



Япарова Наталья Михайловна

Методы и алгоритмы обработки информации в системах контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динамически изменяющихся данных

05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Работа выполнена на кафедре информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант: Шестаков Александр Леонидович,
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:**

Дилигенская Анна Николаевна,
доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Васильев Василий Иванович,
доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий кафедрой «Вычислительные технологии» ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова».

Лукин Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика и теплотехника» ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Защита состоится 26 октября 2020 г. в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001. С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГАОУ ВО «ЮУрГУ(НИУ)»:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/yaparova-natalya-mihaylovna>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим высылать по адресу: 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ученый совет, тел. +7(351)267-91-23, факс: +7(351)265-62-05

Автореферат разослан "....."2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время перспективным направлением развития различных отраслей промышленности является цифровизация технологических процессов, направленная на повышение эффективности производства. Успешная цифровизация неразрывно связана с эффективным использованием информации в автоматических системах управления технологическими процессами (АСУТП) для систем с распределенными параметрами, когда для оптимизации технологического процесса необходимо с помощью специальных методов оценить точность, достоверность и качество поступающей информации, и, используя высокоточные методы, предусмотреть характер влияния выбранного технологического режима на текущее состояние объекта, на конечный результат, а также оценить уровень соответствия прогноза реальному состоянию объекта. Важнейшими объектами исследования, имеющими вид систем с распределенными параметрами, являются процессы, связанные с распределением тепла. В современных АСУТП, связанных с теплопереносом, особое внимание уделяется повышению точности теплового контроля, выбору режимов внешнего теплового воздействия на объект, позволяющих реализовывать требуемые свойства объекта, а также прогнозированию результатов влияния выбранного режима на состояние объекта.

Реализация в АСУТП высокоточного контроля и функции прогнозирования влияния выбранных тепловых режимов на тепловое состояние и свойства объекта, осуществляется с помощью средств измерения, которые либо вмонтированы в стенки оборудования, либо находятся за его пределами вблизи поверхности объекта. Таким образом, разработка методов и алгоритмов обработки информации, позволяющих по результатам граничных измерений определять температурные поля внутренних точек объекта, формируемые под влиянием выбранного режима теплового воздействия, является актуальным направлением исследований.

Задачи, в которых значения искомым физических величин внутри объекта находят из результатов измерений других величин или из результатов косвенных измерений, в том числе, выполняемых вблизи поверхности объекта, относятся к обратным задачам.

Основы теории обратных задач заложены в работах А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.К. Иванова. Развитию данного направления посвящены работы В.Я. Арсенина, А.Л. Агеева, А.С. Апарцина, А.Б. Бакушинского, А.Л. Бухгейма, Г.М. Вайникко, Ф.П. Васильева, В.И. Васильева, В.В. Васина, В.А. Винокурова, Ю.Л. Гапоненко, А.В.

Гончарского, В.Б. Гласко, А.М. Денисова, В.И. Дмитриева, А.С. Ильинского, С.И. Кабанихина, М.Ю. Кокурина, А.И. Короткого, А.С. Леонова, О.А. Лисковца, И.В. Мельниковой, Л.Д. Менихеса, В.А. Морозова, А.И. Прилепко, В.Г. Романова, С.Б. Стечкина, В.П. Тананы, А.М. Федотова, Г.В. Хромовой, М.А. Шишленина, А.Г. Яголы, J. Beck, J. Gullum, A. Hasanov, V. Hoffmann, A.P. Calderon, D. Lesnic, M. Klibanov, K. Krysa, A. Neubauer, G. Uhlmann, M. Yamamoto и многих других исследователей. Разработке вычислительных схем, связанных с решением задач теплопереноса посвящены работы О.М. Алифанова, П.Н. Вабищевича, С.И. Гинкула, С.В. Лукина Г.М. Марчука, А.В. Ненарокова, А.А. Самарского, В.В. Садовского, В.С. Сизикова, В.М. Шайдурова, M. Ciolkowski, K. Krysa, C. Seby, M. Slodichka, и других исследователей.

Эффективное использование теории и методов решения обратных задач при разработке методов обработки данных в АСУТП неотделимо от использования современных подходов к построению методов обработки технической информации и основ теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, учитывающими особенности теплопереноса, связанные с пространственно-временным распределением управляемых величин. К распределенным параметрам относят плотность, теплоемкость, температуру, плотность внутренних тепловых источников и другие физические характеристики, непрерывно меняющиеся в каждой точке объекта. С разработкой и исследованием методов управления системами с распределенными параметрами связаны работы А.Г. Бутковского, Ф.П. Васильева, А.И. Егорова, Ю.В. Егорова, А.Н. Дилигенской, В.А. Коваля, Ж.-Л. Лионса, К.А. Лурье, И.М. Першина, Н.В. Пилипенко, Ю.Э. Плешивцевой, В.И. Плотникова, Л.С. Понтрягина, Л.М. Пустыльниковой, Э.Я. Рапопорта, Т.К. Сиразетдинова. Разработке подходов к построению методов обработки информации и методов измерений в АСУТП посвящены работы А.Г.Ивахненко, Ж. Макса, Г.Н. Солопченко, Р.Е. Тайманова, А.Л. Шестакова, A. Forbes, M. Henry и других исследователей.

Особого внимания требуют технологические процессы, в которых, с одной стороны, установить датчики контроля или регулировать интенсивность внешнего теплового воздействия возможно только вдоль некоторой части границы объекта, а, с другой стороны, невозможно измерить начальную температуру внутри всего тела без нарушения целостности объекта. К таким процессам относятся вторичная термическая обработка при горячей прокатке, комплексная термообработка изделий, тепловой контроль

работающих систем и механизмов, неразрушающий тепловой контроль изделия. При исследовании теплопереноса в таких системах математические модели представлены обратными задачами с неизвестными начальными условиями и граничными условиями, заданными на части границы. Общей чертой существующих методов решения обратных задач, является то, что численная реализация методов требует известных начальных условий. Это является принципиальным препятствием к использованию существующих алгоритмов в ситуации, когда начальная температура объекта неизвестна и возникает необходимость в разработке принципиально иного единого подхода к построению методов решения обратных задач с неизвестными начальными условиями, устойчивых относительно погрешностей исходных данных и служащих основой для разработки алгоритмов прогнозирования температуры во внутренних точках объекта по результатам граничных измерений в условиях отсутствия информации о начальном состоянии системы.

Учитывая вышесказанное, разработка методов обработки информации, основанных на базовых положениях теории обратных задач теплопереноса, теории управления системами с распределенными параметрами, позволяющих получать значения требуемых температурных функций в условиях неполных и динамически изменяющихся исходных данных является актуальной научно-технической проблемой.

Цель работы заключается в разработке и исследовании методов и алгоритмов обработки информации в системах контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динамически изменяющихся данных.

Основными задачами диссертационного исследования являются:

1. Разработка и теоретическое обоснование единой процедуры редукции исходных задач определения температуры в контрольной точке и идентификации внутреннего теплового источника в системах с известным начальным тепловым состоянием к моделям, характеризующим явную зависимость искомых тепловых функций от результатов граничных измерений.

2. Разработка и верификация метода определения температуры во внутренней контрольной точке объекта и метода идентификации внутреннего теплового источника, базирующихся на едином подходе, служащих основой для алгоритмов обработки информации о граничных измерениях, и позволяющих достичь требуемого уровня точности при фиксированном временном интервале между измерениями.

3. Разработка и верификация численных методов решения обратных задач линейного теплопереноса с неизвестными начальными условиями, служащих основой для разработки алгоритмов прогнозирования температур во внутренних точках объекта с неизвестным начальным тепловым состоянием, подвергаемого выбранному внешнему тепловому воздействию при линейном теплопереносе, оценка точности результатов прогнозирования.

4. Разработке процедуры редукции задачи нелинейного теплопереноса в объекте с неизвестной начальной температурой к математической модели с уравнениями, характеризующими явную зависимость теплофизических характеристик материала от температуры.

5. Разработка и верификация алгоритмов прогнозирования температурных полей, формируемых под влияния внешнего теплового режима воздействия, в объекте с неизвестным начальным тепловым состоянием при нелинейном теплопереносе, оценка точности результатов прогнозирования температур.

6. Разработка подхода к обработке первичных измерений и построение математической модели зависимости температуры от сопротивления, единой для сенсоров, изготовленных из различных материалов, и диапазонов измерений, разработка, теоретическое обоснование и оценка точности метода идентификации коэффициентов математической модели.

7. Разработка алгоритмов определения температур по результатам измерений сопротивлений, позволяющих сформировать избыточную информацию, необходимую для оценки точности измерений, а также подходов и алгоритмов оценки точности получаемых температур.

Объектом исследования являются процессы теплопереноса, представленные обратными задачами, характеризующими закономерности определения температур или тепловых функций по результатам косвенных измерений.

Предметом исследования являются модели, характеризующие явную зависимость искомых температур, внутренних тепловых источников от внешнего теплового воздействия, методы и алгоритмы, позволяющие по результатам граничных измерений, содержащих отклонения от действительных значений, прогнозировать значения требуемых распределенных параметров в зависимости от выбранного режима внешнего теплового воздействия, в том числе прогнозировать температуру в условиях непол-

ной информации о начальном тепловом состоянии системы, методы и алгоритмы, позволяющие определять температуру из результатов первичных измерений и оценивать точность получаемых температур

Тематика работы. Содержание диссертации соответствуют следующим пунктам специальности 05.13.01-"Системный анализ, управление и обработка информации":

П1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

П6. Методы идентификации систем управления на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации.

П11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем

1. Разработаны модели процессов теплопереноса, методы и алгоритмы обработки результатов граничных измерений в объектах с постоянными теплофизическими характеристиками и известной начальной температурой, позволяющие реализовать явную зависимость искомых распределенных параметров от тепловых функций, известных вблизи поверхности объекта.

2. Предложен единый подход к численному решению обратных задач теплопроводности с неизвестными начальными условиями, связанных с прогнозированием влияния выбранного управляющего режима внешнего теплового воздействия на формирование температурных полей при линейном и нелинейном теплопереносах в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием

3. Разработаны вычислительные алгоритмы решения обратных задач линейного теплопереноса с неизвестными начальными условиями, служащие основой методов обработки информации о результатах граничных температурных измерений, позволя-

ющих прогнозировать температуру во внутренних точках при линейном теплопереносе в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием

4. Разработаны вычислительные алгоритмы решения обратных задач нелинейного теплопереноса с неизвестными начальными условиями, служащие основой для методов обработки результатов граничных температурных измерений, позволяющих прогнозировать температуру во внутренних точках при нелинейном теплопереносе в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием

5. Предложена математическая модель, характеризующая явную зависимость температуры от первичных измерений электрических сопротивлений, единая для сенсоров, изготовленных из различных материалов и температурных диапазонов. Разработан метод идентификации параметров математической модели. Обоснована его оптимальность по порядку.

6. Построен единый метод определения температуры по результатам обработки первичных измерений сопротивлений, позволяющий формировать избыточную информацию, необходимую для оценки точности и качества измерений. Предложены алгоритмы оценки точности и качества измерений, основанных на обработке избыточной информации.

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в создании новых моделей, представленных интегральными уравнениями, характеризующим явную зависимость искомых температур или функций внутреннего источника от граничных измерений в объектах с известным начальным тепловым состоянием; в разработке, исследовании методов и алгоритмов решения линейных и нелинейных обратных задач с неизвестными начальными условиями, служащих основой для методов обработки результатов граничных измерений для прогнозирования температурных полей в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием; в разработке новых алгоритмов обработки результатов измерений сопротивлений, используемых для формирования температурных значений в исходных данных обратных задач и позволяющих проводить качественную оценку результатов измерений.

Практическая значимость диссертационного исследования определяется тем, что его основные положения, предложенные модели, методы и алгоритмы создают основу для разработки методов и алгоритмов обработки информации в системах контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динами-

чески изменяющихся данных. Полученные результаты используются при разработке рекомендаций по выбору и регулированию настраиваемых параметров температурных режимов, реализуемых в системах контроля и управления тепловым состоянием, при формировании и оптимизации технического регламента технологических процессов, связанных с теплопереносом.

Методология и методы диссертационного исследования Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются теория и методы решения некорректных задач, теории теплопереноса, операционного исчисления, аппарат конечно-разностных уравнений, конечных интегральных представлений и системного анализа.

Положения, выносимые на защиту

1. Интегральные модели обратных граничных задач теплопереноса и идентификации внутреннего теплового источника в объекте с известным начальным тепловым состоянием, алгоритмы определения температур и тепловых источников внутри объекта по граничным тепловым функциям, формируемым на основе результатов измерений, выполняемых с фиксированным временным интервалом.

2. Методы прогнозирования температуры во внутренних точках объекта при линейном теплопереносе в объектах с неизвестной начальной температурой.

3. Методика аппроксимации коэффициентов в задаче нелинейного теплопереноса в объекте с теплофизическими характеристиками, зависящими от температуры с неизвестным начальным тепловым состоянием

4. Методы прогнозирования температуры во внутренних точках при нелинейном теплопереносе в объекте с неизвестным начальным тепловым состоянием, подвергаемом влиянию внешнего теплового режима воздействия.

5. Модель зависимости температуры от электрических сопротивлений, формирующая единый подход к определению температуры в различных температурных диапазонах по измерениям, полученных от сенсоров изготовленных из различных металлов, метод идентификации параметров разработанной модели

6. Методы определения температур из результатов первичных измерений сопротивлений, алгоритмы оценки точности измерений.

Реализация результатов исследования. Полученные в работе результаты использованы при выполнении НИР по проекту "Разработка, исследование и реализация

алгоритмов обработки данных динамических измерений пространственно- распределенных объектов"(в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ, техническое задание 8.9692.2017/8.9 от 17.02.2017), при обработке данных, предоставленных SMS GROUP, на ЧЭРЗ АО "ЖЕЛДОРРЕММАШ", в Промышленной Группе "Метран", на ООО "Челябинский Компрессорный Завод".

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования обсуждались и докладывались на XXI Международном конгрессе по измерениям в исследованиях и промышленности (XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry. 2015, Prague. Czech Republic), на XXVII Международном конгрессе математиков 2014 г. (International Congress of Mathematicians, Mathematics in Science and Technology, Seoul, Korea, 2014), на XXVIII Международном конгрессе математиков 2018 г. (International Congress of Mathematicians, Mathematics in Science and Technology, Rio de Janeiro, Brazil, 2018), а также на международных конференциях, в том числе на международных конференциях "Обратные и некорректные задачи математической физики Тезисы докладов международной конференции"(Новосибирск, НГУ, 2007, 2012), "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики"(Новосибирск, НГУ, 2019), International Conference "Inverse Problems: Modeling and Simulation", (Izmir University, Turkey, 2012, 2014), Applied Inverse Problem Conference, mini-symposium "Theory and Numerical Methods of Recovery of Coefficients of PDEs from Boundary Measurements" (KAIST, Daejeon, South Korea, 2013), 8-th International Conference on Inverse Problems in Engineering (Silesian University of Technology, Krakov, Poland, 2014), на VII международном симпозиуме «Обобщенные постановки и решения задач управления (GSSCP-2014)"(Геленджик,2014), SIAM Conference on Control and its Application(France, 2015), "Современные проблемы электрометаллургии стали (Магнитогорск, 2015, Первоуральск, 2019), 14th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics: New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Systems Reliability, Maintainability and Safety (Milan, 2016), International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Челябинск, 2016, 2018), 2nd International Conference Ural Conference on Measurements (UralCon) (Челябинск, 2017) Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (2017,2018, 2019, Bulgaria) .

Публикации. Основные научные положения, выводы и результаты диссертации опубликованы в 43 работах, из них 15 в изданиях из перечня ВАК, 10 в изданиях,

входящих в международные базы цитирования Scopus, Web of Science, получено 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, зарегистрированных в государственном Реестре.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, содержащего 245 наименований и 10 приложений. Общий объем работы составляет 333 страницы, основного текста – 295 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. В этом разделе обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные результаты исследований, а также приведены сведения о публикациях, положениях, выносимых на защиту, апробации и реализации результатов исследования.

Первая глава содержит анализ проблемы обработки информации, полученной на основе косвенных измерений в условиях неполных и динамически изменяющихся исходных данных в системах контроля и прогнозирования теплового состояния объекта, подвергаемого внешнему тепловому воздействию. Представлена предметная область исследования, выявлены специфические особенности технологического оборудования, систем управления, контроля и прогнозирования в АСУТП, специфика первичных измерений, требующие разработки новых методов обработки информации, основанных на решении обратных задач. Сформулированы цель и основные задачи исследования.

К технологическим процессам, связанными с теплопереносом, относятся термообработка, вторичная обработка при горячей и холодной прокатке, неразрушающий тепловой контроль. Специфика проведения температурных измерений при реализации технологического процесса заключается в том, что средства измерения температуры монтируются в стенках оборудования и внутренние точки объекта недоступны для проведения измерений и тепловое состояние объекта определяется из результатов косвенных измерений, выполненных вблизи поверхности объекта, а также из априорной информации о его начальном тепловом состоянии. В результате, ограничения, связанные с недоступностью внутренних точек объекта для непосредственных измерений и прямого теплового воздействия, приводит к необходимости привлечения методов решения обратных задач теплопереноса при разработке методов обработки информации, предназначенных для определения теплового состояния объекта. Обратные задачи

теплопереноса представлены уравнениями в частных производных параболического типа с коэффициентами, определяемыми в соответствии с теплофизическими характеристиками материала. Начальные условия в этих задачах формируются на основе априорной информации о начальном тепловом состоянии объекта. Граничные условия формируются на основе известных характеристик внешнего теплового воздействия и результатов измерений температуры вблизи поверхности, желаемого температурного поля поверхности объекта и являются управляющими воздействиями.

При построении методов обработки информации в АСУТП, связанных с определением теплового состояния объекта, необходимо учитывать присутствие внутренних тепловых источников, которые могут оказывать существенное влияние на формирование температурных полей. Возможность выявить присутствие и определить характер этих влияния источников значительно повышает точность определения температурных полей внутренних точек объекта. Задачи идентификация внутренних тепловых источников относятся к классу обратных коэффициентных задач, которые, как правило, представлены интегральными уравнениями Фредгольма первого рода.

Таким образом, для повышения эффективности и оптимизации систем обработки информации о тепловом состоянии объекта, реализуемых в АСУТП, а также для повышения точности результатов обработки, требуется сформировать единый подход к построению математических моделей и алгоритмов определения температуры во внутренних точках и идентификации внутреннего теплового источника по результатам граничных измерений, разработать вычислительные схемы, реализующие предложенные алгоритмы, и оценить точность получаемых результатов.

Многие производственные процессы, такие как комплексная или вторичная термообработка, включают несколько технологических этапов, каждый из которых сопровождается определенным режимом теплового воздействия. В результате, к началу очередного этапа, внутри тела накапливается остаточное тепло и возникает разница между температурами во внутренних точках и на его поверхности, которую невозможно определить без нарушения целостности объекта. Это приводит к тому, что при разработке методов обработки информации о тепловом состоянии тела, подвергаемого тепловому воздействию на очередном этапе, сформировать начальные условия из результатов измерений не представляется возможным. Ситуация неизвестных начальных условий также возникает при проведении теплового контроля работающих систем

и механизмов и приводит к необходимости разрабатывать численные методы решения обратных задач теплопереноса с неизвестными начальными условиями.

Общей чертой существующих методов решения обратных задач является то, все они разрабатываются с учетом известных начальных условий, что является принципиальным препятствием для использования этих методов при разработке алгоритмов обработки информации о тепловом состоянии тела с неизвестной начальной температурой. Проводимые ранее исследования в области решения обратных задач с неизвестными начальными условиями, в основном, связаны с теоретическим обоснованием существования и единственности в определенной подобласти решений обратных задач для различных уравнений в частных производных. Разработка же численных алгоритмов осуществлялась, как правило, для отдельных задач при фиктивно введенных начальных условиях. Использование такого подхода приводила либо к интегральным уравнениям, либо к изменению математической модели, когда уравнения теплопроводности с помощью разложений в ряд Тейлора или преобразования Резницкой заменялись гиперболическими уравнениями либо эллиптическими уравнениями. Такой подход позволял осуществлять разработку вычислительных алгоритмов только для отдельных задач и требовало проведения дополнительных исследований связанных со сходимостью и обоснованием взаимосвязи получаемых решений с точными решениями исходных задач, а также к разработке дополнительных алгоритмов и методов позволяющих интерпретировать полученные решения с точки зрения исходной задачи. Таким образом, формирование единого подхода к численному решению обратных задач с неизвестными начальными условиями и разработка алгоритмов решения этих задач представляет перспективную область исследований.

К обратным задачам также сводится проблема разработки метода обработки первичных измерений, полученных с помощью термометров сопротивлений, когда температурные значения, служащие основой для формирования граничных условий, находят из результатов первичных измерений сопротивлений. При этом, уровень точности результатов измерения оказывает существенное влияние на качественные характеристики исходных данных обратных задачах теплопереноса, и разработка алгоритмов и методов оценки точности и качества первичных измерений является важной составляющей при построении методов обработки информации в АСУТП.

Разработка методов обработки измеренной информации, связанных с оценкой качества измерений, посвящены работы Р.Е.Тайманова, Г.Н. Солопченко, А.Л. Шестакова, М. Henry, А. Forbes и других исследователей. В настоящее время, в основном, сформулированы общие концепции оценки точности и качества первичных измерений. В подходе, предложенном М. Henry, для оценки результатов измерения введено понятие неопределенности измеренной величины (VMV), предложена общая концепция оценок, приведены ситуации, соответствующие разным уровням неопределенности. В подходе, предложенном Р.Е. Таймановым, для оценки результатов измерения выделена критическая составляющая погрешности и приведены общие характеристики ситуаций, в которых возможно классификация оценок результатов измерений. Таким образом, существует необходимость в построении метода определения температуры по результатам измерения сопротивлений, единого с точки зрения используемых материалов и температурных диапазонов, служащего основой для формирования избыточной информации, а также в разработке алгоритма оценки точности и качества первичных измерений, базирующихся на обработке избыточной информации.

Во второй главе предложены единый подход к построению интегральных моделей теплопереноса и разработке метода прогнозирования температуры в контрольных внутренних точках объекта и метода идентификации внутреннего теплового источника в объекте, подвергаемом внешнему тепловому воздействию. Соответствующие задачи линейного теплопереноса представлены следующей обобщенной обратной задачей с известным начальным условием:

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F(t), \quad x \in (0, \ell), \quad t \in (0, T), \quad (1)$$

$$u(0, t) = \varphi(t), \quad u_x(0, t) = g(t), \quad t \in [0, T], \quad (2)$$

$$u(x, 0) = U, \quad x \in [0, \ell]. \quad (3)$$

где $u(x, t)$ – температура в текущей точке в текущий момент времени, c – коэффициент удельной теплоемкости, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности. Ситуации, когда исходные данные $\varphi_\delta(t)$, $g_\delta(t)$ содержат отклонения от действительных значений $\varphi_0(t)$, $g_0(t)$ представлены следующим ограничением. Вместо $\varphi_0(t)$, $g_0(t)$ известны приближения $\varphi_\delta(t)$, $g_\delta(t)$ и уровень δ такие, что $\max \{ \|\varphi_0 - \varphi_\delta\|, \|g_0 - g_\delta\| \} < \delta$.

В задаче, связанной с прогнозированием температуры требуется разработать метод, позволяющий найти значение температуры $\psi(t)$ в контрольных точках K , удаленных

от границы на расстояние ℓ . Математически требуется найти граничную функцию $u(\ell, t) = \psi(t)$ при всех $t \in [0, T]$.

В задаче идентификации внутреннего источника при дополнительно известной температуре $u(\ell, t)$ в контрольной точке, удаленной от границы на расстояние ℓ , требуется разработать метод, позволяющий выявлять присутствие внутреннего источника и определять характер изменений состояния источника, происходящих при выбранном режиме внешнего теплового воздействия, а также метод определения температурного поля рассматриваемого линейного участка с учетом найденной функции внутреннего источника. В математическом представлении требуется при дополнительно известной температуре $\psi(t) = u(\ell, t)$ в контрольной точке, удаленной от границы на расстояние ℓ требуется построить метод идентификации функции источника $f(t) = \frac{F(t)}{c\rho}$, а затем найти функцию $u_\delta(x, t)$, характеризующую температуру во внутренних точках x в текущий момент времени t . При построении методов необходимо обеспечить устойчивость приближенных решений относительно погрешности исходных данных.

В диссертационной работе предложены единые подходы к построению математических моделей теплопереноса, к разработке метода прогнозирования температуры в контрольных внутренних точках и метода идентификации внутреннего теплового источника. Построение моделей включает последовательное применение прямого и обратного преобразований Лапласа, элементов операционного исчисления и регуляризирующих операторов. В результате получено интегральное уравнение, характеризующее явную зависимость искомым функций от результатов граничных измерений. Использование интегральных моделей позволяет упростить реализацию вычислительных схем в АСУТП и получать значения искомым параметров с достаточной точностью.

В диссертационной работе задача определения температуры в контрольной точке по результатам граничных измерений сводится к уравнению

$$2 \int_0^t K_N(t - \tau) \psi(\tau) d\tau = g_\delta(t),$$

с ядром

$$K_N(t - \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \frac{\pi^2 n^2 a}{\ell^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 n^2 a (t - \tau)}{\ell^2}\right)$$

,

Задача идентификации внутреннего источника с помощью преобразований Лапласа и регуляризующего подхода также сведена к интегральной модели:

$$\int_0^t K_N(t - \tau) f(\tau) d\tau = g(t).$$

где $K_N(t - \tau) = \frac{4}{\ell} \sum_{m=0}^N \exp\left(-\frac{\pi^2(2m+1)^2 a}{\ell^2}(t - \tau)\right)$ при всех $t \in [0; T]$.

В работе предложены алгоритмы, позволяющие найти из полученных уравнений искомые $\psi(\tau)$ и $f(\tau)$ при $\tau \in [0, t]$ и всех $t \in [0, T]$ в условиях неточных исходных данных при фиксированном шаге дискретизации по времени. Величина шага дискретизации определяется интервалом измерения. Основные этапы алгоритмов заключаются в следующем. Сначала определяют количество слагаемых N в ядрах $K_N(t, \tau)$, используя разложение функции g_δ по ортогонализованной системе. Далее правые части уравнений аппроксимируют интегральными суммами и в полученные уравнения вводят аддитивный стабилизирующий функционал с параметром α . Включение стабилизирующих функционалов обеспечивает устойчивость вычислительной процедуры относительно погрешности исходных данных при фиксированном интервала измерений по времени. Затем из полученных уравнений вычисляют $\psi(\tau)$ и $f(\tau)$. Значения α выбирают из условия квазиоптимальности. Эффективность использования интегральных моделей и точность предлагаемых методов оценивались при проведении вычислительного эксперимента с исходными данными, полученными с помощью имитационного моделирования.

В эксперименте проводился сравнительный анализ получаемых $\psi_\delta(\tau)$ и $f_\delta(\tau)$ с тестовыми значениями $\psi_k(\tau)$, $f_k(\tau)$, полученными на основе имитационного моделирования, отражающего характер выбранных режимов внешнего теплового воздействия.

В качестве тестовых функций $\psi_k(\tau)$, $f_k(\tau)$, выбирались нормированные функции

$$\psi_k(\tau) = \frac{u(\ell, \tau T) - u(\ell, 0)}{\max_{t \in [0, T]} |u(\ell, t)|}, \quad f_k(\tau) = \frac{f(\tau) - f(0)}{\max_{(x, t) \in [0, \ell] \times [0, T]} |u(x, t)|}$$

по нормированным переменным $\xi = x/\ell$ и $\tau = t/T$, соответствующих различным типам изменения температур. В эксперименте, связанном с определением температуры в контрольной точке, дополнительно проводился сравнительный анализ значений $\psi_\delta(\tau)$ с решением исходной обратной задачи теплопереноса u_δ^F , полученном с помощью оптимального по порядку метода. Этот метод включает проекционную регуляризацию

и использование преобразований Фурье. Порядок погрешности решений u_δ^F является наименьшим из возможных. Результаты вычислительных экспериментов по определению температуры в контрольной точке для некоторых из тестовых нормированных функций $\psi_k(\tau)$ представлены на рис.1

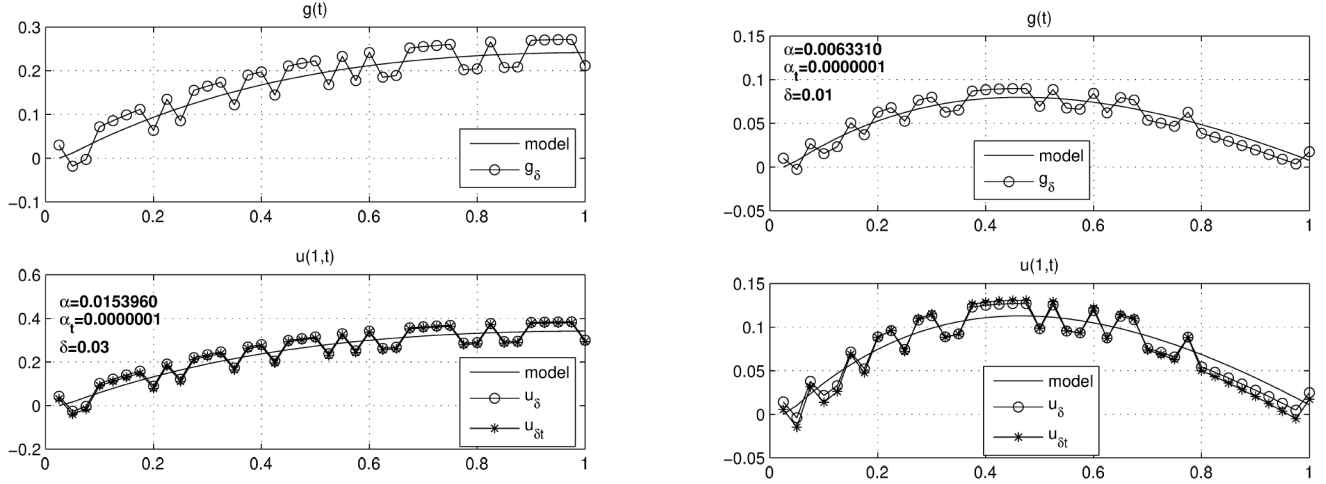


Рис. 1: Результаты решения обратной задачи определения температуры в контрольной точке. ”model” – тестовые значения $\psi_k(\tau)$, g_δ – исходные данные, содержащие аддитивный шум, u_δ – решение исходной задачи u_δ^F , полученное оптимальным по порядку методом, $u_{\delta t}$ – решение $\psi_\delta(\tau)$ интегрального уравнения с параметром α_t , α , – параметры оптимального по порядку метода.

Результаты экспериментов по идентификации внутреннего источника для одной из нормированных функций $f_k(\tau)$ представлены на рис.2 и 3.

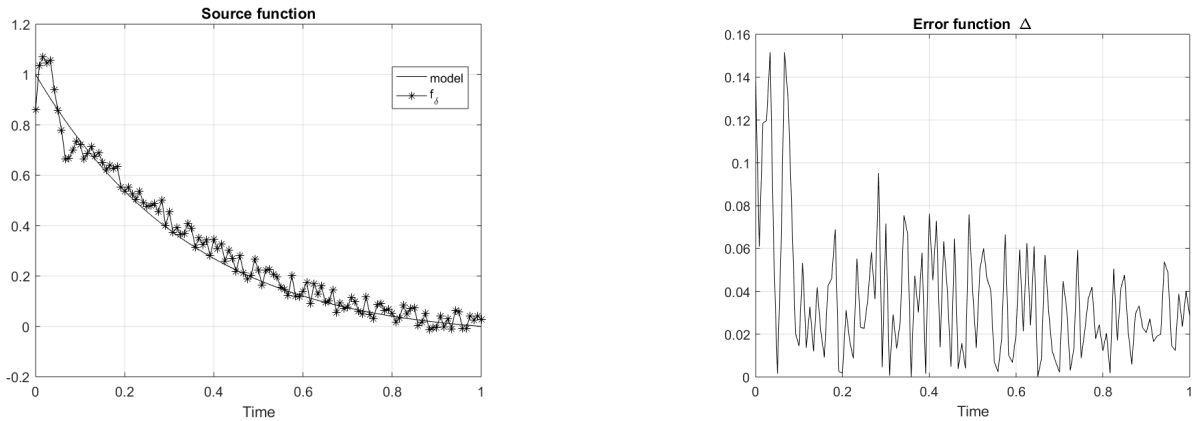


Рис. 2: Результаты идентификации функции источника. ”model” – тестовая функции $f(\tau)$, f_δ – решение интегрального уравнения. Функция $\Delta = |f_\delta(\tau) - f(\tau)|$

Результаты сравнительного анализа, проведенного в вычислительных экспериментах показали достаточную устойчивость и точность метода определения температуры в контрольной точке и метода идентификации функции источника.

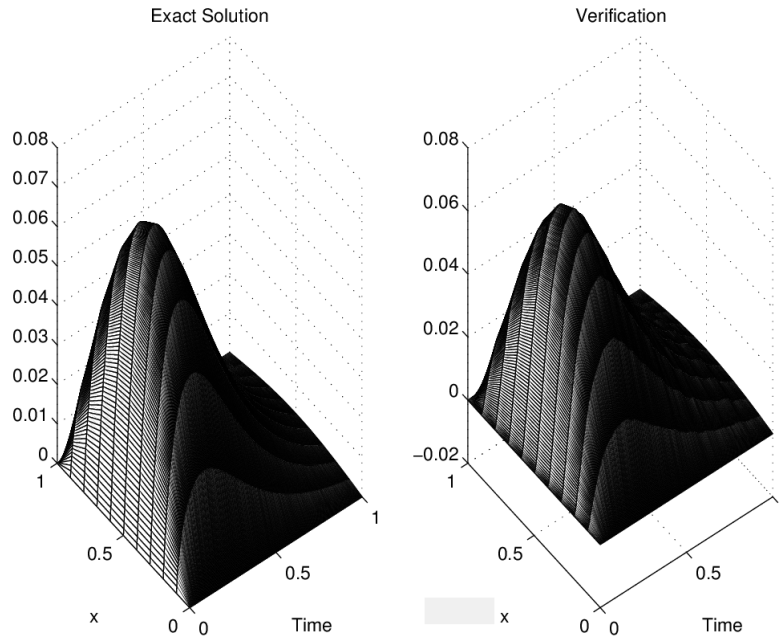


Рис. 3: Результаты моделирования температурных полей с учетом внутреннего источника. "Exact Solution" получено с использованием тестовой функции $f(\tau)$. Поверхность "Verification" – прогнозируемое температурное поле, полученное с учетом найденной функции источника f_δ .

Предложенные методы решения задач теплопереноса, связанные с определением температуры в контрольной точке по результатам поверхностных измерений и идентификацией функции внутреннего источника, служат основой для прогнозирования температурных полей при теплопереносе, проходящем в различных условиях, позволяют повысить точность прогнозирования температур и сформировать управляющий режим воздействия более оптимально на этапе компьютерного моделирования технологического процесса.

Третья глава посвящена разработке методов обработки результатов граничных температурных измерений, служащих основой для прогнозирования при линейном теплопереносе нестационарных температурных полей во внутренних точках тела, подвергаемого внешнему тепловому воздействию, в ситуации, когда его начальное тепловое состояние неизвестно. Рассматриваемый тип задач возникает при неразрушающем контроле, на промежуточных этапах комплексной и вторичной термообработок, когда к моменту начала очередного этапа внутри тела накапливается остаточное тепло и температура на его поверхности отличается от температуры внутри тела и невозможно определить температуру во внутренних точках тела без нарушения его целостности. В результате, начальные условия в обратных задачах теплопереноса, используемые для разработки методов прогнозирования температуры, не могут быть

сформированы и являются неизвестными. Граничные условия в рассматриваемых задачах теплопереноса формулируются в зависимости от особенностей технологического процесса. В ситуации, когда внешнее тепловое воздействие одинаково в каждой точке внешней границы тела и изменяется только по времени, исходная задача сводится к задаче определения температуры во внутренних точках линейного объекта с граничными условиями, известными на одной из границ. В ситуациях, когда специфика оборудования, используемого в технологическом процессе, позволяет располагать датчики, измеряющие температуру, только вдоль некоторой части границы объекта, или внешнему воздействию подвергается только часть граничной области, а также в ситуации, когда внешнее воздействие изменяется не только по времени, но и в зависимости от пространственных характеристик точки объекта, математическая модель задачи теплопереноса включает граничные условия, заданные на части границы

При разработке методов решения обратных задач с неизвестными начальными условиями, служащих основой для алгоритмов обработки информации, необходимо учитывать, что, для достижения желаемых свойств объекта, необходимо учитывать требования, предъявляемым к технологическому процессу, согласно которым продолжительность внешнего теплового воздействия ограничена величиной T и при его реализации недопустимы резкие изменения интенсивности внешнего теплового воздействия, а также резкие перепады температурных градиентов внутри тела. В рассматриваемых задачах теплопереноса требуется определить температуру во внутренних точках P , вплоть до контрольных точек K , расположенных вдоль прямых, проходящих через граничные точки в направлении действия внешнего теплового потока.

Сопоставим объекту, в которой происходит теплоперенос, множество Ω , границе области – множество $\partial\Omega$, а поверхности, вблизи которой проводятся измерения – множество Γ . Отметим, что Γ может либо совпадать с $\partial\Omega$, либо являться ее частью, $\Gamma \subset \partial\Omega$. Каждая точка объекта x характеризуется координатами $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$. В общем случае $\Omega \subset R^m$, но для рассматриваемых задач $m = 1, 2, 3$. Обозначим $\Omega_T = \Omega \times (0; T)$.

Введем в рассмотрение безразмерные параметры:

$$a(x, t) = \frac{\lambda(x, t)}{c(x, t)\rho(x, t)}, \quad b(x, t) = \frac{\lambda_x(x, t)}{c(x, t)\rho(x, t)}, \quad \gamma(x, t) = \frac{-h(x, t)}{c(x, t)\rho(x, t)},$$

$$f(x, t) = h(x, t)\theta(x, t) + \frac{\lambda_x(x, t)}{c(x, t)\rho(x, t)} \quad g(x, t) = -\frac{G(x, t)}{\lambda(x, t)}.$$

где $\lambda(x, t)$ – коэффициент теплопроводности, $\lambda_x(x, t)$ характеризует скорость пространственных изменений теплопроводности, $c(x, t)$ – коэффициент удельной теплоемкости, $\rho(x, t)$ – плотность материала. θ соответствует температуре окружающей среды, а $h(x, t)$ – коэффициенту теплообмена с окружающей средой $h(x, t)$, функция $G(x, t)$ характеризует плотность внешних тепловых потоков. Математическая модель обобщенной задачи линейного теплопереноса имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sum_{s,k=1}^m a_{sk}(x, t) \frac{\partial^2 u}{\partial x_s \partial x_k} + \sum_{k=1}^m b_k(x, t) \frac{\partial u}{\partial x_k} + \gamma(x, t)u + f(x, t) \quad (4)$$

$$u(x, t) |_{\Gamma} = p(x, t), \quad \frac{\partial u}{\partial \bar{n}} |_{\Gamma} = g(x, t), \quad t \in [0, T]. \quad (5)$$

где $a_{sk} = \lambda(x, t)$, $b_k = \frac{\partial \lambda}{\partial x_k}$, функция $\gamma(x, t)$ характеризует теплообмен со средой, функция $g(x, t) = -\frac{G(x, t)}{\lambda(x, t)}$, а вектор n является нормалью к поверхности $\partial\Omega$. Принимая во внимание требования, предъявляемым к технологическому процессу, полагаем, что существуют $\Phi, \beta, C > 0$ такие, что

$$\max_{\Omega_T} |u(x, t)| \leq \Phi e^{\beta(x+t)}, \quad \left\{ \max_{\Omega_T} |\partial^2 u_t|, \max_{\Omega_T} |\partial u_x|, \max_{\Omega_T} |\partial^2 u_x|, \max_{\Omega_T} |\partial^3 u_x| \right\} \leq S. \quad (6)$$

Вместо действительных значений $p_0(x, t)$, $g_0(x, t)$ известны измеренные значения $p_\delta(x, t)$, $g_\delta(x, t)$ и δ такие, что $\max \{ \|p_0 - p_\delta\|, \|g_0 - g_\delta\| \} < \delta$. Требуется разработать методы прогнозирования температур $u(x, t)$ во внутренних точках объекта по результатам граничных измерений p_δ , g_δ , найти граничную функцию $u(x, t) |_{\partial\Omega/\Gamma} = \varphi(x, t)$ в тех граничных точках, где ее значения неизвестны, исследовать устойчивость методов и оценить температурные погрешности в области Ω_η .

В работе впервые сформирован подход к построению методов решения обратных задач с неизвестными начальными условиями, служащими основой для методов обработки результатов граничных измерений по прогнозированию температуры во внутренних точках объекта с неизвестным начальным тепловым состоянием, получаемой в результате внешнего теплового воздействия. На основе предложенного подхода впервые построены вычислительные схемы определения температур во внутренних точках объекта с неизвестной начальной температурой.

Основные методов решения обратных задач с неизвестными начальными условиями, предлагаемых автором, заключаются в следующем. Исходная задача (4),(5)

сводится к системе конечно-разностных уравнений, из которых определяют значение $u(x, t)$ по пространственной переменной с помощью комбинированной явной схемы. Устойчивость вычислительной схемы обеспечивается введением в уравнения стабилизирующего функционала, согласованием шагов дискретизации по пространству и параметра регуляризации с величиной шага дискретизации по времени и δ . Предложенный подход к построению вычислительного алгоритма принципиально отличается от существующих методик и впервые позволил осуществить прогнозирование температур во внутренних точках объекта с неизвестным начальным тепловым состоянием.

В диссертационной работе проведено исследование устойчивости методов прогнозирования температур во внутренних точках объекта. Выявлена зависимость устойчивости вычислительных схем от согласованности шагов дискретизации по пространству, параметра регуляризации с шагом дискретизации по времени и уровнем δ .

Для теоретической оценки погрешностей определения температур во внутренних точках линейного объекта длиной ℓ использовали функцию $w_i = \max_{j=1, \overline{1, M}} |u_{i,j} - v_{i,j}|$, где $u_{i,j} = u(x_i, t_j)$ – действительные значения температур в текущей точке x_i в текущий момент времени t_j , а $v_{i,j}$ – приближенное решение задачи (4), (5), соответствующее прогнозируемым температурам в узле (x_i, t_j) . Величина w_{N+1} соответствует наибольшей температурной погрешности, накопленной в теле к моменту завершения внешнего теплового воздействия. В работе получена следующая оценка:

$$w_{N+1} \leq 5^{N-1} \left(2\delta + 2S \left(L\tau + \sqrt{L\tau} \right) \right) \leq 2 \cdot 5^{N-1} \left(\delta + 2S\sqrt{L\tau} \right), \quad (7)$$

где S определено в (6), а величина $L = \frac{\min_{(x_i, t_j) \in \Omega_T} |\lambda(x_i, t_j)|}{\max_{(x_i, t_j) \in \Omega_T} |c(x_i, t_j)| \max_{(x_i, t_j) \in \Omega_T} |\rho(x_i, t_j)|}$.

Теоретическую оценку погрешностей определения температур во внутренних точках объекта с кусочно-линейной границей проводили для следующей обратной задачи

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a(x, y, t) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f(x, y, t), \quad (x, y, t) \in \Omega_T, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u(x, 0, t) &= p(x, t), \quad u_y(x, 0, t) = g(x, t), \quad (x, t) \in M_x, \\ u(0, y, t) &= q(y, t), \quad u(X, y, t) = h(y, t) \quad (y, t) \in M_y, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\Omega_T = (0, X) \times (0, Y) \times (0, T)$ $M_x = [0, X] \times [0, T]$ and $M_y = [0, Y] \times [0, T]$.

Выбор такой формы обратной задачи обусловлен тем, что вычислительная схема для задачи (8), (9), с одной стороны, позволяет раскрыть суть метода, а с другой

стороны, позволяет минимизировать трудоемкость оценки погрешности получаемых решений. Для теоретической оценки погрешностей определения температур во внутренних точках объекта использовали функцию $w_j = \max_{i=1,1,N_x+1,k=1,1,N_t+1} |u_{i,j,k} - v_{i,j,k}|$. Для величины w_{N+1} , соответствующей наибольшей температурной погрешности, накопленной в теле к моменту завершения технологического процесса, получена оценка:

$$w_{N+1} \leq 4^{N_y-1} \left(\delta \left(1 + \frac{SK}{Y} \right) + \frac{SK^2}{Y^2} \delta^2 \left(1 + \frac{Y}{K} + \frac{4L}{Y} + \frac{1}{YL} \right) \right)$$

где N_y – количество отрезков разбиения по переменной y , величина L оперделена как $L = \frac{\min_{(x_i,t_j) \in \Omega_T} |\lambda(x_i, t_j)|}{\max_{(x_i,t_j) \in \Omega_T} |c(x_i, t_j)| \max_{(x_i,t_j) \in \Omega_T} |\rho(x_i, t_j)|}$, а K выбрано из условия $h_y < K\tau\delta$. Полученная оценка используется при формировании критериев выбора шагов дискретизации

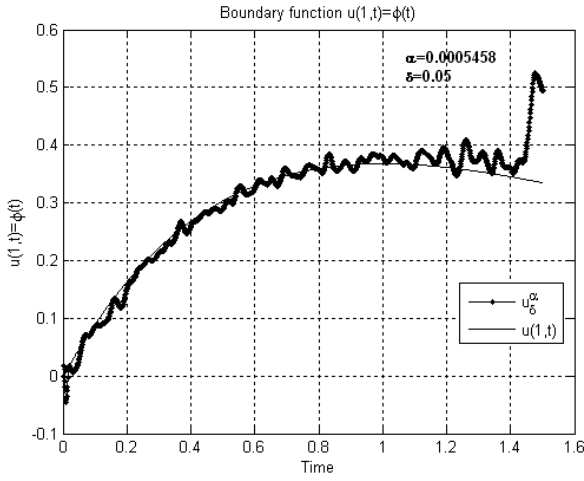
С целью проверки принципиальной возможности построения численного решения u_δ^α задач теплопереноса с неизвестными начальными условиями, соответствующего прогнозируемым температурам в объекте с неизвестным начальным тепловым состоянием, исследованию устойчивости предложенных методов и получению оценок погрешностей прогнозируемых температур, были проведены вычислительные эксперименты для нормированных переменных x , y и t , и соответственно, нормированных тестовых функций u_0 , имитирующих характер изменения температурного поля. В экспериментах проводился сравнительный анализ получаемых решений u_δ^α с тестовыми функциями u_0 .

Результаты определения температурных значений u_δ^α в контрольной точке при различных тепловых режимах $p(t), g(t)$, реализуемых на поверхности на поверхности, и ненулевых начальных условиях, а также результаты сравнительного анализа получаемых значений с тестовыми функциями u_0 представлены на рис.4, 5 и в табл. 1.

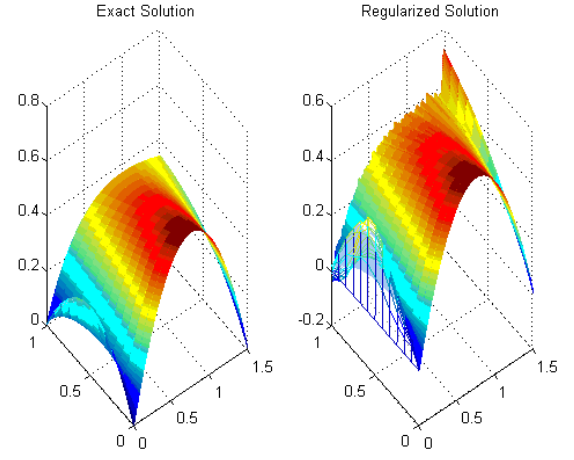
С целью получения оценок точности построенных решений обратной задачи использовали величины Δ и Θ , определяемые формулами:

$$\Delta = \max_{t \in (\eta, T-\eta)} |u_\delta^\alpha(1, t) - \varphi(t)|, \quad \Theta = \max_{(x,t) \in \Omega_\eta} \left| \frac{u_\delta^\alpha(x, t) - u(x, t)}{u(x, t)} \right|$$

Величина Δ характеризуют наибольшее возможное отклонение результатов $u_\delta^\alpha(1, t)$ от действительных значений $u_0(1, t) = \varphi(t)$. Величина Θ соответствует относительной погрешности метода прогнозирования температур во внутренних точках объекта.

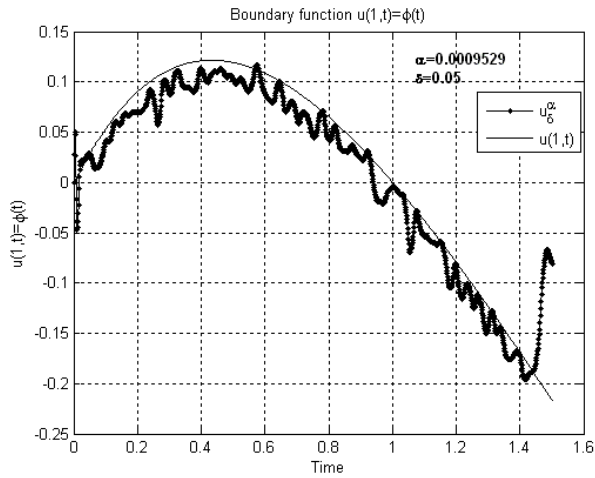


a)

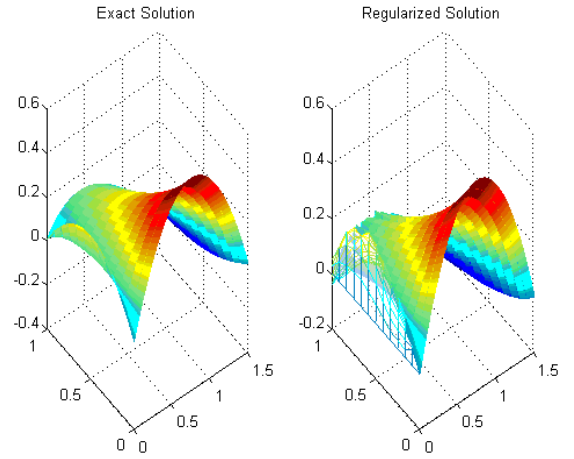


b)

Рис. 4: Результаты эксперимента для тестовой функции $\varphi_1(\tau)$, соответствующей постепенному повышению температуры в контрольной точке. Рис. а) Температурные значения в контрольной точке. u_0^α – результаты прогнозирования, $u(1,t)$ – тестовая функция. Рис. б) Температурное поле во внутренних точках объекта. "Exact Solution" – тестовое температурное поле. "Regularized Solution" – прогнозируемое температурное поле.



a)



b)

Рис. 5: Результаты эксперимента для тестовой функции $\varphi_3(t)$, соответствующей первоначальному повышению и последующему снижению температуры. Рис. а) – температурные значения в контрольной точке. u_0^α – результаты прогнозирования, $u(1,t)$ – тестовая функция. Рис. б)– температурное поле во внутренних точках объекта. Рис. б)– температурное поле во внутренних точках объекта. "Exact Solution" – тестовое температурное поле. "Regularized Solution" – прогнозируемое температурное поле.

В силу того, что эксперимент проводился для нормированных x, t и нормированных функций u_0 , величины δ, Δ, Θ являются безразмерными величинами.

В экспериментах, связанном с задачами теплопереноса в линейных объектах, дополнительно проводился сравнительный анализ численных решений задачи теплопереноса с неизвестными начальными условиями u_0^α с тестовыми значениями $\varphi(t)$ и численными решениями обратной задачи u_0^F с дополнительно известными начальными

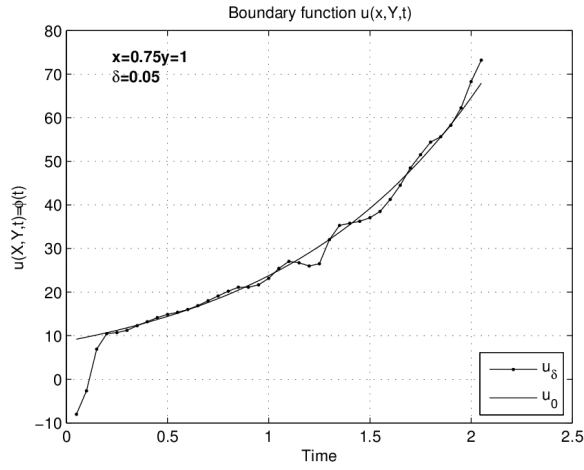
условиями, полученными с помощью оптимального по порядку метода. Результаты сравнения u_δ^α с $\varphi(t)$ и u_δ^F свидетельствуют о достаточной точности результатов определения температур u_δ^α для $t \in (\eta, T - \eta)$ при $\eta > 0$.

Таблица 1: Оценки температурных отклонений

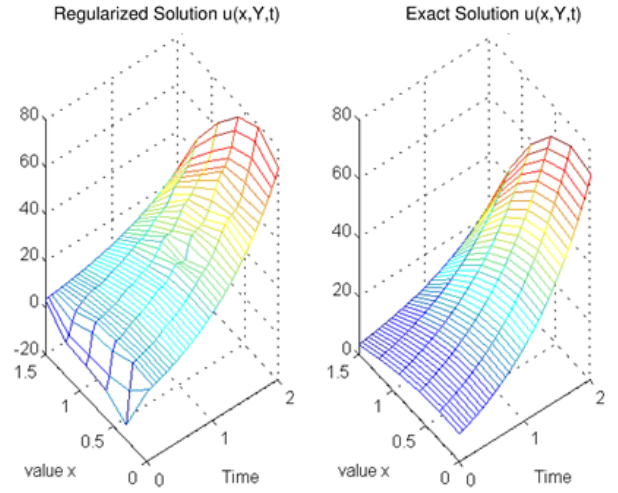
тестовая функция	δ	Δ	Θ
$\varphi_1(\tau) = u(1, t) = \begin{cases} \frac{e^t - 1}{t} - 1, & t > 0 \\ 0, & t = 0 \end{cases}$	0.01	0.0211	0.0387
	0.03	0.0498	0.0566
	0.05	0.0698	0.0742
$\varphi_2(\tau) = u(1, t) = t(e^{-t} - e^{-1})$	0.01	0.0204	0.0318
	0.03	0.0442	0.0512
	0.05	0.0708	0.0621
$\varphi_3(\tau) = u(1, t) = t \sin(3\pi t) e^{-t}$	0.01	0.0230	0.0341
	0.03	0.0487	0.0571
	0.05	0.0712	0.0818
	0.1	0.2278	0.2478
$\varphi_4(\tau) = u(1, t) = \sin(10\pi t) e^{-t}$	0.01	0.0203	0.0236
	0.03	0.0575	0.0798
	0.05	0.0973	0.1098
	0.1	0.2307	0.2582

Результаты прогнозирования температур в объекте с кусочно-линейной границей в области $M_\eta = (0, X) \times (\eta_1, T - \eta_2)$ и сравнительного анализа получаемых значений с тестовыми функциями представлены на рис.6, 7 и в табл.2, 3. Сравнение проводилось по двум направлениям. Первое включало сравнение тестовых значений $u_0(X/2, Y, t) = \varphi_0(X/2, t)$ с температурами $u_\delta(X/2, Y, t) = \varphi_\delta(X/2, t)$, найденными с помощью предложенного метода прогнозирования температур. Выбор этих значений для сравнения обусловлен тем, что соответствующие внутренние точки объекта с координатами $(X/2, Y, t)$ наиболее удалены от границ, вдоль которых известны температурные значения. Результаты сравнения представлены на рис. 6(а), 7(а).

Второе направление включало сравнение температурных полей $u_\delta(x, Y, t)$, получаемых в области $\overline{M_x} = [0, X] \times [0, T]$ с тестовыми значениями $u_0(x, Y, t)$. Результаты сравнения представлены на рис. 6(б), 7(б). Двумерные поверхности, обозначенные "Exact solution", соответствуют значениям $u_0(x, Y, t)$, а поверхности "Regularized solution" соответствуют прогнозируемым температурам u_δ , полученным при неизвестных начальных условиях с помощью предложенного метода прогнозирования.

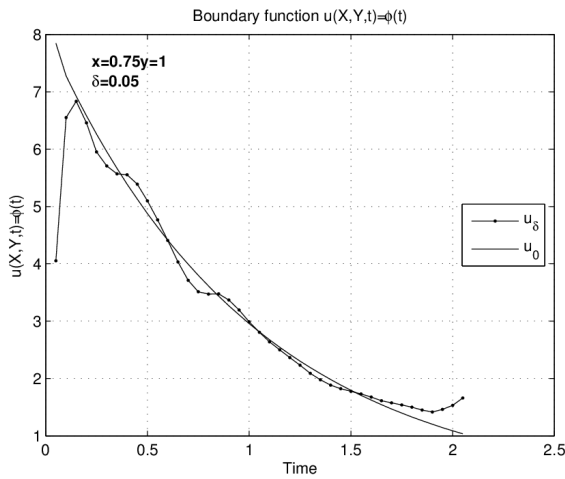


a)

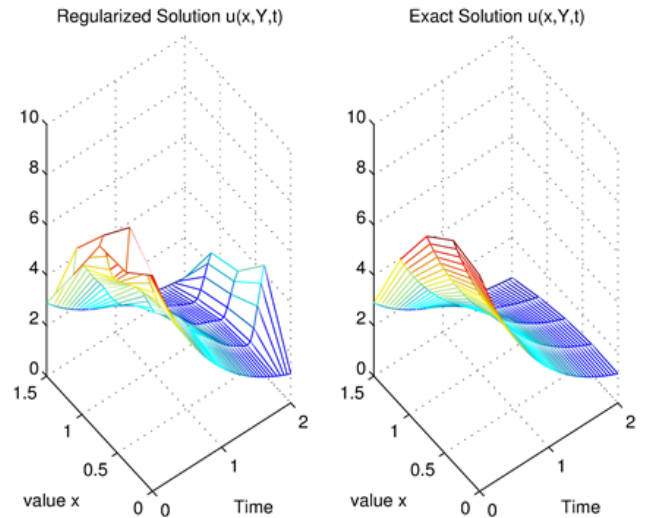


b)

Рис. 6: Результаты прогнозирования температуры для тестовых функций $p_1 = 8.66e^t \cos(x - \pi/12)$, $\varphi_1 = 5e^t \cos(x - \pi/12)$, $q_1 = e^t \cos(y - \pi/6)$, $h_1 = 0.33e^t \cos(y - \pi/6)$. Рис. а) – температурные значения в контрольной точке. Рис. б)– температурное поле во внутренних точках объекта.



a)



б)

Рис. 7: Результаты прогнозирования температуры для тестовых функций $p_2 = 8.66e^{-t} \cos(x - \pi/12)$, $\varphi_2 = 5e^{-t} \cos(x - \pi/12)$, $q_2 = e^{-t} \cos(y - \pi/6)$ и $h_2 = 0.33e^{-t} \cos(y - \pi/6)$. Рис. а) – температурные значения в контрольной точке $(0.75, Y)$. Рис. б)– температурное поле во внутренних точках объекта с координатами (x, Y) .

Для оценки отклонений температур, вычисленных во внутренних точках, от тестовых значений использовали величины Δ и Θ , определяемые формулами:

$$\Delta = \max_{t \in (\eta, T-\eta)} \left| u_\delta^\alpha \left(\frac{X}{2}, Y, t \right) - u_0 \left(\frac{X}{2}, Y, t \right) \right| = \max_{t \in (\eta, T-\eta)} \left| \varphi_\delta \left(\frac{X}{2}, t \right) - \varphi_0 \left(\frac{X}{2}, t \right) \right|,$$

$$\Delta_\varphi = \max_{(x,t) \in M_\eta} \left| \frac{u_\delta^\alpha(x, Y, t) - u_0(x, Y, t)}{u_0(x, Y, t)} \right| = \max_{(x,t) \in M_\eta} \left| \frac{\varphi_\delta(x, t) - \varphi_0(x, t)}{u_0(x, t)} \right|$$

Величина Δ характеризуют наибольшее возможное отклонение значений $u_\delta(X/2, Y, t)$, найденных в контрольной точке $(X/2, Y, t)$, от действительных значений $u_0(X/2, Y, t)$. Величина Δ_φ соответствует погрешности метода прогнозирования температур во внутренних точках объекта в области $M_\eta = (0, X) \times (\eta_1, T - \eta_2)$.

Таблица 2: Оценки температурных отклонений в области $M_\eta = (0, X) \times (0.05T, 0.95T)$

δ	$\varphi_1(x, t)$		$\varphi_2(x, t)$		$\varphi_3(x, t)$		$\varphi_4(x, t)$		$\varphi_5(x, t)$	
	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ
0.01	0.191	0.341	0.187	0.293	0.195	0.497	0.181	0.343	0.189	0.265
0.03	0.358	0.603	0.342	0.649	0.354	0.661	0.315	0.597	0.347	0.598
0.05	0.470	0.793	0.482	0.782	0.476	0.803	0.403	0.743	0.567	0.789

Таблица 3: Температурные отклонения в области $M_\eta = (0, X) \times (0.15T, 0.95T)$

δ	$\varphi_1(x, t)$		$\varphi_2(x, t)$		$\varphi_3(x, t)$		$\varphi_4(x, t)$		$\varphi_5(x, t)$	
	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ	Δ	Δ_φ
0.01	0.0315	0.0245	0.0681	0.0233	0.0389	0.0274	0.0334	0.0243	0.0373	0.265
0.03	0.0541	0.0403	0.0712	0.0411	0.0623	0.0421	0.0414	0.0409	0.0353	0.0419
0.05	0.097	0.0831	0.082	0.0825	0.0804	0.0827	0.0637	0.0797	0.0745	0.0789

Таким образом, в диссертационной работе выявлена принципиальная возможность построения вычислительной схемы определения температур во внутренних точках при линейном теплопереносе в объекте с неизвестной начальной температурой по косвенным исходным данным, сформированным из результатов температурных измерений вблизи границы объекта и впервые сформированы численные алгоритмы определения температуры во внутренних точках. Оценки уклонений вычисленных температур от действительных значений, полученные в вычислительном эксперименте, согласуются с теоретическими результатами и свидетельствуют о достаточной эффективности и точности предложенных методов.

Четвертая глава посвящена методам прогнозирования теплового состояния объектов с неизвестной начальной температурой при нелинейном теплопереносе. Прогнозирование осуществляется на основе обработки данных, формируемых из результатов измерений температурных функций вблизи поверхности объектов. Объекты представлены цилиндрическим телом и кольцевым цилиндром, подвергаемым внешнему

тепловому воздействию. В кольцевом цилиндре воздействие оказывается на внутреннюю поверхность.

Согласно требованиям, предъявляемым к технологическому процессу, температура принимает одинаковые значения вдоль любой прямой, параллельной оси цилиндра, а при реализации внешнего теплового режима недопустимы резкие изменения интенсивности воздействия, а также большие перепады температурных градиентов внутри тела. Схемы тепловых воздействий представлены на рис.8. Датчики измерения температуры на рис.8(а) расположены вблизи точек A , на рис.8(б) – вблизи точек O .

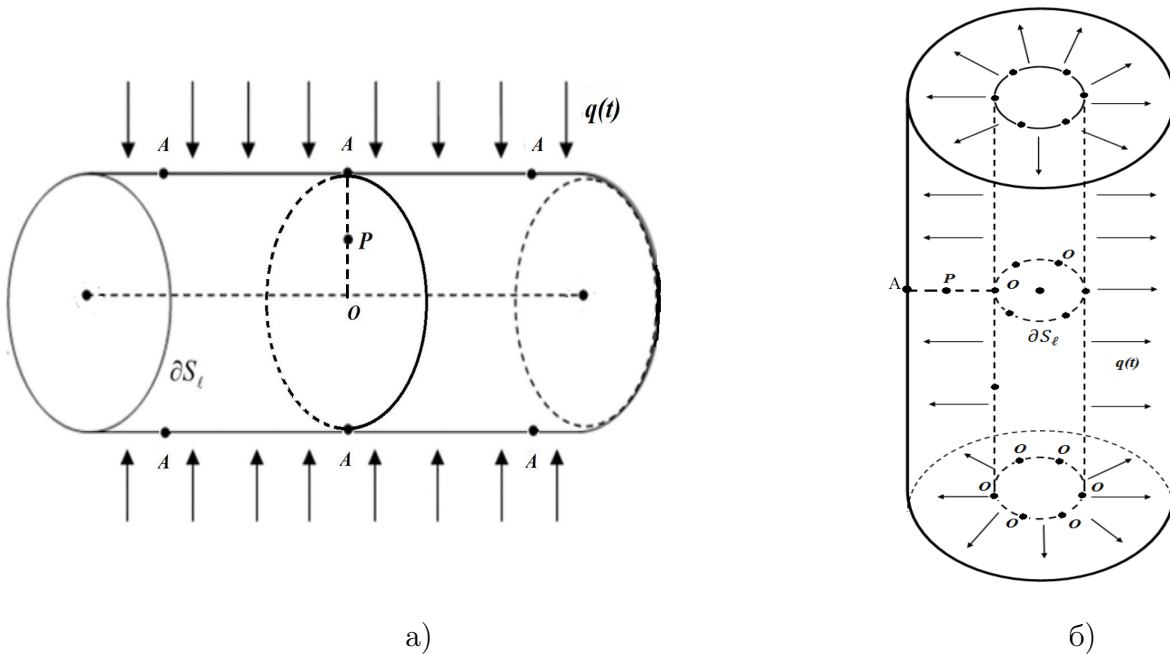


Рис. 8: Схема тепловых воздействий. P – точки, в которых требуется определить температуру, $q(t)$ – плотность теплового потока, воздействующего на тело. Рис.(а)–схема внешнего теплового воздействия. Измерения проводятся вблизи точек A . Рис.(б)–схема воздействия теплового источника, расположенного вдоль оси цилиндра. Измерения температуры проводятся вблизи точек O .

Теплофизические свойства материала: плотность, коэффициенты теплоемкости и теплопроводности изменяются в зависимости от температуры. Внешнее воздействие одинаково в каждой точке боковой поверхности ∂S_ℓ , а его интенсивность изменяется только относительно времени и при определении теплового состояния цилиндра достаточно рассмотреть теплоперенос в его сечении. Математическая модель нелинейного теплопереноса в сечении, подвергаемого внешнему тепловому воздействию, без учета теплообмена со средой, в полярной системе координат имеет вид:

$$c(u)\rho(u)\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \lambda(u)}{\partial u} \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r}\lambda(u)\frac{\partial u}{\partial r} + \lambda(u)\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}, \quad (r, t) \in \Omega_T. \quad (10)$$

где $\Omega_T = (0, \ell) \times (0, T)$, а ℓ – радиус сечения. Режим внешнего теплового воздействия представлен граничными условиями:

$$u(\ell, t) = p(t), \quad u_r(\ell, t) = q(t), \quad t \in [0, T]. \quad (11)$$

и дополнительными условиями:

$$\max_{\Omega_T} |u(r, t)| \leq \Phi e^{\beta(r+t)}, \quad \left\{ \max_{\Omega_T} |\partial_t^2 u|, \max_{\Omega_T} |\partial_r^2 u|, \max_{\Omega_T} |\partial_r^4 u| \right\} \leq S. \quad (12)$$

В рассматриваемой задаче теплопереноса необходимо найти температурную функцию $u(r, t)$, удовлетворяющую (11), (12) и найти $u(0, t) = \psi(t)$,

Метод прогнозирования температур при нелинейном теплопереносе включает следующие этапы. Сначала, моделируют соотношения, характеризующие зависимости коэффициентных функций $c(u)$, $\rho(u)$, $\lambda(u)$ от температуры. Далее исходная задача (10), (11) сводится к системе конечно-разностных уравнений со стабилизирующим функционалом, из которых определяют значение функции $u(r, t)$ по пространственной координате с помощью комбинированной явной схемы. Такой подход впервые позволил численно прогнозировать температуру во внутренних точках объекта при неизвестном начальной температуре тела.

В диссертационной работе проведено теоретическое исследование устойчивости основной вычислительной схемы. Показано, что при соответствующем соотношении шагов дискретизации и параметра регуляризации, схема является локально устойчивой схемой и получены оценки погрешности численных решений рассматриваемых задач нелинейного теплопереноса. Проведено теоретическое исследование точности метода. Для оценки погрешности определения температур во внутренних точках сечения использовали функцию $w_i = \max_j |v_{i,j} - u_{i,j}|$, при $i = \overline{1, N+1}$, где $v_{i,j}$ являются решением конечно-разностной задачи с модифицированными коэффициентами в узлах (r_i, t_j) , а $u_{i,j}$ соответствует действительным температурным значениям в момент времени t_j в точках, удаленных от поверхности на расстояние r_i . Учитывая условия устойчивости вычислительной схемы, получили, что для величины w_{N+1} , характеризующей наибольшее отклонение вычисленных температур от действительных значений, накопленное к моменту завершения внешнего теплового воздействия имеет место оценка:

$$w_{N+1} \leq (1 + 2\mu)^{N-1} \left(\delta + \frac{\delta + S}{2 + \log_\mu \left(\frac{\delta}{\mathfrak{S} + \delta} \right)} + \frac{1}{2\mu} (2\delta + \Psi) \right)$$

где N – количество интервалов разбиения $[0, \ell]$, величина $\mu < 1$ и $\Psi \asymp S(\tau + h^2)$, а $\mathfrak{S} = \max_{j=1, \overline{1, M+1}} |q_j|$. Полученная оценка используется при формировании критериев выбора и согласованности шагов дискретизации.

С целью оценки надежности и эффективности использования предложенного метода для прогнозирования теплового состояния объекта, подвергаемого термообработке с выбранным режимом внешнего теплового воздействия, проводилось несколько типов экспериментов, в которых результаты, полученные с помощью предлагаемого метода, сравнивались с тестовыми значениями. В первом типе эксперимента в качестве тестовых значений использовали функции, полученные на основе имитационного моделирования. Для проведения второго типа эксперимента использовали промышленное оборудование, для третьего типа – промышленное оборудование, а тестовые значения, используемые для сравнительного анализа, формировались из результатов контрольных измерений на оси цилиндра.

Результаты вычислительного эксперимента для тестовых функций, сформированы на основе имитационного моделирования температур при технологическом процессе среднего отпуска для $t \in [\varepsilon, T - \varepsilon]$ при $\varepsilon = 0.075T$ представлены на рис.9.

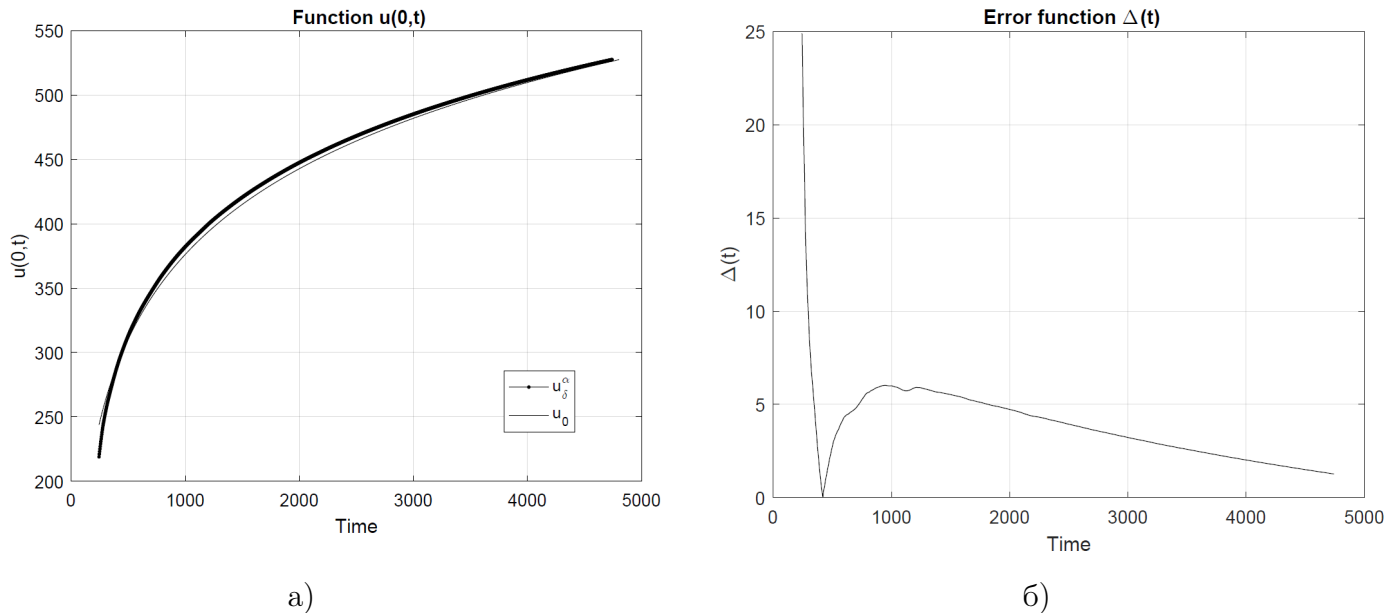


Рис. 9: Результаты вычислительного эксперимента для тестовых функций, имитирующих нагрев тела при отпуске. Рис.(а) графики температурных функций на оси. Рис.(б) график функции $\Delta(t)$.

Для оценки температурных погрешностей использовали функции:

$$\Delta(t) = |u_\delta(0, t) - u_0(0, t)| = |\psi_\delta(t) - \psi_0(t)|,$$

$$\Delta_{\psi} = \max_{(r,t) \in \Omega_{\varepsilon}} \left| \frac{u_{\delta}(0,t) - u_0(0,t)}{u_0(0,t)} \right| = \max_{(r,t) \in \Omega_{\varepsilon}} \left| \frac{\psi_{\delta}(t) - \psi_0(t)}{\psi_0(t)} \right|.$$

Средние значения $\Delta = \max_{t \in [\varepsilon, T-\varepsilon]} \Delta(t)$ и Δ_{ψ} , представлены в табл.4.

Таблица 4: оценки температурных погрешностей

δ	$\Delta, ^{\circ}C$	Δ_{ψ}	$\Delta, ^{\circ}C$	Δ_{ψ}
	$\varepsilon = 0.03T$	$\varepsilon = 0.03T$	$\varepsilon = 0.05T$	$\varepsilon = 0.05T$
0.05	20,72	0,1511	9,39	0,05445
0.01	21,76	0,169	9,89	0,05596

В экспериментах, проводимых на лабораторном и промышленном оборудовании, образцами служили цилиндры, изготовленные из стали СТ-45. В экспериментах образцы подвергались различным внешним тепловым воздействиям. При проведении эксперимента на лабораторном оборудовании режимы внешнего теплового воздействия выбирались в соответствии с условиями проведения среднего и высокого отпусков. Значения, полученные от средства измерения, закрепленного на поверхности цилиндра, служили основой для формирования исходных данных. Тестовые значения формировались из результатов, полученных от средства измерения, помещенного в канал, просверленный вдоль оси цилиндра. Интервал между измерениями составлял 1 сек. По завершении результаты поверхностных измерений обрабатывались с помощью предложенного метода прогнозирования температур, а затем найденные температуры сравнивались с тестовыми значениями. Средние значения $\Delta = \max_{t \in [\varepsilon, T-\varepsilon]} \Delta(t)$ и Δ_{ψ} , полученные при проведении данного типа эксперимента, представлены в табл.5.

Таблица 5: Температурные погрешности

температура печи	ε	$\Delta, ^{\circ}C$	Δ_{ψ}
550 ⁰ C	0,020T	23,12	0,06232
	0,035T	18,06	0,05576
	0,050T	8,17	0,03384
650 ⁰ C	0,020T	26,08	0,06324
	0,035T	19,23	0,05625
	0,050T	8,87	0,03364

Во втором типе, связанным с проведением эксперимента на промышленном оборудовании, внешнее тепловое воздействие выбиралось в соответствии с различными

режимами проведения среднего отпуска. В табл.6 представлены результаты сравнения тестовых значений $u(0, t)$, сформированных из результатов контрольных измерений с прогнозируемыми температурами $u_\delta(0, t) = \varphi_\delta(t)$ оси цилиндра. В эксперименте внешняя поверхность нагревалась до определенной температуры, а затем происходило плавное снижение температур.

Таблица 6: Сравнение результатов измерений и прогнозирования

t , (сек)	температура печи	$\Delta(t)$, $^{\circ}C$
0	400	–
600	400	4.2819
1200	400	7.6652
1800	400	2.9575
2400	–	1.4769
3000	–	2.5866
3600	–	2.3564 *

* – отклонение значений температуры $u_\delta(0, 0.97T)$, от $u(0, T)$

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о принципиальной возможности построения и достаточной точности вычислительной схемы определения температур во внутренних точках при нелинейном теплопереносе в объекте с неизвестным начальным тепловым состоянием по исходным данным, сформированным из результатов измерений вблизи поверхности тела. Построенные алгоритмы впервые позволили провести численное прогнозирование температур при неполных исходных данных.

В пятой главе рассмотрена проблема определения температуры из результатов обработки информации о первичных измерениях. Исходными данными в методах прогнозирования температуры, предложенных в диссертационном исследовании, являются граничные условия, формируемые из результатов температурных измерений, проведенных на внешней поверхности тела. Температурные показания, служащие основой для граничных условий, формируют, в свою очередь, из результатов первичных измерений, для проведения которых используют, в том числе, преобразователи температуры, содержащие термометры сопротивления. В преобразователях температуры непосредственно измеряемой величиной является сопротивление, а при применении существующих методов определения температур по результатам измерения сопротивлений

необходимо учитывать тип материала, из которого изготовлен сенсор, температурный диапазон и номинальное сопротивление. Эта разнородность неизбежно приводит к проблеме оценки точности и достоверности результатов определения температуры и возникает необходимость в построении единого для различных диапазонов измерений и сенсоров, изготовленных из различных материалов, позволяющего определять значения температуры по результатам первичных измерения и сформировать алгоритмы, служащие для оценки точности вычисляемых температурных значений.

В диссертационной работе в качестве исследуемого средства измерения рассматривались термосопротивления, чувствительные элементы которых изготовлены из никеля и платины. Предлагаемая математическая модель зависимости температурны от результатов первичных измерений сопротивлений формулируется следующим образом. Измерения сопротивлений осуществляется каждым сенсором независимо при истинных температурах $\overset{\circ}{T}_k$, $k = \overline{1, K}$ в присутствии контрольного средства измерения. Значениям, измеренным посредством никелевого термометра, соответствуют обозначения R_1 или R_{Ni} , а измеренным с помощью платинового термометра R_2 или R_{Pt} . Действительным значениям $\overset{\circ}{T}_k$ сопоставим вектор $\overset{\circ}{T} = (\overset{\circ}{T}_1, \overset{\circ}{T}_2, \dots, \overset{\circ}{T}_K)$, а температурам T_k , полученным от контрольного средства измерения вектор $T_\delta = (T_1, T_2, \dots, T_K)$. Зависимость температуры от сопротивлений имеют вид:

$$\begin{cases} A_m R_{1k}^m + A_{m-1} R_{1k}^{m-1} + \dots + A_1 R_{1k} + A_0 = T_k, \\ B_n R_{2k}^n + B_{n-1} R_{2k}^{n-1} + \dots + B_1 R_{2k} + B_0 = T_k. \end{cases} \quad (13)$$

Основываясь на том, что значения $\overset{\circ}{T}_k$, не могут быть определены из результатов измерений, а вместо них известны температуры T_k , и допустимый уровень точности δ , введем в математическую модель условие $\|T_\delta - \overset{\circ}{T}\| \leq \delta$. До начала калибровки значения коэффициентов A_i и B_j и степеней m и n являются неопределенными.

Задачу определения степеней и коэффициентов системы (13) называют задачей параметрической идентификации. Для определения и оценки точности температурных значений, получаемых из результатов первичных измерений, необходимо разработать метод идентификации неизвестных степеней m и n и коэффициентов A_i и B_j . Далее, используя полученные результаты, необходимо на этапе калибровки сформировать значения температур T_{Ni} , T_{Pt} , значения сопротивлений $R_{\delta Ni}$, $R_{\delta Pt}$, температурное значение средства измерения \tilde{T} , разработать для этапа эксплуатации метод определения температур $\overline{T_{Ni}}$, $\overline{T_{Pt}}$, \overline{T} и оценить отклонения $\overline{T_{Ni}}$, $\overline{T_{Pt}}$, \overline{T} от значений T_{Ni} , T_{Pt} , \tilde{T} .

Составим из R_{1k} и R_{2k} , измеряемых каждым сенсором, матрицы P_1 и P_2 , а искомым коэффициентам A_i и B_j – векторы $A = (A_m, A_{m-1}, \dots, A_0)$ и $B = (B_n, B_{n-1}, \dots, B_0)$. Система (13) примет вид:

$$\begin{cases} P_1 A = T_\delta, \\ P_2 B = T_\delta, \\ \|T_\delta - \dot{T}\| \leq \delta \end{cases} \quad (14)$$

Идентификация степеней и коэффициентов системы (14) выполняется на этапе калибровки независимо для каждого сенсора и состоит из нескольких этапов. На первом этапе определяют степени системы (14) с помощью процедуры, основанной на выделении линейно-независимых компонент в P_1 , P_2 и A , B и позволяющей избежать ситуации недостаточности и избыточности измерений. Предлагаемый в работе метод идентификации коэффициентов системы (15) основан на необходимом условии минимума функционалов:

$$\begin{cases} \inf_{A \in R} \{ \|P_1 A - T_\delta\|^2 + \alpha \|A\|^2 : A \in R \}, & \alpha > 0. \\ \inf_{B \in R} \{ \|P_2 B - T_\delta\|^2 + \alpha \|B\|^2 : x \in R \}, & \alpha > 0. \end{cases} \quad (15)$$

где параметры α_1 и α_2 выбираются из принципа невязки. В работе теоретически обоснована оптимальность по порядку метода идентификации коэффициентов и доказано, что для функции $\Delta(J_\delta^{\bar{\alpha}})$, характеризующей наибольшее отклонение вычисленных коэффициентов A_δ и B_δ от точных значений, имеет место оценка

$$\frac{\sqrt{r\delta}}{2} \leq \Delta(J_\delta^{\bar{\alpha}}) \leq \sqrt{r\delta}$$

Результаты решения задачи идентификации степеней и полиномов используют для формирования температурных значений на этапе калибровки и расчета температур на этапе эксплуатации. Для вычисления температур T_{Ni} и T_{Pt} найденные степени и коэффициенты A_δ и B_δ подставляют в систему (14), затем переходят к верификации результатов, считающейся успешной, если температурные погрешности и погрешности сопротивлений находятся в допустимых пределах.

Эффективность метода параметрической идентификации и вычислительной схемы определения температур, а также точность предлагаемого метода обработки измерений оценивалась посредством проведения экспериментов. Результаты эксперимента по определению температуры в присутствии контрольного средства измерения представлены в работе и проиллюстрированы на рис.10. Линии, маркированные окружностями

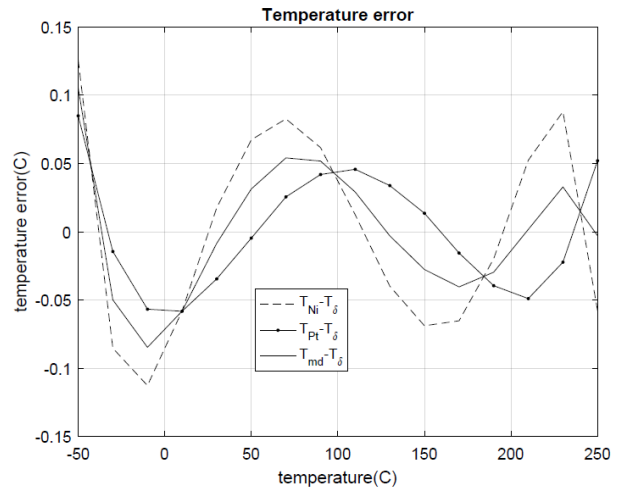
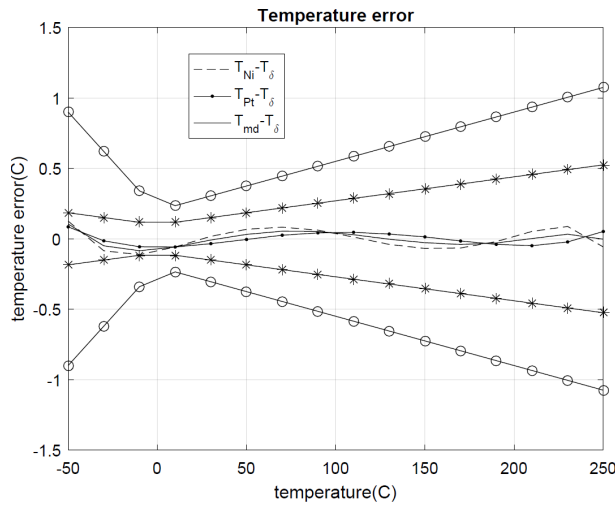


Рис. 10: Графики отклонений вычисленных температур T_{Ni} , T_{Pt} и \tilde{T} от тестовых значений T_δ , полученных в результате экспериментальных исследований. Обозначение T_{md} соответствует вычисленным температурам \tilde{T} .

ми, обозначают границы допустимых температурных погрешностей для никелевого термосопротивления, а линии, маркированные ромбами – для платинового термосопротивления.

На основании полученных результатов по определению температур из результатов первичных измерений в диссертационной работе предложены алгоритмы оценки точности и качества измерений.

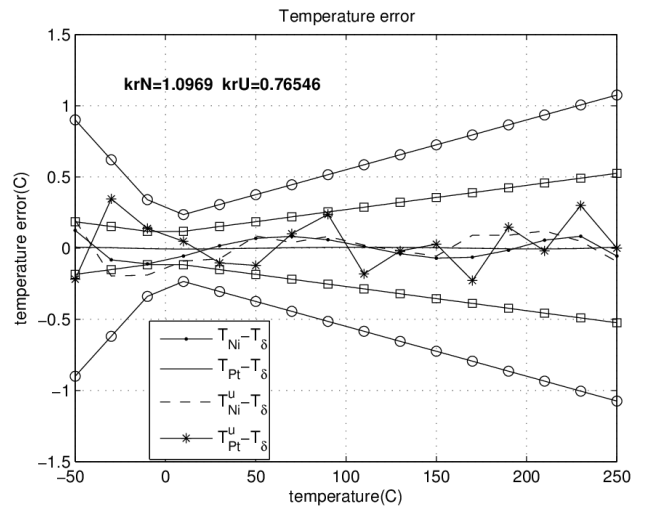
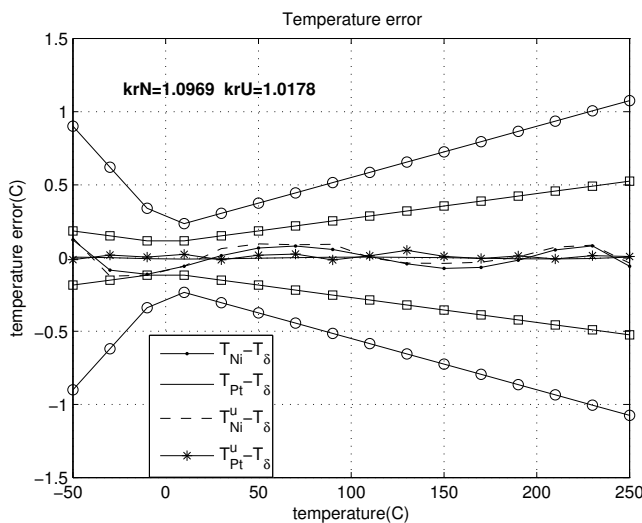


Рис. 11: Графики функций температурных отклонений. Рисунок (а) иллюстрирует оценку ПОДТВЕРЖДЕННОЕ. Рисунок (б) иллюстрирует оценку ОРИЕНТИРУЮЩЕЕ.

Апробация методов обработки измерений и алгоритмов оценки точности измерений, предложенных в работе, проводилась в экспериментальном исследовании. Графики,

иллюстрирующие результаты применения предлагаемого алгоритма оценки точности и качества измерений, согласующегося с концепцией, предложенной Р.Е. Таймановым, представлены на рис.11–13.

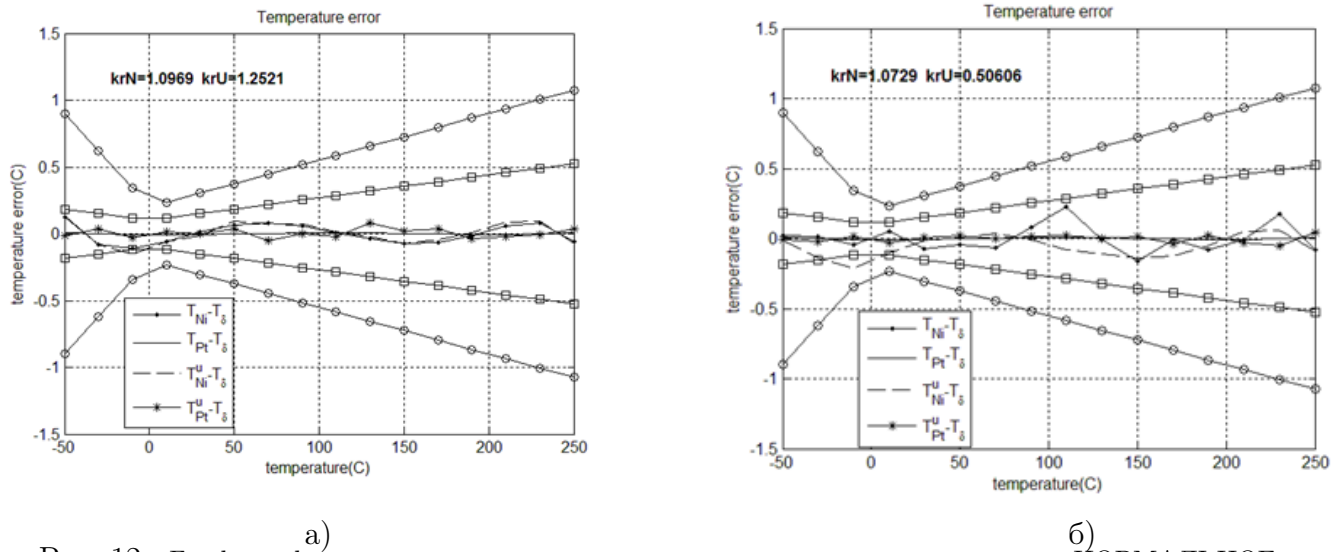


Рис. 12: Графики функций температурных отклонений, иллюстрирующие оценку **НОРМАЛЬНОЕ**.

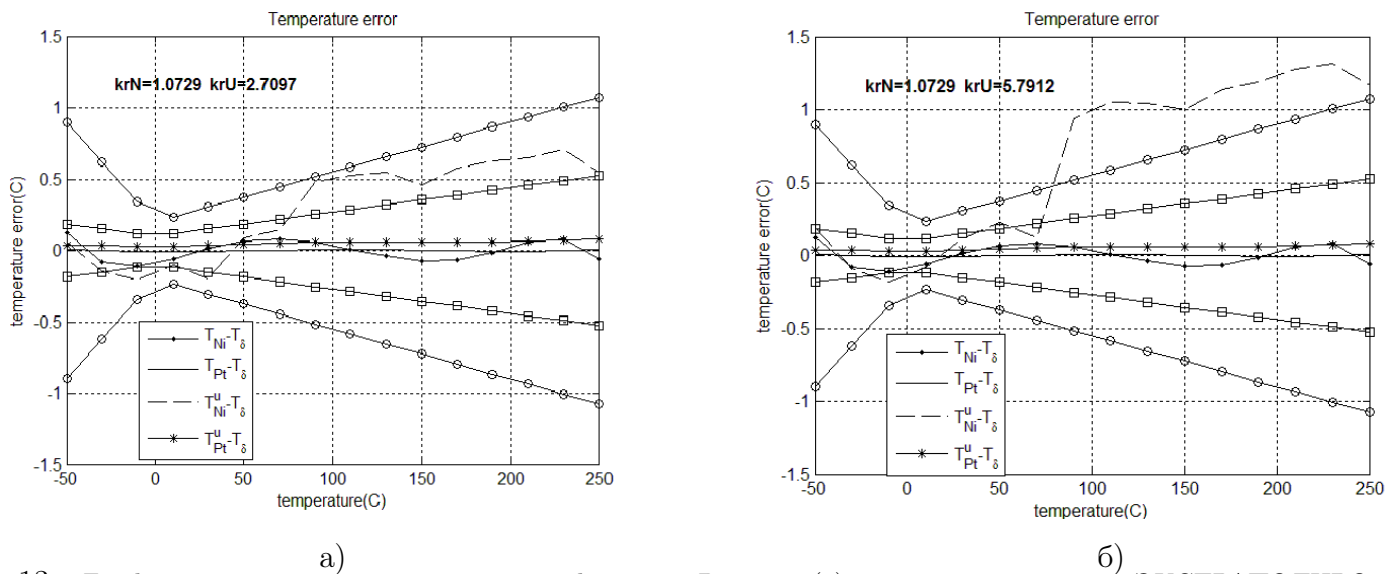


Рис. 13: Графики погрешности температурных функций. Рисунок (а) иллюстрирует оценку **ЭКСТРАПОЛИРОВАННОЕ**. Рисунок (б) иллюстрирует оценку **НЕДОСТОВЕРНОЕ**.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе предложены методы и алгоритмы обработки результатов измерений, служащие основой для методов контроля и прогнозирования теплового состояния объекта, подвергаемого внешнему тепловому воздействию, в условиях неполных и динамически изменяющихся исходных данных. Основные результаты и выводы заключаются в следующем:

1. Разработаны интегральные модели и методы решения задач теплопереноса и идентификации внутреннего теплового источника. На основе полученных результатов в работе сделан вывод о том, что предложенные подходы к построению методов определения температуры в контрольной точке и идентификации внутреннего теплового источника по результатам поверхностных измерений служат основой для прогнозирования температурных значений, получаемых в результате выбранного управляющего режима теплового воздействия, позволяют повысить точность прогнозирования температур и оптимизировать управляющий режим внешнего теплового воздействия

2. Создан единый подход к разработке методов численного решения задач линейного и нелинейного теплопереноса в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием, заключающийся в построении комбинированной конечно-разностной схемы со стабилизирующим функционалом, с помощью которой находят искомые температурные значения относительно пространственной переменной.

3. Разработаны методы прогнозирования температуры во внутренних точках при линейном теплопереносе в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием, найдены условия, гарантирующие устойчивость вычислительных схем относительно погрешности исходных данных, и оценки точности результатов прогнозирования. Полученные результаты приводят к следующим выводам. Построение комбинированной схемы позволило найти решение проблемы краевых точек и осуществить численное прогнозирование температур в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием. Предложенные методы прогнозирования обладают достаточной точностью, служат основой для выбора параметров внешнего управляющего режима теплового воздействия, формирующего требуемое температурное поле внутри объекта.

4. Разработана методика аппроксимации коэффициентов в задаче нелинейного теплопереноса в ситуации, когда теплофизические характеристики материала зависят от температуры. Введенные соотношения позволяют сформировать явную вычислительную схему, получить теоретические оценки возможных температурных отклонений и значительно упрощают реализацию вычислительной процедуры.

5. Разработаны и верифицированы методы решения обратных задач нелинейного теплопереноса, связанные с прогнозированием температур во внутренних точках объектов с неизвестным начальным тепловым состоянием при внешнем тепловом воздействии. Найдены условия, обеспечивающие устойчивость методов по исходным данным,

и получены оценки точности вычисляемых температур, подтвержденные результатами обработки экспериментальных данных. Полученные результаты приводят к следующим выводам. Построение комбинированной схемы относительно пространственной переменной позволило найти решение проблемы неизвестных начальных условий, препятствующей численному решению обратных задач теплопереноса. Предложенные методы обладают достаточной точностью, используются при прогнозировании влияния выбранного теплового воздействия на формирование температурных полей при неполных исходных данных

6. Разработана математическая модель, характеризующая явную зависимость температуры от измеренных электрических сопротивлений, единая для термометров сопротивления, изготовленных из различных металлов и различных температурных диапазонов. Построен метод параметрической идентификации коэффициентов модели и обоснована его оптимальность по порядку. Разработан метод определения температур по результатам обработки первичной измерительной информации, апробированный на экспериментальных данных. Полученные результаты приводят к следующим выводам. Предложенный метод позволяет на этапе калибровки и в ситуации, когда погрешность первичных измерений находится в допустимых пределах, определять температурные значения с гарантированной точностью.

7. Разработан метод определения температур по результатам обработки первичных измерений, содержащих отклонения от действительных значений. Результаты исследования приводят к выводу о том, что построенный метод позволяет на этапе эксплуатации формировать температурные значения с точностью, отражающей характер и уровень отклонений измеренных сопротивлений.

8. Разработаны алгоритмы оценки точности измерений, апробированные на экспериментальных данных. Построенные алгоритмы позволяют осуществлять количественную оценку точности результатов определения температур по первичным измерениям на этапе эксплуатации и осуществлять численную реализацию концепций, являющихся основой для диагностики состояния средства измерения.

Основные результаты, представленные в диссертации, являются новыми, имеют теоретическую и практическую значимость и служат основой для разработки и совершенствования методов обработки информации в системах контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динамически изменяющихся данных.

Основные положения диссертационной работы изложены в публикациях

Статьи, опубликованные в журналах, включенных в Перечень ВАК:

1. Япарова Н.М. О различных подходах к решению обратных граничных задач тепловой диагностики// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2012. Т. 7. №34(293). С. 60–67.
2. Япарова Н.М., Шестаков А.Л., Белоусов М.Д. Использование регуляризирующего алгоритма для определения коэффициентов в задаче оценки собственного состояния термометров сопротивления// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. №35. С.45-49.
3. Белоусов М.Д., Шестаков А.Л., Япарова Н.М. Оценка собственного состояния термометров сопротивления// Вестник Южно-Уральского гос. университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. №35. С.105-109.
4. Япарова Н.М. Численное моделирование решений обратной граничной задачи теплопроводности// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2013. Т.6, №3. С. 112-124.
5. Япарова Н.М. Об оптимальном по порядку методе решения задачи параметрической идентификации при оценке собственного состояния средств измерения// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т.18. №5. С.2759-2761.
6. Япарова Н.М. Программное обеспечение и алгоритмы обработки информации при калибровке термометров сопротивления// Программные продукты и системы. 2014. №1. С.180-184.
7. Солодуша С.В. Япарова Н.М. Численное решение обратной граничной задачи теплопроводности с помощью уравнений Вольтерра I рода/ Сибирский журнал вычислительной математики. 2015. Т.18, №3. С.327-335.
8. Япарова Н.М. Численный метод решения некоторых обратных задач теплопроводности с неизвестными начальными условиями / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т.15. №2. С. 55-65.
9. Япарова Н.М. Метод решения некоторых многомерных обратных граничных задач параболического типа без начальных условий / Вестник Южно-Уральского государ-

ственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т.15. №2. С. 97-108.

10. Япарова Н.М. Метод решения одной обратной задачи идентификации функции источника для систем с распределенными параметрами / Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015. Т.20. №5. С.1549-1552.

11. Япарова Н.М. Численный метод решения обратной задачи с неизвестными начальными условиями для нелинейного параболического уравнения / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2016. Т.5. №2. С.43-58.

12. Япарова Н. М. Метод решения обратной задачи идентификации функции источника с использованием преобразования Лапласа / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2016. Т.5. №3. С.20-35.

13. Япарова Н.М., Солодуша С.В. О точности численных методов решения уравнений Вольтерра I рода в задачах теплопереноса/ Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. Т.19. № 1. С.20-29.

14. Япарова Н.М. Метод прогнозирования температурного состояния цилиндра при термообработке в условиях неполной исходной информации/ Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. Т.19. № 2. С.54-65.

15. Япарова Н.М. Гаврилова Т.П. Интегральная модель и численный метод определения температуры при линейном теплопереносе/ Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. Т.19. №4. С. 60-71

Статьи, опубликованные в изданиях, цитируемых в Scopus, Web of Science:

1. Yaparova N. Numerical Methods for Solving a Boundary Value Inverse Heat Conduction Problem/ Inverse Problems in Science and Engineering 2014. Vol.22, Issue 5, pp. 832-847

2.Yaparova N., Shestakov A.L. Methods of calculating temperature values and estimating errors for identification of the state of temperature transducers/ 21st IMEKO World Congress on Measurement in Research and Industry, 2015, pp. 8.-12

3. Yaparova N. Mathematical modelling and method for solving a parametric identification problem for self-calibration measuring devices/ Inverse Problems in Science and Engineering 2016. Vol.24. Issue 1. pp. 77-91 DOI:10.1080/17415977.2015.1017482
4. Yaparova N., Shestakov A.L. Method for temperature measuring inside a cylindrical body based on surface measurements / «14th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics 2016: New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Systems Reliability, Maintainability and Safety» 2016. pp.8-12
5. Yaparova N. Method for temperature measuring in the rod with heat source under uncertain initial temperature / 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016 IEEE Conference Publications, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911716
6. Yaparova N. Method for solving the problem of nonlinear heating a cylindrical body with unknown initial temperature/ Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences: AIP Conference Proceedings, 2017, 1895:110011, DOI: 10.1063/1.5007417, ULR <http://dx.doi.org/10.1063/1.5007417>
7. N.Yaparova, A.Drozin Method for internal heat source identification in a rod based on indirect temperature measurements/2nd International Conference Ural Conference on Measurements. IEEE Xplore, 2017, pp. 93-98. DOI:10.1109/ICIEAM.2016.7911716
8. Yaparova N. Numerical method for solving an inverse boundary problem with unknown initial conditions for parabolic PDE using discrete regularization /Volume 10187 LNCS, 2017, pp.752-759 DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0-87
9. Solodusha S. Yaparova N. Numerical solutions of dynamic measurement challenges by volterra equations/ International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, IEEE Xplore, 2018, 8729132 DOI:10.1109/ICIEAM.2018.8729132
10. Yaparova N., Gavrilova T. Mathematical modeling and method for solving an inverse heat conduction problem via the Volterra equation/ Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences: AIP Conference Proceedings, 2018, Vol.2025, 100013

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

1. Япарова Н.М. Программно-вычислительный комплекс для обработки информации при оценке собственного состояния термометров сопротивлений. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614596 дата приоритета 18.01.2013, М.: Роспатент, 2013.

2. Япарова Н.М. Программно-вычислительный комплекс для обработки информации при калибровке термометров сопротивлений. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613515 дата приоритета 13.02.2013, М.: Роспатент, 2013
3. Япарова Н.М. Программно-вычислительный комплекс моделирования граничной тепловой функции для однородного стержня при решении обратной граничной задачи теплопроводности с начальными данными. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013660232, дата приоритета 09.09.2013. М.: Роспатент, 2013
4. Япарова Н.М. Программа моделирования распределения одномерного теплового режима на границе при неизвестных начальных условиях. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614775 дата приоритета 12.03.2014 М.: Роспатент, 2014.
5. Япарова Н.М. Программа моделирования функции распределения по времени плотности тепловых потоков, связанных с выделением (поглощением) тепла внутри тела в одномерной обратной задаче об определении источника для параболического уравнения с возмущенными граничными условиями. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615653, дата приоритета 26.03.2015. М.: Роспатент, 2015
6. Япарова Н.М. Программа моделирования тепловой функции внутри области и на внешних границах при решении многомерной обратной граничной задачи для параболического уравнения с неизвестными начальными условиями и граничными условиями, известными на части границы. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616527, дата приоритета 23.04.2015 М.: Роспатент, 2015.
7. Япарова Н.М. Программа моделирования тепловой функции внутри цилиндрической области и на внешних границах при решении обратной граничной задачи для нелинейного параболического уравнения с неизвестными начальными условиями. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660117 дата приоритета 06.08.2015 М.: Роспатент, 2015.

Статьи, тезисы докладов в российских и зарубежных изданиях:

1. Япарова Н.М. О точности метода регуляризации нулевого порядка // Труды математического центра им. Лобачевского. Тезисы докладов международной конференции «Теория функций, ее приложения и смежные вопросы». Казань. 2011. Т.43. С. 393-394
2. Япарова Н.М. Использование метода проекционной регуляризации для решения обратной задачи тепловой диагностики // Тезисы докладов международной конферен-

- ции «Обратные и некорректные задачи математической физики» Новосибирск. 2012. С.259-260
3. Япарова Н.М. О различных подходах к решению обратной граничной задачи теплопроводности //Труды математического центра им.Лобачевского. Тезисы докладов международной конференции «Теория функций, ее приложения и смежные вопросы». Казань. 2013. Т.46.С. 474-476.
 4. Япарова Н.М. Математическое моделирование и численный метод решения одной обратной задачи при оценке собственного состояния средств измерения // Тезисы докладов международной конференции «Функциональные пространства. Дифференциальные операторы. Общая топология. Проблемы математического образования», М.: РУДН. 2013. С. 478-479.
 5. Yaparova N. Numerical solution of an inverse problem of heat conduction// Applied Inverse Problem Conference 2013, mini-symposium «Theory and Numerical Methods of Recovery of Coefficients of PDEs from Boundary Measurements» KAIST, Daejeon, South Korea. 2013. P.124.
 6. Yaparova N. Numerical method for solving a parametric identification problem for measuring devices with self-check of eigenstate// International Congress of Mathematicians. S17: Mathematics in Science and Technology, Seoul, Korea.2014. P.671.
 7. Yaparova N. Mathematical modeling and regularized method for solving a parameter identification problem for measuring devices with self-check of eigenstate // 8-th International Conference on Inverse Problems in Engineering, Book of Abstracts, Silesian University of Technology, Krakov, Poland. 2014. P. 183.
 8. Япарова Н.М. Солодуша С.В. Приближенное решение уравнений Вольтерра I рода, возникающих в обратной граничной задаче теплопроводности // Алгоритмический анализ неустойчивых задач. Тезисы докладов всероссийской конференции с международным участием. Челябинск, ЮУрГУ. 2014. С. 73-74.
 9. Япарова Н.М. Численный метод решения обратной граничной задачи теплопроводности // Алгоритмический анализ неустойчивых задач. Тезисы докладов всероссийской конференции с международным участием. Челябинск, ЮУрГУ. 2014. С. 176-177.
 10. Япарова Н.М., Солодуша С.В. Численное решение уравнений типа Вольтерра I рода, возникающих в обратной граничной задаче теплопроводности//Сборник трудов

- VII международного симпозиума «Обобщенные постановки и решения задач управления (GSSCP-2014)». АНО Из-во физико-математической литературы. 2014. С. 164-168.
11. Yaparova N., Shestakov A.L. Identification of Optimum Parameters in Mathematical Model of Temperature Measuring Device // SIAM Conferense on Control and its Application. France. 2015. P.67.
12. Yaparova N. Numerical method for solving an inverse problem of identifying the source function // Mathematical and Computational modeling in science and technology ICMCMST 2015. The International conference ICMCMST 2015, Izmir, Turkey, 2015, pp.70-71.
13. Япарова Н.М. Численный метод решения многомерной обратной граничной задачи теплопроводности с неизвестными начальными условиями // Международный научный семинар по обратным и некорректно поставленным задачам. М.: РУДН. 2015. С.198-199.
14. Япарова Н.М. Численный метод решения обратной задачи распределения температуры в цилиндрическом теле // Современные проблемы электрометаллургии стали Сборник трудов XVI международной конференции Т.1, 2015, С. 115-121.
15. Yaparova N. Numerical method for solving an inverse problem for nonlinear parabolic PDE with unknown initial condition arising in thermal diagnostics // XXVIII International Congress of Mathematicians, Mathematics in Science and Technology, Rio de Janeiro, Brazilia. – 2018. <http://lorenz.impa.br/certs/shortcertificates.lua>.
16. Япарова Н.М. Численный метод решения обратной задачи тепловой диагностики // Тезисы Международной конференции "Марчуковские чтения". 2019. Новосибирск. НГУ. С. 104-105.
17. Япарова Н.М. О методе прогнозирования температурного состояния заготовок // Сборник трудов XVIII международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали». Т.1, 2019, С. 215-221.
18. Япарова Н.М., Гаврилова Т.П. Численный метод прогнозирования температуры с помощью уравнения Вольтерра // Тезисы Международной конференции «Марчуковские чтения». 2019. Новосибирск. НГУ. С. 105.

Подписано в печать 15.07.20. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 2.32. Тираж 150 экз. Заказ 183/214.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ,
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76