исследованы

математические модели колебаний упругих тел, жидкостей и газов. В частности, разработана математическая модель продольных колебаний упругого стержня, учитывающая запаздывание во времени как нормального напряжения, так и перемещения. Впервые выполнен анализ влияния многократной релаксации этих величин. Полученные численным путем результаты расчетов с удовлетворительной точностью совпали с результатами выполненных автором экспериментальных исследований продольных и поперечных колебаний стержня из стали 30ХГСА.

В главе приведены также результаты исследований колебаний сжимаемых жидкостей (газов) под действием внешней гармонической нагрузки с учетом явления релаксации. Выполненные автором численные расчеты показали, что в зависимости от частоты внешней нагрузки, коэффициентов релаксации и сопротивления могут наблюдаться различные варианты резонансных колебаний.

**В пятой главе** диссертации рассмотрены результаты разработки метода математического моделирования электромагнитных волн модифицированным телеграфным уравнением, учитывающим релаксацию тока, напряжения и их градиентов. Представленное в диссертации аналитическое решение для напряжения в колебательном контуре показало, что релаксационные явления не позволяют напряжению изменяться скачкообразно даже при внезапном подключении контура к сети – такие изменения происходят плавно, в течении некоторого промежутка времени.

В главе приведены также результаты аналитических расчетов напряженности электромагнитного поля в плазме по модифицированному релятивистскому уравнению Клейна–Гордона–Фока, учитывающее релаксационные явления. Показано, что релаксация сглаживает скачки напряженности электромагнитного поля.

**В шестой главе** приводится комплекс программ для компьютерных моделей трубопроводных систем различного назначения.

**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 заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы, отражающие содержание работы.

### **Научная новизна**

1. Разработана методология математического моделирования локально–неравновесных процессов переноса (внутренней энергии, массы, импульса, заряда) на основе модифицированных форм законов сохранения с учетом производных по времени высшего порядка.

2. На основе современных средств автоматизации расчетов разработан оригинальный APDL–алгоритм для исследования температурных полей в телах сложной геометрической формы с учетом локально–неравновесных процессов.

3. Развит приближенный аналитический метод решения краевой задачи теплопроводности с подвижной границей раздела фаз (задача Стефана), позволивший определить как закон перемещения фронта плавления и глубину термического слоя, так и время полного расплавления тела.

4. Впервые выполнен анализ влияния многократной релаксации перемещения и нормального напряжения на колебательные процессы в стержне. Результаты расчетов по построенной аналитической модели продольных и поперечных колебаний показали удовлетворительное согласие с результатами выполненных автором экспериментальных исследований.

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

6. Сформулировано модифицированное уравнение Клейна–Гордона–Фока, аналитическое решение которого позволило исследовать распространение электромагнитных волн в плазме с учетом релаксационных явлений.

**Теоретическая и практическая значимость результатов работы** состоит в разработке новой концепции математического моделирования локально–неравновесных процессов переноса на основе модифицированных форм уравнений сохранения. Учет релаксационных процессов высокого порядка позволил уточнить процессы переноса, представляющие практический интерес. Первостепенное значение это уточнение имеет для высокоинтенсивных процессов горения твердых топлив, детонации, теплового воздействия на материалы сверхмощными лазерными импульсами фемто– и пикосекундной длительности, фазовых превращений, высокочастотных колебательных процессов. Разработанные приближенные аналитические методы решения краевых задач теплообмена в движущихся жидкостях имеют прикладную значимость для теплообменного оборудования в технологических схемах промышленных предприятий, системах теплоснабжения населенных пунктов и др. Разработанные компьютерные модели сложных многокольцевых трубопроводных систем позволяют выполнить оптимизацию реальных гидравлических режимов их работы, что подтверждено оптимизацией объединенной тепловой сети города Самары.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Полученные результаты могут быть использованы в научно–исследовательских и конструкторских организациях (ВТИ, ЦКТИ им. Ползунова и др.) для всесторонних исследований по рассмотренным проблемам, а также для проектирования и изготовления технических устройств в различных отраслях промышленности, а также в учебном процессе вузов для специальностей: Термофизика и теоретическая теплотехника, Промышленная теплоэнергетика, Гидравлика, Процессы и аппараты и др.

**Достоверность результатов работы** подтверждается соответствием разработанных моделей реальным физическим процессам и явлениям, протекающим в 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.

#### **Апробация диссертации и публикаций**

Основные результаты работы были представлены на более чем двух десятках Всероссийских и международных конференциях, семинарах и форумах в 2012-2020 г.г. Содержание диссертации отражено в 160 публикациях, 50 из которых – статьи в международных журналах, индексируемых в базе цитирования Web of Science, Scopus и в журналах из списка ВАК.

**Автореферат и публикации** автора отражают основное содержание диссертации и соответствуют требованиям, предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ. Работа оформлена в соответствии с существующими требованиями.

### **Замечания по диссертации**

1. На с. 12 утверждается; «*Применение классических аналитических методов и методов интегральных преобразований приводит к решениям в форме бесконечных рядов, содержащих функции Бесселя различного порядка*», не уточняя, что это относится только к телам цилиндрической формы.

2. С. 15: « $\tau_r = a/\vartheta^2$  – время (константа) релаксации,  $\vartheta$  – скорость изменения теплового возмущения». На самом деле  $\vartheta$  - скорость распространения температурных волн.

3. Графики на рис. 2.7 не соответствуют краевым условиям (2.36)-(2.39).

4. С. 42. Фраза «*формула закона Фурье*» представляется не очень удачной, т.к. формула Фурье – это не экспериментально установленный закон, а гипотеза, т.е. одна из математических моделей, как и модели МКЛ, DPL и др., которые в той или иной степени адекватны физическим процессам в тех или иных условиях.

5. С. 45. Использование внесистемных единиц измерения «кал, г» признано ISO не желательным более 40 лет тому назад.

6. С. 89. В задаче о нестационарном течении жидкости в канале принятное допущение о стабилизированном режиме не реально, т.к. гидродинамическая и тепловая стабилизации происходят на довольно протяженном участке, а не сразу от входа в канал.

7. С. 150. Утверждение «*Расхождение результатов расчетов по формулам (4.36), (4.38) с результатами численного решения при указанных пространственно – временных шагах сетки не превышают 0,1%*» следовало бы подкрепить соответствующим графиком, чтобы оно не выглядело голословным.

Указанные замечания хотя и отражаются на качестве изложения, однако не меняют общего положительного мнения о данной работе.

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа на тему: «Методология моделирования тепломассо-переноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности» является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработана новая концепция математического моделирования локально–неравновесных процессов переноса на основе модифицированных форм законов сохранения (теплового и материального баланса, равновесия, движения), в том числе с учетом многократной релаксации исследуемых процессов.

Диссертационное исследование соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и ком-

плексы программ» (отрасль наук – технические): 1. «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; 3. «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; 4. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; 5. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Работа соответствует требованиям, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.

Автор диссертационной работы «Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности», **Еремин Антон Владимирович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,  
д.т.н., доцент, в.н.с. лаборатории «Теплофизика и волновые  
технологии» Института энергетики и перспективных технологий  
ФИЦ Казанский научный центр РАН

Юрий Анатольевич Кирсанов

Подпись Ю. А. Кирсанова удостоверяю:

Главный ученый секретарь ФИЦ КазНИЦ РАН С.А. Зиганшина

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки ФИЦ Казанский научный центр РАН  
420111, Российская Федерация, Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я  
261.

Тел. +7(843) 292-75-97, +7(843) 231-90-00. E-mail: presidium@knc.ru

*С опозданием упаковано*

*Антон Еремин А.В.*

*05.02.2021г.*