



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

12.12.2025 № 02-21-4-405

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Ю.В. Фомин

2025 г.

М.П.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» на диссертационную работу

Кудаевой 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»**

1. Актуальность избранной темы. Актуальность темы диссертационной работы «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани» обусловлена растущей потребностью в создании точных математических моделей, описывающих тепловые процессы и фазовые переходы, происходящие в биологических тканях при низкотемпературных воздействиях, применяемых в криомедицине, криобиологии и смежных направлениях. Такие процессы связаны с изменением агрегатного состояния воды в тканях и образованием подвижных границ раздела фаз, что оказывает определяющее влияние на эффективность и безопасность низкотемпературных технологий.

Разработка математического аппарата для описания и анализа данных явлений позволяет получать новые количественные оценки тепловых режимов, прогнозировать динамику фазовых границ и минимизировать повреждения живых тканей. Тем самым

005217

работа способствует дальнейшему развитию методов математического моделирования в биомедицинской инженерии и является значимым вкладом в повышение точности и предсказательной способности криобиологических моделей.

Работа направлена на решение задач, которые отражают приоритетные направления научного и технологического развития России, обозначенные в указе Президента Российской Федерации по стратегическому развитию страны. В частности, она отвечает следующим основным приоритетам:

Развитие высокотехнологичной медицинской техники и технологий лечения. Исследования способствуют созданию новых методов диагностики, терапии и реабилитации посредством криомедицинских технологий, что отражено в стратегических задачах по внедрению инноваций в здравоохранение.

Укрепление позиций России в области биотехнологий и биоинженерии. Математические модели и алгоритмы работы способствуют развитию отечественных биотехнологий, криобиологии и биомедицинской инженерии, что поддерживается государственными программами, направленными на повышение конкурентоспособности российских научных школ и производства. Содействие развитию цифровых технологий и систем искусственного интеллекта в науке и медицине. Внедрение адаптированных численных методов, автоматизированных программных комплексов и систем поддержки принятия решений связано с приоритетом цифровизации медицины и использования передовых вычислительных технологий.

Обеспечение национальной безопасности и улучшение качества жизни через развитие стратегически важных отраслей науки и технологий. Улучшение методов криотерапии и криохирургии способствует снижению заболеваемости и смертности, повышению качества медицинской помощи и устойчивости здравоохранения.

Таким образом, диссертационная работа не только вписывается в рамки специальности 1.2.2, но и содействует выполнению приоритетных государственных задач по развитию стратегически важных направлений науки и техники, что подчеркивает её значимость и актуальность в контексте национальной научной политики и инновационного развития страны.

2. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

1. Построены одномерные и двумерные математические модели низкотемпературного воздействия на биоткани, отличающиеся от существующих учетом индивидуальных различиях в тепловых и биологических свойствах биотканей и формы инструментов для криовоздействия. Предложенные модели позволяют с высокой точностью прогнозировать температурные поля и зоны воздействия для персонализированных условий (п.1, 3 паспорта специальности 1.2.2).

Данный результат полностью соответствует современным исследованиям в области математического моделирования фазовых переходов и криомедицинских технологий, не имеет аналогов и отличается от существующих научных достижений по нескольким ключевым причинам:

В отличие от классических моделей, которые часто используют усреднённые теплофизические свойства тканей, представленные модели учитывают индивидуальные различия в тепловых и биологических характеристиках конкретных биотканей. Это позволяет более точно описывать реальные процессы теплопереноса и фазовых переходов в анатомически и физиологически неоднородных тканях. Предложенные модели впервые системно включают влияние формы и геометрии используемых криоинструментов. Это принципиально расширяет возможности моделирования в сравнении с традиционными моделями, ограниченными простыми геометриями и условиях воздействия. Использование передовых численных методов при решении задач с фазовыми переходами повышает устойчивость и точность моделей, что отличает их от более грубых аппроксимаций в доступных научных работах. Возможность моделировать температурные поля с учетом индивидуальных параметров конкретного пациента и инструмента обеспечивает более персонализированный подход к криомедицинским процедурам, что существенно повышает клиническую применимость моделей по сравнению с существующими универсальными методами. Построенные одномерные и двумерные математические модели низкотемпературного воздействия на биоткани напрямую связаны с решением проблемы, поставленной в первой главе диссертации.

Одномерные модели служат базисом для понимания основных механизмов теплопереноса и фронтов фазового перехода с упрощённой геометрией, что позволяет исследовать фундаментальные закономерности и выявлять ключевые параметры системы. В свою очередь, двумерные модели обеспечивают более реалистичное описание сложных геометрий биотканей и криоинструментов, учитывая пространственную неоднородность и форму зоны воздействия, что существенно повышает точность прогноза температурных полей и распределения фаз.

Таким образом, построенные модели решают проблему, обозначенную в первой главе - разработку адекватных, точных и универсальных математических инструментов для прогнозирования и оптимизации параметров низкотемпературного воздействия на биоткани, что является фундаментальным для повышения эффективности и безопасности криомедицинских процедур. Предложенные модели представляют собой комплексный подход к математическому моделированию криовоздействий, обладая уникальной персонализацией, геометрической универсальностью и высокой математической строгостью, что делает их принципиально отличными от существующих аналогов в науке.

2. Разработана математическая модель в виде матрицы коэффициентов теплопроводности, основанной на использовании одномерной цепи Маркова. Разработка позволяет оптимизировать параметры модели, в соответствии с требованиями современной методологии математического моделирования, и использовать эффективные численные методы в комплексных программных решениях (п.1,3 паспорта специальности 1.2.2). Данный результат получен в пятой главе. В отличие от традиционных моделей теплопроводности, основанных на решении уравнений теплопереноса классическими методами, эта модель строится в виде матрицы

коэффициентов теплопроводности с применением одномерной цепи Маркова. Такой подход позволяет учитывать переходные вероятности между состояниями, что значительно расширяет возможности моделирования случайных и стохастических процессов теплообмена в биотканях. Модель разработана с возможностью оптимального подбора параметров, что позволяет подстраивать её под реальные биофизические характеристики тканей. Это соответствует современным требованиям адаптивности и точности математического моделирования, что не всегда реализовано в существующих работах. Предложенный матричный формат модели и использование цепи Маркова обеспечивают удобство интеграции в сложные программные решения с применением методов численного анализа, улучшая вычислительную эффективность и устойчивость расчетов. Такой уровень методологической и вычислительной проработки отличает её от более узконаправленных классических моделей. Модель может быть адаптирована для различных уровней и масштабов биотканей и процессов теплопереноса, что делает её универсальным инструментом для исследований и практических приложений, выходящим за рамки традиционных методов.

Предложенная модель в пятой главе представляет собой современный, гибкий и высокоточный инструмент для математического моделирования теплопроводности в биотканях с возможностью эффективной адаптации и интеграции в вычислительные комплексы, что делает её уникальной и отличающейся от существующих аналогов в науке.

3. Сформулирована гипотеза: Построение модели фильтрации шума, в которой для обработки и интерпретации ошибок применяется метод, основанный на комплексных статусных функциях, позволяет повысить точность и надежность моделирования теплового поведения биотканей и многослойных систем при низких температурах и фазовых переходах. (п.1,3,5,8 паспорта специальности 1.2.2).

Данный результат не имеет аналогов и отличается от существующих научных достижений по следующим причинам:

Новизна использования комплексных статусных функций для фильтрации шума. В отличие от классических методов шумоподавления, в данной модели применён оригинальный подход с комплексными статусными функциями, которые позволяют учитывать и интерпретировать ошибки и шумы как комплексные величины, отражающие многогранность и многоуровневость теплосигналов в биотканях. Предлагаемый метод обеспечивает системное снижение влияния шумов и неточностей, повышая качество прогнозирования температурных распределений при сложных условиях низкотемпературных воздействий и фазовых переходов, что существенно отличается от традиционных подходов, ограниченных более простыми фильтрами. Модель учитывает специфику многослойных биосистем, где шумовые искажения могут иметь сложную, взаимосвязанную природу. Применение статусных функций в таком контексте позволяет более эффективно выделять сигнал из шума именно в биофизических условиях, что существенно отличает эту работу от существующих в смежных областях. Гипотеза и соответствующий метод являются интеграцией идей из теории вероятностей, теории функций комплексного переменного и математической

биофизики, что даёт синергетический эффект и способствует развитию новых направлений в математическом моделировании с учётом ошибок и неопределённостей.

В итоге предложенный подход к фильтрации шума с применением комплексных статусных функций представляет собой уникальное научное решение, обеспечивающее более глубокое и точное понимание и моделирование теплового поведения биотканей при низкотемпературных воздействиях, отсутствующее в современных аналогах.

4. Разработаны конструктивные методы решения одномерных и двумерных задач с фазовыми переходами при низкотемпературном воздействии на биоткани, включая начально-краевые задачи для поля изотерм (п.3,5 паспорта специальности 1.2.2).

Данный результат получен в третьем и четвертом главах. В отличие от большинства существующих работ, которые часто ограничиваются одномерными постановками или численными схемами без детального аналитического подхода, здесь разработан комплекс конструктивных методов, позволяющих решать не только одномерные, частично и двумерные задачи фазовых переходов, что существенно расширяет область применения моделей.

Особое внимание уделено постановке и решению начально-краевых задач, что обеспечивает корректность и полноту математической модели, позволяя учитывать реальные граничные и начальные условия, что часто опускается или упрощается в других исследованиях по моделированию фазовых переходов. Методы специально разработаны с учётом физических и биологических особенностей биотканей при криовоздействиях, включая фазовые переходы со свободными границами и возможные неоднородности тканей, что значительно повышает практическую применимость в сравнении с универсальными подходами. Конструктивные методы основаны на продвинутых аналитических и численных подходах, которые позволяют получить устойчивые, точные решения с хорошей сходимостью, что отличается от менее точных и более ограниченных методов традиционных исследований.

В совокупности данный результат представляет собой уникальную методологическую разработку, объединяющую аналитические и численные методы для комплексного решения задач фазовых переходов в биотканях, отличающуюся глубиной, широтой применимости и точностью, отсутствующую в существующих аналогах.

5. Сформулированы и доказаны леммы и теоремы, обеспечивающие существование и единственность решений задач с фазовыми переходами, базирующиеся на условиях монотонности и пространственной локализации решений. Получена конечная оценка времени стабилизации решения к стационарному состоянию, что соответствует современным требованиям численных методов и вычислительных комплексов (п. 1,3 паспорта специальности 1.2.2).

Данный результат получен во второй и третьей главах. В отличие от большинства исследований, которые ограничиваются численными экспериментами или эвристическими подходами, здесь получены строгие математические утверждения об условиях существования и единственности решений задач с фазовыми переходами,

основанные на условиях монотонности и локализации решений. Такой уровень доказательственной базы обеспечивает теоретическую стабильность и фундаментальную строгость.

В отличие от классических методов, не использующих условия монотонности и локализации, разработанный подход активно использует свойства монотонных операторов и локальности решений, что позволяет получать более универсальные и общие результаты, охватывающие широкий класс задач с фазовыми переходами.

В отличие от типовых аналитических или численных методов, здесь получены конечные оценки времени, за которое решение сходится к стационарному состоянию. Это обеспечивает возможность максимально точного прогнозирования поведения системы во времени и отвечает современным требованиям высокоточных численных методов и высокопроизводительных вычислительных комплексов.

Результаты работы можно использовать в реализации современных численных алгоритмов, что повышает практическую ценность результатов и их актуальность для практических и инженерных задач, а таких у аналогов зачастую как раз отсутствует.

6. Реализованы адаптированные численные методы для решения нелинейных алгебраических уравнений и задачи Коши, позволившие получить приближённые решения уравнений фазовых переходов при низкотемпературном воздействии на биоткани. Особенностью подхода стало использование модифицированных методов с каноническими разложениями случайных функций. Получены условия сходимости адаптированных численных алгоритмов, обеспечивающие надёжность и эффективность вычислений, что соответствует современным требованиям разработки и применения численных методов в прикладном математическом моделировании (п.3 паспорта специальности 1.2.2).

В отличие от стандартных численных подходов, применяемых к нелинейным уравнениям и задачам Коши, в данной работе разработаны специализированные адаптированные методы, учитывающие особенности нелинейности фазовых переходов при низкотемпературном воздействии на биоткани, что значительно повышает точность и применимость решений в биомедицинском контексте. Использование модифицированных методов с каноническими разложениями случайных функций - ключевое отличие: традиционные численные методы обычно не учитывают стохастические характеристики и случайные возмущения в моделях. Внедрение канонических разложений случайных функций позволяет эффективно моделировать влияние неопределённостей и шумов, что повышает устойчивость и реалистичность численных решений.

В отличие от многих работ, где сходимость численных методов часто предъявляется как эмпирический факт, здесь сформулированы и доказаны строгие условия сходимости (глава 3), что обеспечивает надёжность расчетов и соответствует современным стандартам разработки численных методов в прикладной математике. Предложенные методы отвечают критериям высокой вычислительной эффективности и надёжности, что делает их пригодными для внедрения в комплексные программные среды и

применение в практических задачах медицинского моделирования и анализа тепловых процессов в биотканях.

Таким образом, результат представляет собой уникальное сочетание адаптивности к биофизическим особенностям, использования современных стохастических методов и строгой математической обоснованности, что выделяет его среди существующих аналогов и повышает его научную и практическую ценность.

7. Разработаны комплексы программ на основе математических моделей, алгоритмов и адаптированных численных методов. Разработки позволяют автоматизировать поиск решений, обеспечивают новые результаты в удобной форме, подтверждают сходимость численных решений к точным и демонстрируют устойчивость вычислений во времени, что соответствует современным требованиям математического моделирования и применению численных методов для создания эффективных программных комплексов вычислительных экспериментов. Эффективность и функциональность разработанных программных комплексов подтверждены свидетельствами программ для ЭВМ, выданными Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) (п.3,8 паспорта специальности 1.2.2).

В работе созданы программные комплексы, интегрирующие математические модели, алгоритмы и адаптированные численные методы. Это обеспечивает автоматизацию поиска решений и удобный интерфейс для проведения вычислительных экспериментов, что значительно повышает удобство и практическую применимость.

Данные программные комплексы демонстрируют доказанную сходимость приближённых решений к точным и устойчивость вычислений во времени, что соответствует высоким требованиям к математическому моделированию в современной науке и инженерии. Получение свидетельств программ для ЭВМ от Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент), подтверждает инновационность, эффективность и юридическую защиту разработок, что придаёт дополнительную ценность результатам.

Таким образом, уникальность и отличия результата заключаются в интеграции теоретических моделей и адаптированных численных методов в полноценные надежные программные комплексы с доказанными свойствами, автоматизацией процесса и официальным патентным статусом, что выводит работу на уровень современного прикладного математического моделирования и инженерных решений.

3. Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов.

Результаты диссертационной работы имеют существенное научное и практическое значение. С научной точки зрения исследование развивает методы математического моделирования и анализа нелинейных задач теплопередачи с подвижными границами - одного из ключевых направлений современной прикладной математики и биофизики. Разработанные подходы Кудасовой Ф.Х. углубляют понимание физических закономерностей процессов фазовых переходов в биотканях при охлаждении и позволяют количественно описывать взаимодействие тепловых, диффузионных и структурных эффектов на микро- и макроуровнях.

С практической стороны полученные Кудасовой Ф.Х. результаты могут быть использованы при проектировании технологий криомедицины, криохирургии, криоконсервации и термодиагностики живых тканей. Предложенные модели позволяют прогнозировать тепловые поля, зоны фазовых изменений и предотвращать повреждение клеточных структур, что важно для оптимизации режимов замораживания и оттаивания биологических объектов.

Таким образом, диссертационная работа сочетает фундаментальную значимость в области математического моделирования с выраженной прикладной ориентированностью на задачи современной медицинской и инженерной практики, обеспечивая научно обоснованную основу для разработки эффективных низкотемпературных технологий.

Диссертационная работа может быть отнесена к одному из приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий развития Российской Федерации (Указ Президента РФ №529 от 18.06.2024) «Превентивная и персонализированная медицина, обеспечение здорового долголетия» и имеет самостоятельную значимость среди критических и сквозных наукоёмких технологий «Биомедицинские и когнитивные технологии здорового и активного долголетия.

4. Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации. Диссертационная работа имеет теоретическую и практическую значимость.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии и уточнении фундаментальных положений математической теории фазовых переходов в сложных биологических средах, а также в создании новых подходов к моделированию нестационарных тепловых процессов с движущейся границей фазового раздела. Работа формирует целостную математическую основу для анализа тепловых и фазовых процессов в биотканях, открывая возможность обобщения полученных закономерностей на широкий класс физических систем с аналогичной структурой.

В работе предложены новые постановки задач Стефана для неоднородных биотканей с учётом их микро- и макроструктуры. Развита методика асимптотического интегрирования и энтальпийного подхода для решения задач со свободными границами в биологических средах.

Теоретическая новизна состоит в уточнении условий движения фазовой границы и связи её скорости с термодинамическими параметрами системы. Введение статусных функций и стохастических корректировок параметров позволило повысить устойчивость моделей, что отражает вклад в развитие теории обработки данных в задачах криобиологии.

Полученные результаты найдут применение в проведении научных исследований и в образовании. Разработанные методики могут использоваться при дальнейших исследованиях фазовых переходов в неоднородных биосредах, включая задачи с размытым фронтом фазового перехода, моделирование процессов дегидратации и

внутриклеточной кристаллизации. Полученные модели и алгоритмы могут быть рекомендованы для курсов и лабораторных работ по прикладной математике, биофизике.

Практическая значимость диссертации «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани» заключается в применении разработанных моделей и методов для решения конкретных прикладных задач в медицинскую, инженерную и исследовательскую деятельность.

Разработанные модели фазовых переходов помогут при прогнозировании глубины и объема зоны криповреждения при лечебных операциях в криохирургии органов сложной формы, что дает возможность точнее подбирать параметры охлаждения и зондирования. Полученные алгоритмы оптимизации помогут определять безопасные и эффективные температурно-временные режимы при проведении операций криодеструкции и криотерапии, снижая риск неконтролируемого повреждения здоровых тканей. Математические модели можно использовать для обучения и симуляции медицинских операций с криовоздействием, что обеспечивает формирование баз данных для клинических симуляторов и систем поддержки принятия решений.

Результаты моделирования могут служить основой для проектирования криотерапевтических систем и зондовых аппаратов с прецизионным контролем охлаждения биоткани, включая аппаратуру для локального охлаждения газовыми потоками.

Разработанные численные методы и программные комплексы могут быть встроены в инженерные пакеты расчета для проектировщиков медицинского оборудования (например, для оптимизации формы и режима теплоотвода в криохирургических инструментах).

Таким образом, практическая значимость работы выражается в том, что предложенные теоретико-математические разработки позволяют повысить эффективность, безопасность и управляемость криомедицинских технологий, а также обеспечивают вычислительную и методическую базу для последующих исследований и внедрений в медицинскую практику и инженерное проектирование.

Эффективность и функциональность разработанных программных комплексов подтверждены свидетельствами программ для ЭВМ, выданными Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) (6 свидетельств программ для ЭВМ).

Полученные результаты диссертации «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани» могут быть использованы в ряде научных и образовательных организаций, а также в медицинских и инженерных учреждениях, осуществляющих исследования и разработки в области криобиологии, криомедицины и биофизики:

Федеральный исследовательский центр прикладной биотехнологии Российской академии наук (ФИЦ ПНЦБИ РАН), Москва - Лаборатория криобиологии. Здесь проводятся фундаментальные исследования криоконсервации биологических объектов и разработка новых методик криомедицинских технологий. Полученные модели и методы

могут использоваться для углубленного анализа процессов фазовых переходов и разработки криопротективных средств.

И институт биоинженерии имени К.Г. Скрябина РАН, Москва. Ведет прикладные исследования в области биоинженерии и биотехнологий, включая разработку криотерапевтического оборудования и методов криоконсервации. Модели и алгоритмы диссертации полезны для проектирования и оптимизации криоинструментов и систем криовоздействия.

Лaborатория криобиологии Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИИРХ). Занимается разработкой технологий криоконсервации и изучением биофизики фазовых переходов в биосредах, где применимы методы из диссертации для анализа и оптимизации фазовых переходов при криоконсервации.

Федеральные медицинские и биофизические центры, такие как Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна (ФМБЦ ФМБА России). Используют методы математического моделирования для разработки и оптимизации методов криотерапии и других низкотемпературных воздействий в клинической практике.

Университеты и учебно-научные центры с программами по прикладной математике, биофизике и медицинской биологии. Например, курсы и лабораторные занятия по математическому моделированию фазовых переходов могут быть введены в таких университетах, как Московский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет, а также профильных технических вузах.

Медицинские учреждения и клиники, специализирующиеся на криохирургии и криотерапии. Полученные оптимизационные алгоритмы и модельные инструменты помогут врачам эффективно планировать процедуры, подбирать индивидуальные режимы охлаждения и уменьшать риски повреждений.

Инженерные компании и конструкторские бюро, занимающиеся разработкой медицинского оборудования. Результаты могут использоваться для проектирования и совершенствования криозондов и систем прецизионного температурного контроля.

Кроме того, эффективность разработанных программных комплексов подтверждена в официальных свидетельствах программ для ЭВМ, выданных Роспатентом, что обеспечивает широкую возможность коммерциализации и внедрения данных разработок в различные отрасли российской науки и промышленности.

Таким образом, результаты диссертации актуальны и востребованы в ведущих научных центрах криобиологии, биофизики и медицины России, а также в образовательных учреждениях, что обеспечивает их широкое применение на разных уровнях от фундаментальных исследований до клинической практики и инженерной разработки. Объединение усилий этих коллективов позволит не только углубить фундаментальные знания, но и обеспечить практическую реализацию разработанных моделей и численных методов, ускорив трансляцию науки в технологии и медицину

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и

заклучений диссертации «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани» обеспечивается математической корректностью поставленных задач, применением к ним классических математических методов, которые строго обоснованы в научной литературе, строгими математическими доказательствами сформулированных теорем, а также результатами проведенных вычислительных экспериментов.

Основные научные положения, выводы и результаты исследования опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и представлены на профильных конференциях, что свидетельствует о признании научного сообщества и независимой верификации достоверности.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом. Структурно диссертация включает введение, пять глав, заключение, список использованной литературы из 304 наименований и приложения. Объем диссертационного исследования составляет 434 страницы, в тексте представлено 57 иллюстраций, 38 таблиц, 15 приложений. Введение составляет – 16 страниц, первая глава – 54 страницы, вторая глава – 35 страниц, третья глава – 80 страниц, четвертая глава – 56 страниц, пятая глава – 79 страниц. Текст диссертации равномерно распределен по главам.

Таким образом, структура и содержание работы свидетельствует о завершенном научном исследовании, в котором получены новые результаты.

7. Замечания по работе.

1. Выявлены несущественные замечания, касающиеся оформления и стилистики текста, которые не влияют на научную новизну и основные результаты диссертации.

2. Допущены мелкие недочёты в оформлении ссылок и библиографии, которые не снижают общую научную ценность диссертации.

3. На стр. 31 в автореферате и в диссертации (глава V) «...датчик не совсем точный, и не совсем плохой» не очень понятен.

4. В работе отсутствует анализ результатов и случаев, когда предложенные методы могут быть менее эффективны или нежелательны.

5. Следовало бы кратко пояснить взаимосвязь понятий многомерности и многофазности в работе.

6. Обоснование применимости цепи Маркова при построении матрицы в виде коэффициентов теплопроводности уместно дополнить пояснениями, почему выбран именно такой стохастический подход и как обеспечивается корректность переходов между состояниями.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационного исследования.

8. Соответствие автореферата основным положениям диссертации. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационного исследования.

9. Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Все положения диссертационной работы полно отражены в 23

научных публикациях, опубликованные в научных изданиях из перечня ВАК РФ, из которых 12 статей опубликованы в журналах, включённые в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертаций по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки), категории К1, К2; в 4-х статьях, опубликованные в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus, и приравниваемые к изданиям из Перечня ВАК по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки), в 2-х монографиях, а также в материалах международных, всероссийских, региональных конференций и форумах. Представленные соискателем сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

10. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней. Диссертация Кудоевой Фатимат Хусейновны «Математическое моделирование фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани». Диссертационная работа Кудоевой Ф.Х. является научно-квалификационной работой, в рамках которого решена актуальная проблема создания новых математических методов моделирования фазовых переходов при низкотемпературных воздействиях на биоткани, решение которой позволит внести вклад в математическое моделирование, прогнозирование результатов криовоздействия на биологические ткани с целью повышения безопасности инвазивного криовоздействия *in vivo*. В диссертационной работе также разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Работа выполнена на высоком научном уровне, имеет практическую значимость, изложена ясным и грамотным языком. Содержание автореферата согласуется с содержанием диссертации.

Тематика и содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки).

Представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.п. 9-11, 13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 ВАК при Минобрнауки России, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ за научную работу, в которой разработаны методы математического моделирования, развиты численные методы и комплексы программ для решения задач низкотемпературного воздействия на биоткани.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Высшей школы технологий искусственного интеллекта федерального государственного автономного образовательного учреждения

высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», протокол № 2/2526 от «26» ноября 2025 года.

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» – 14 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Почтовый адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, литера Б
office@spbstu.ru
Тел. +7 (812) 775-05-30

Профессор высшей школы технологий искусственного интеллекта,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
utkin_lv@spbstu.ru; +7 921 344 63 90

Согласен на обработку персональных данных



/Уткин Лев Владимирович/
26.11.2025

Директор высшей школы технологий искусственного интеллекта, Института компьютерных наук и кибербезопасности СПбПУ, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель образовательной программы «Кросс-отраслевой образовательный центр искусственного интеллекта»
vladimir.muliukha@spbstu.ru; +7 911 937 82 07

Согласен на обработку персональных данных



/Мулюха Владимир Александрович/
26.11.2025

Подписи Уткина Л.В. и Мулюхи В.А. заверяю

