

**ОТЗЫВ  
официального оппонента на диссертацию**

Еремина Антона Владимировича

на тему: «Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности» по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» на соискание учёной степени доктора технических наук

**1. Актуальность темы.** Сильнонеравновесные процессы диффузии, теплового воспламенения конденсированных сред, нагрева сверхмощными потоками лазерного излучения и другие имеют широкие возможности их практического применения: для создания новых технологий получения наноматериалов и покрытий с уникальными физико–химическими свойствами; при оптимизации режимов лазерной обработки изделий (поверхностном упрочнении, резке); при разработке режимов охлаждения компонентов наноэлектроники и нанотехники и т.д. Существующие классические уравнения переноса и значительное число теорий локально – неравновесного переноса, не всегда между собой согласующихся, позволяет сделать заключение об отсутствии единой теории в данной области исследований для описания локально – неравновесных процессов. В связи с этим, разработка методологии математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса, численных и приближенных аналитических методов их исследования является актуальной задачей.

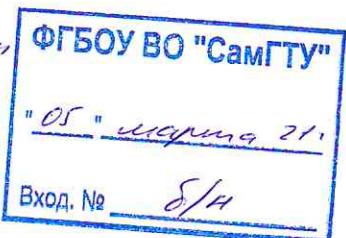
Поэтому тема диссертационной работы является актуальной.

**2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Содержащиеся в диссертации результаты имеют достаточный уровень обоснованности. Приведённые в работе результаты подтверждены экспериментальными исследованиями автора.

**3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Главным научным результатом диссертации являются: разработанная методология математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса на основе модифицированных форм законов сохранения, позволяющих учесть инерционность процессов переноса тепла, массы, импульса путём введения релаксационных слагаемых непосредственно в балансовые уравнения указанных процессов. Возможность учёта производных высшего порядка в модифицированных дифференциальных уравнениях переноса (тепла, массы, импульса) позволила обнаружить новые неизвестные ранее закономерности протекания исследуемых процессов.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18:

*Сдано в приемку 05.03.2012 г. Еремин*



В диссертации разработан класс приближенных аналитический методов решения краевых задач теплообмена в движущихся жидкостях на основе введения новых искомых функций. В зависимости от физических особенностей решаемой задачи, в качестве новой искомой функции используются закон изменения температуры в центре канала по его длине, закон перемещения начальной температуры по продольной координате, толщина пограничного слоя и др. На основе совместного использования интегрального метода теплового баланса и дополнительных граничных характеристик развит приближенный аналитический метод решения краевой задачи теплопроводности с подвижной границей раздела фаз (задача Стефана с аблацией). Эти положения соответствуют пункту 2: *Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей.*

В диссертации на основе метода конечных элементов и теории двухфазного запаздывания разработана дискретная математическая модель локально – неравновесного переноса тепла в твердых телах. Используя современные средства автоматизации расчетов, реализован собственный APDL – алгоритм, позволивший впервые исследовать температурные поля в тела сложной (произвольной) геометрической формы для процессов, протекающих в локально – неравновесных условиях. Это положение соответствует пункту 3: *Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.*

В диссертации разработаны алгоритмы и комплексы программ, реализующие численные и аналитические методы решения сформулированных в диссертации краевых задач локально – неравновесного переноса (тепла, массы, импульса). Это положение соответствует пункту 4: *Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.*

В диссертации разработана методология математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса на основе модифицированных форм законов сохранения. Выполнено комплексное исследование разработанных в диссертации математических моделей, описывающих локально – неравновесные процессы тепломассопереноса: тепловое воспламенение и взрыв в конденсированных средах; высокоинтенсивный нагрев поверхности пластины потоком лазерного излучения; теплоперенос в нанокомпозитах; теплообмен в стержнях произвольного сечения в условиях вынужденной конвекции. Эти положения соответствует пункту 5: *Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.*

**4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** В диссертации разработана новая концепция математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса на основе модифицированных форм уравнений сохранения. Учет релаксационных слагаемых высшего порядка позволил исследовать процессы переноса, представляющие большой интерес с прикладной точки зрения. Ре-

зультаты диссертационного исследования были использованы при выполнении работ по созданию компьютерных моделей тепловых сетей предприятий ПАО «Т Плюс», а именно Безымянской ТЭЦ, Самарской ТЭЦ, Самарской ГРЭС, Центральной отопительной котельной, Привокзальной отопительной котельной (г. Самара), создании обединенной компьютерной модели тепловой сети ОАО «Предприятие тепловых сетей» (г. Самара) с автоматизированной идентификацией параметров, а также при разработке концепции развития системы теплоснабжения г. Самары. Разработанные приближенные методы решения краевых задач теплопроводности и термоупругости использовались при проведении энергетического аудита ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Экономический эффект, подтвержденный актами внедрения, превышает 14 млн. руб.

**5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Результаты диссертации могут быть использованы на теплогенерирующих предприятиях Российской Федерации, в частности, в филиалах ПАО «Квадра»-«Тамбовская генерация», г.Тамбов; «Квадра»-«Липецкая генерация», г.Липецк.

**6. Оценка содержания диссертации, её завершённости.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, изложенного в выводах, списка использованных источников и приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ предметной области по теме диссертации. Выявлены недостатки существующих теорий локально – неравновесного переноса: отсутствие единой теории в данной области исследований. Показано, что наряду с совершенствованием известных моделей, необходима разработка новых теорий локально – неравновесных процессов. Определена научная проблема, сформулирована цель диссертационной работы и задачи, необходимые для ее решения.

**Во второй главе** разработана методология математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса тепла на основе модифицированной формы уравнения теплового баланса, в том числе приведены результаты разработки метода математического моделирования локально – неравновесного переноса теплоты в трёхмерном пространстве, позволяющего исследовать температурные поля в телах сложной (произвольной) геометрической формы.

Исследованы процессы теплового воспламенения и взрыва в конденсированных средах; высокоинтенсивного нагрева поверхности твёрдых тел потоком лазерного излучения; переноса тепла в нанокомпозитах; взаимосвязанного тепломассопереноса.

**В главе 3** диссертации 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. Сформулирована

краевая задача нестационарного локально – неравновесного теплообмена в потоке несжимаемой жидкости.

В диссертации развиваются приближенные аналитические методы построения решений уравнений параболического типа, вывод которых основан на принципе локального термодинамического равновесия и гипотезе сплошной среды. При их разработке использованы понятия, выходящие за рамки классической теории (глубина термического слоя, фронт температурного возмущения, конечная скорость распространения теплоты). В частности, в третьей главе представлено решение нестационарной задачи теплообмена в цилиндрическом канале.

В третьей главе диссертации на основе свойства параболического уравнения, описывающего бесконечную скорость распространения теплоты, приведены аналитические решения следующих задач теплообмена в жидкостях: при изменяющейся по продольной координате температуре стенки трубы; с учётом теплопроводности вдоль потока движущейся среды; с учётом потерь энергии на трение (диссиляция энергии), а также при зависимости вязкости от температуры.

**В четвёртой главе**, используя единую методологию моделирования процессов переноса на основе модифицированных форм законов сохранения, разработаны и детально исследованы математические модели колебаний упругих тел, жидкостей и газов.

В частности, разработана математическая модель продольных колебаний упругого стержня. С целью подтверждения теоретических результатов были выполнены экспериментальные исследования продольных колебаний стального стержня (сталь 22 30ХГСА), закреплённого на одном из торцов. Исследования производились на специализированной установке, включающей стенд для создания начальных удлинений и индуктивный датчик перемещений, фиксирующий продольные колебания свободного торца стержня. Выявлено, что учёт коэффициентов релаксации привёл к удовлетворительному совпадению результатов теоретических и экспериментальных исследований.

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследований колебаний сжимаемых жидкостей (газов) под действием внешней гармонической нагрузки. Результаты численного решения задачи показали, что в зависимости от частоты внешней нагрузки, коэффициентов релаксации и сопротивления могут наблюдаться два варианта резонансных колебаний – бифуркационный резонанс (бienia), при котором амплитуда колебаний возрастает периодически и резонанс, сопровождающийся неограниченным возрастанием амплитуды во времени. Отмечается, что биения наблюдаются при частотах внешней нагрузки близких к резонансным, но не достигающих их.

**В пятой главе** приведены результаты разработки метода математического моделирования электромагнитных волн, описываемых телеграфным уравнением. Известно, что аналитические решения классических телеграфных уравнений приводят к скачкам искомых функций (напряжения или тока). Следовательно, эти уравнения описывают мгновенные их изменения, что эквивалентно передаче электрических потенциалов с бесконечной скоростью. В литературных источниках, где даются

выводы телеграфных уравнений, отсутствует анализ причин скачкообразного изменения искомых функций, получаемых из их точных аналитических решений. В диссертационной работе получено модифицированное телеграфное уравнение с учётом однократной релаксации силы тока, напряжения и их градиентов. Выполнены комплексные исследования полученного уравнения при различных значениях коэффициентов релаксации. Учёт релаксационных слагаемых в формулах закона Ома позволил устраниТЬ скачкообразное изменение искомой функции.

В пятой главе диссертации приведены также результаты исследования плотности электронов в плазме на основе аналитического решения релятивистского уравнения Клейна – Гордона – Фока. От числа электронов в плазме зависит её теплопроводность и электропроводность. Известно, что плазма, в зависимости от плотности электронов, является рассеивающей средой для электромагнитных волн. Используя решение уравнения распространения электромагнитных волн, определены плазменная частота, дебаевский радиус и временной масштаб декомпенсации плазмы.

**В шестой главе** приводится комплекс программ для компьютерных моделей трубопроводных систем различного назначения. При их построении были использованы найденные в диссертации решения задач для динамического и теплового пограничного слоя. На их основе были определены коэффициенты трения и коэффициенты теплоотдачи на внутренних поверхностях трубопроводов. При выполнении гидравлических расчётов применялась автоматизированная идентификация параметров модели – итеративный процесс определения гидравлического сопротивления участков, на основе фактических (определеных экспериментально) данных о гидравлическом режиме сети.

Применение разработанных алгоритмов рассмотрено на примере конкретных трубопроводных систем. В частности, выполнено построение объединенной компьютерной модели тепловых сетей Привокзальной отопительной котельной (ПОК) и Самарской ГРЭС (СГРЭС), входящих в систему централизованного теплоснабжения города Самара.

**В седьмой главе** приведены алгоритмы и комплексы программ, реализующие разработанные в диссертации методы математического моделирования процессов переноса теплоты, массы, импульса с учётом релаксационных явлений.

Диссертация является завершённым научным исследованием.

## **7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.**

Диссертация изложена грамотным научным языком и оптимально структурирована.

Основные результаты диссертации опубликованы в 160 печатных работах автора, в том числе 14 - в журналах из перечня ВАК; 36 - в научных изданиях, индексируемых библиографическими и реферативными базами данных Web of Science и SCOPUS; получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для

ЭВМ; имеется аprobация на международных научных конференциях. Следует отметить, что 7 публикаций без соавторов. Результаты известны достаточно широкому кругу специалистов в области математического моделирования, численных методов и программирования.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

### **Замечания по диссертации.**

1. Заявленная цель работы: «Разработка методологии математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса, численных и приближенных аналитических методов их исследования, а также реализация алгоритмов решения краевых задач переноса (тепла, массы, импульса) в виде комплексов проблемно – ориентированных программ для ЭВМ». Существующие в настоящее время различные методологии позволяют моделировать локально – неравновесные процессы переноса. Поэтому непонятно, для чего требуется разрабатывать ещё одну. Возможно, для установления некоторых новых, неизвестных ранее, особенностей протекания физических процессов, но в заявленной цели это никак не отражено.

2. В главе 4, с целью подтверждения теоретических результатов, были выполнены экспериментальные исследования продольных колебаний стального стержня, закреплённого на одном из торцов. Неясно, почему не были выполнены экспериментальные исследования для подтверждения теоретических результатов моделирования локально – неравновесных процессов теплопроводности; моделирования теплообмена в движущихся жидкостях; моделирования электромагнитных волн; моделирования трубопроводных систем различного назначения.

3. Ни в одной главе не поставлена задача, для чего необходимо модифицировать различные уравнения (дифференциальное уравнение теплопроводности; уравнение энергии, описывающее теплообмен в стабилизированном потоке несжимаемой жидкости; уравнения колебаний упругих тел, жидкостей и газов; телеграфное уравнение), добавляя в них релаксационные слагаемые.

4. Не очень понятно, какое отношение к разработанной методологии математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса имеют задачи исследования сложных многокольцевых трубопроводных систем, рассмотренные в главе 6.

5. В приложении приведены акты внедрения разработок автора с указанием экономического эффекта. Однако методика расчёта экономического эффекта ни в диссертации, ни в приложении к ней не приводится.

6. В выводах не приведено ни одного количественного результата, который бы указывал, насколько предложенная методология превосходит известные.

Отмеченные замечания несколько снижают качество изложения, но они не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, поэтому оппонент считает возможным дать работе положительную оценку.

**8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней.**

Диссертация Еремина Антона Владимировича является научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые научно-технические и технологические решения в области математического моделирования локально – неравновесных процессов переноса, внедрение которых обеспечивает повышение производительности научной и производственной деятельности.

Диссертационная работа Еремина Антона Владимировича на тему «Методология моделирования тепломассопереноса, упругих колебаний и электромагнитных волн с учетом пространственно – временной нелокальности» соответствует паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и отвечает требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук.

Считаю, что автор диссертационной работы Еремин Антон Владимирович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» д.т.н., проф.  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106  
тел. 8(4752)632601  
[www.tstu.ru](http://www.tstu.ru)  
E-mail [polychem@list.ru](mailto:polychem@list.ru)

Юрий Владимирович Литовка

Спеальности, по которым защищена диссертация д.т.н. Литовки Ю.В.:  
05.13.07 - Автоматизация технологических процессов и производств;  
05.17.08 - Процессы и аппараты химической технологии.

Подпись Ю.В.Литовки заверяется  
Учёный секретарь совета Г.В.Мозгова  
«Тамбовский государственный  
технический университет»



Г.В.Мозгова  
19.01.2021