

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Кудяевой Фатимат Хусейновны
«Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

В настоящее время наблюдается растущий интерес к разработке математических моделей, численных методов и программных комплексов, позволяющие формализовать различные критические явления, в том числе и фазовые переходы, имеющие место и при низкотемпературных воздействиях на биологические ткани. Диссертационное исследование соискателя посвящено именно данной тематике. Важность таких исследований, подтверждается их соответствием Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ, в которой особое внимание уделяется совершенствованию научно-технологического потенциала, цифровой трансформации и инновационных решений в области здравоохранения и биомедицины. Современные вычислительные технологии и математические методы служат ключевым инструментом для детального исследования биофизических процессов. Поэтому **тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной и востребованной как в теоретических, так и в прикладных исследованиях.**

Научная новизна диссертации отражена в следующих пунктах:

- предложены одномерные и двумерные математические модели фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани, учитывающие индивидуальные различия в тепловых и биологических свойствах биотканей, а также учитывающие формы инструментов криовоздействия;
- разработаны конструктивные методы решения одномерных и двумерных задач с фазовыми переходами при низкотемпературном воздействии на биоткани, включая начально-краевые задачи для поля изотерм;
- представлены адаптированные численные методы, позволившие получить приближённые решения уравнений фазовых переходов при низкотемпературном воздействии на биоткани, отличительной особенностью которого является использование модифицированных методов с каноническими разложениями случайных функций;
- разработаны комплексы программ, на основе предложенных автором математических моделей и алгоритмов, а также адаптированных численных методов;
- доказаны леммы и теоремы, обеспечивающие существование и единственность решений задач с фазовыми переходами, базирующиеся на условиях монотонности и пространственной локализации решений;
- разработана математическая модель в виде матрицы коэффициентов теплопроводности, основанной на использовании одномерной цепи Маркова, позволившая оптимизировать параметры модели;

- обоснована гипотеза о применимости при построении модели фильтрации шума, метода статусных функций, позволяющий повысить точность и надежность моделирования теплового поведения биотканей и многослойных систем при низких температурах и фазовых переходах.

Полученные результаты демонстрируют высокий теоретический и прикладной вклад работы в науку, что важно для оценки научной новизны диссертации.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Предложенные в диссертации новые модели и алгоритмы обоснованы: строго аргументированы и критически оценены по сравнению с другими известными результатами. Достоверность результатов исследования обеспечивается корректным применением численных методов, математического моделирования, программирования и расчетов. Автором диссертации вынесены на защиту семь научных положений, отражающие суть и новизну выполненных исследований.

Достоверность результатов исследования подтверждается тем, что полученные результаты могут быть обобщены на другие проблемные области. Полученные численные расчеты разработанными программными комплексами совпадают с имеющимися в открытом доступе результатами, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Новые выводы, полученные в работе, согласованы с признанными научными теориями и данными ведущих специалистов, что подтверждается адаптацией к ним классических математических методов, которые строго обоснованы в научной литературе, строгими математическими доказательствами сформулированных теорем, а также результатами проведенных вычислительных экспериментов.

Практическая ценность

Результаты могут быть использованы в разных областях, где имеет место фазовый переход. В частности, в медицине прогнозировать и обеспечивать эффективность криовоздействия на биологические ткани *in vivo*, изучать динамику нестационарного температурного поля, а также фронты криовоздействия и замораживания в биоткани. В физике численное моделирование позволяет учитывать перенос тепла и массы, теплофизические, механические свойства пористой среды, свойства флюида и их изменение в зависимости от температуры и давления, вырабатывать критерии для учёта физических явлений и свойств в решении теплофизических задач с фазовым переходом в пористых средах, что позволяет упростить моделируемую систему. В химии математическое моделирование фазовых переходов позволяет описывать структурные фазовые превращения, анализировать типичные фрагменты экспериментальных фазовых диаграмм замещённых систем с неэквивалентными катионными подрешётками. В инженерном деле помогут при прогнозировании промерзания открытых водопроводных и иных труб для перекачки жидкости в холодных регионах, при моделировании термической обработки металлов и других материалов, выбирать режимы замораживания пищевых продуктов для длительного хранения.

Научная и практическая значимость подтверждена научными публикациями, разработанными автором программами для ЭВМ, прошедшими госрегистрацию, актами о внедрении результатов диссертационного исследования в учебную и

научную работу Кабардино-Балкарского государственного университета.

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, содержащего 304 источника, и 15-и приложений.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи работы, приводящие к достижению цели. Здесь также содержится краткое изложение содержания диссертационной работы.

В первой главе предложена формальная постановка проблемы исследования тепловых процессов криовоздействия на биологические ткани.

Вторая глава содержит два параграфа. В первом параграфе построена математическая модель в виде задачи типа Стефана, которая приведена к каноническому виду. Во втором параграфе получена задача на сопряжение для поля изотерм. Здесь получена и доказана лемма о монотонности оператора дифференцирования для поля изотерм, позволившая доказать теорему единственности задачи Стефана для поля изотерм при низкотемпературном воздействии на биологические ткани.

Третья глава посвящена построению и исследованию одномерных математических моделей при деструкции биотканей сферическими, полусферическими и достаточно протяженными плоскими аппликаторами.

В данной главе также введены новые определения обобщенного решения, субрешения и суперрешения задач со свободными границами и получены условия существования и единственности обобщенного решения вариационной постановки задачи типа Стефана со свободной границей для поля изотерм.

В четвертой главе содержатся разработанные двумерные математические модели, возникающие при моделировании низкотемпературного воздействия на биологические ткани в конкретных криохирургических ситуациях. Данные модели приведены к каноническому виду, а стационарные задачи Стефана сформулированы в цилиндрических и сферических системах координат. В данной главе построена функция Грина, выполнено асимптотическое интегрирование двумерных осесимметричных стационарных и нестационарных задач криодеструкции.

В пятой главе построена математическая модель в виде матрицы коэффициентов теплопроводности для рогового слоя эпидермиса и для улучшения эффективности математического моделирования впервые к задачам с фазовыми переходами предложен метод статусных функций. Обсуждены подходы к подавлению шума при низкотемпературных воздействиях на биологические ткани с учетом многослойной структуры последних. Даны примеры моделирования с использованием алгоритмов скользящего среднего, медианного фильтра и фильтра Калмана.

Основные выводы и рекомендации по результатам проведенного диссертационного исследования представлены в заключении.

В приложениях приведены данные моделирования тепловых полей для различных вариантов постановок задачи Стефана, блок схемы алгоритмов, разработанных программных комплексов, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, разработанных соискателем, а также акты о

внедрении результатов диссертации в научно-исследовательский и учебный процесс Кабардино-Балкарского государственного университета.

Значимость результатов диссертации для науки

Результаты диссертации по теме «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани» могут быть значимы для стратегического развития страны, в частности, в области медицины и биотехнологий.

Разработанные математические модели позволят с высокой точностью прогнозировать температурные поля и зоны воздействия для индивидуальных условий. Это может способствовать развитию превентивной и персонализированной медицины, обеспечению здоровья и долголетия, что важно для национального здравоохранения.

Результаты исследования могут применяться в криомедицине для расчёта режимов низкотемпературного воздействия на биологическую ткань, определения параметров процесса замораживания.

Предложенные математические модели могут использоваться для усовершенствования существующих и разработки новых способов низкотемпературного консервирования эмбрионов млекопитающих и других типов клеток.

Математические методы могут применяться для улучшения медицинской диагностики.

Кроме того, результаты исследования могут найти практическое применение в строительстве, нефтегазодобыче, металлургии, криобиологии и в других областях, где имеет место фазовый переход.

Полученные результаты расширяют теоретические представления о моделировании фазовых переходов, что способствует развитию прикладной математики.

Таким образом, диссертационная работа вносит весомый научный вклад в понимание процессов, лежащих в основе фазовых переходов, и обеспечит перспективы для развития междисциплинарных исследований.

Результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях. Проведенное диссертационное исследование и его основные результаты достаточно полно представлены в 96 опубликованных научных работах, из них: в 2-х монографиях, в 23 научных статьях в журналах из списка ВАК при Минобрнауки РФ (в том числе в 12 профильных журналах категорий К-1, К-2), в 14 статьях в журналах, индексируемых в Scopus, Web of Science (квартили Q3, Q4), в 6-х свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также в 51 статьях других изданиях и материалах научных конференций. Среди основных опубликованных работ преобладают монопубликации.

Представленный автореферат соответствует основному содержанию диссертации и достаточно полно отражает ее основные положения, а также выводы и результаты проведенного исследования.

Замечания

1. На рис. 3.1 не представлены обозначения осей координат, нет пояснений

- принятых обозначений для представленных на нем кривых. На рис. 3.5 приведены только две кривые, хотя в тексте указано, что он отображает расчеты температурных полей для диапазона $0 \leq \beta < 1$, также неясно каким значениям β соответствуют эти кривые. На рис. 3.2-3.5 не представлены размерности осей координат. Непонятно для каких значений β представлены расчеты на рис. 3.10.
2. Не совсем ясно каким образом была осуществлена дискретизация интегралов в выражениях (3.79)-(3.81).
 3. В формулировке леммы 3.2 (см. глава 3, п. 3.2, стр. 149) не уточнена область определения непрерывности коэффициентов и граничных функций.
 4. Не совсем ясно по какому критерию оценивалась достоверность аппроксимаций (5.19)-(5.23).
 5. Из контекста последнего абзаца на стр. 319 (см. глава 5, п. 5.3.2, стр. 319-320), описывающего методику оценки медианы, непонятно для каких данных и почему указано, что «...Значение полусуммы центральных элементов составляет 32,31.».
 6. На взгляд оппонента, в 5-й главе можно было бы сократить объем справочного материала по теории случайных процессов;
 7. В списке литературы ряд ссылок на источники выполнен не по ГОСТу.
 8. По тексту диссертации замечен ряд опечаток и стилистических неточностей: на стр. 73 дана ссылка на (1.5) вместо формулы (1.9); неясно почему в формулах (1.11)-(1.19) температурное поле обозначено как u , а в формулах (1.20)-(1.25) температурное поле уже обозначается как T ; в расшифровке задачи (1.20)-(1.25) присутствует температура T^{**} , а в уравнениях данная температура отсутствует; в (2.31) в условии для $u=u^*$ пропущена закрывающая скобка $]$; имеется ссылка на формулу (3.28), а сам номер формулы пропущен; в (3.100) опечатка в обозначении второй производной по x ; кроме того, замечены опечатки в формулах (3.120), (4.28), (5.11), (5.13), (5.37), а на стр. 126 дана ссылка на рис.1, вместо рис. 3.1; в блок-схемах алгоритмов (приложение 2) в Якобиане вместо функций нескольких переменных указаны функции одной переменной.

Указанные замечания носят в основном редакционный характер и не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Ф.Х. Кудоевой.

Заключение

Учитывая изложенное выше, считаю, что диссертационная работа Кудоевой Фатимат Хусейновны «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани» соответствует паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по отрасли физико-математических наук, и является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной научной задачи создания новых математических моделей, описывающих тепловые процессы, возникающие при низкотемпературном воздействии на биологические ткани на основе задачи типа Стефана, а также оригинального метода изотермических поверхностей. В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как значительное

научное достижение в области математического моделирования фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани, а также разработке алгоритмов и комплексов программ для численного решения данных проблем. Работа соответствует требованиям, установленным в пп. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842 (ред. от 25.01.2024), предъявляемым к докторским диссертациям.

Считаю, что автор диссертационной работы, Кудаета Фатимат Хусейновна, полностью заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
профессор, доктор технических наук,
профессор кафедры «Прикладная математика и
системный анализ» СГТУ имени Гагарина Ю.А.»



Попов
Виктор Сергеевич

24.12.25г.

Научная специальность, по которой защищена докторская диссертация: 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Ученое звание профессора по кафедре «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика».

Полное наименование организации: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.);

Адрес: 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77;

Е-mail: popovvs@sstu.ru;

Тел.: +7 (845) 299 88 25.

Подпись профессора, доктора технических наук Попова Виктора Сергеевича удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета
СГТУ имени Гагарина Ю.А.




А.В. Потапова