

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи



СЕМЕНОВ
Дмитрий Сергеевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
РАДИАЦИОННО-КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 1.3.14. – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
НЕНАРОКОМОВ Алексей Владимирович

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ненарокомов Алексей Владимирович

Официальные оппоненты: **Терехов Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Сыродой Семен Владимирович
Кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доцент

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «27» декабря 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

https://mai.ru/upload/iblock/72c/fbqmqm1e151leqclixgjnfx2kfq8yua/2022_Semenov_DS.pdf

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.327.06,
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации и степень ее проработанности

Для современных технических систем индивидуальной защиты – различных скафандров, комбинезонов и т.д. – характерны конструктивные элементы, работающие в условиях интенсивных, часто экстремальных внешних воздействий. Для подобных технических систем обеспечение тепловых режимов, базирующееся на применении материалов с соответствующими свойствами, является одним из важнейших разделов проектирования, определяющим основные проектно-конструкторские решения и эксплуатационные характеристики. Прогнозирование и оптимизация соответствующих процессов теплопереноса предполагает математическое моделирование, целью которого является связь параметров системы (законов управления, свойств) и ее состояния. Однако, в случаях, когда значения параметров системы являются неизвестными величинами или могут варьироваться в течении времени, возникает необходимость их определения. Следуя концепции причинно-следственной связи, задача определения характеристик системы по ее состоянию является обратной задачей теплообмена (ОЗТ).

Методология обратных задач относится к одному из динамично развивающихся разделов современной науки, имеющему многочисленные и разнообразные приложения в технике. Особенностью ОЗТ является ее математическая некорректность, однако, благодаря методу регуляризации, предложенному А.Н. Тихоновым, эту проблему удалось решить. Значительному прогрессу в решении некорректных обратных задач способствовали достижения отечественных научных школ, в том числе и в МАИ.

В результате экспериментальных исследований, как правило, удается определить некоторые характеристики состояния системы, например – температуру. Тогда задача идентификации математической модели сводится к определению некоторой совокупности неизвестных параметров, основываясь на дополнительной информации о ее состоянии. Традиционные методы исследования нелинейных, нестационарных и взаимосвязанных процессов радиационно-кондуктивного теплопереноса предполагают размещение температурных датчиков на некоторой глубине в исследуемом материале или образце и регистрацию отклика на внешнее тепловое воздействия. Однако, существенная часть исследуемых технических и биологических объектов не допускает экспериментальное измерение температурного отклика материала на известное внешнее воздействие. Прежде всего это высокопористые и электропроводящие теплоизоляционные материалы, материалы костюмов индивидуальной защиты (скафандров и т.д.), отдельных слоев экранновакуумной теплоизоляции. Также для разработки индивидуальных средств защиты необходимо знать теплофизические характеристики защищаемого объекта (кожи человека), а особенностью работы с биологическими тканями является невозможность применения внутренних датчиков температуры. Еще одной задачей, требующей своего решения, является

теплометрическая внекорабельная деятельность экипажей орбитальных космических станций, когда требуется определить те или иные характеристики корпуса по результатам внешних измерений температуры.

Методы идентификации теплонагруженных систем без использования контактных средств измерения температуры существенно отстают от теоретических исследований и настоятельно требуется развитие этих методов в комбинации с программно-алгоритмическим обеспечением. Отдельной задачей является оптимальное планирование эксперимента, необходимое для наиболее точного регулирования внешнего теплового воздействия и регистрации наиболее полной информации о состоянии системы.

Таким образом, актуальность разработки методики идентификации моделей без использования контактных средств измерения обуславливается необходимостью предотвращения возникновения риска вреда здоровью или жизни человека или достижения требуемого терапевтического эффекта во время лечения. При этом, необходимо обеспечить изменения температурного поля ткани в заданных пределах, для чего применяются те или иные технические (термозащитная одежда, дополнительное охлаждение) и методологические (регулировка режима внешнего теплового воздействия) решения. Прогнозирование и регулирование указанных процессов требует математического моделирования, которое невозможно без точной оценки теплофизических и радиационно-оптических характеристик ткани. Рассматриваемая задача усложняется значительной вариабельностью характеристик. Поэтому, важнейшим этапом решения задачи прогнозирования является идентификация математической модели теплопереноса.

Предлагаемый в работе подход является достаточно общим, но для конкретизации исследуемого процесса теплопереноса (и, соответственно, используемой математической модели) рассматривается лазерная гипертермия поверхностных тканей человека. В данном контексте гипертермия – нагрев биологических тканей до температур, превышающих 40 °С – распространенный метод, применяющийся при лечении онкологических заболеваний, аритмии сердца, болезни Паркинсона, гиперподвижности суставов, гиперметропии, гиперплазии и др. Терапевтическим фактором, при этом, является повышение клеточного метаболизма, перфузии, оксигенации (при 40–45 °С) и модификация или разрушение тканей в случае абляции (свыше 50 °С).

Цель работы

Целью данной работы является разработка комплекса методических средств для идентификации математических моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса базирующихся на аппарате обратных задач теплообмена при поверхностных и бесконтактных измерениях температуры.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. разработка математической модели радиационно-кондуктивного теплопереноса, адекватной рассматриваемым физическим процессам;
2. разработка алгоритма идентификации математической модели теплопереноса, основанный на методологии обратных задач теплообмена;

3. выбор материала, имитирующего свойства исследуемого объекта, и позволяющего реализовать экспериментальную часть исследования;
4. разработка экспериментального метода регистрации температурного отклика на радиационный тепловой поток, воздействующий на поверхность исследуемого материала;
5. разработка программного обеспечения, реализующего алгоритм идентификации, для определения радиационно-оптических и теплофизических характеристик;
6. проведение экспериментальных исследований для апробации метода.

Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в формировании постановки и алгоритма решения обратной задачи теплообмена, идентификации математической модели в условиях невозможности использования внутренних контактных средств измерения температуры и, в результате, – создании методологической базы для внедрения предложенных подходов в практику.

Теоретическая и практическая значимость

В работе сформирован комплексный подход (алгоритм решения обратной задачи, программный комплекс и методика проведения эксперимента) к расчетно-экспериментальной идентификации математических моделей теплопереноса без использования внутренних контактных измерений, который может быть использован для определения свойств вновь разрабатываемых материалов и систем.

Внедрение результатов работы в практику позволит облегчить возможность использования новых материалов и изделий из них, обеспечить безопасное проведение медицинских процедур, повысить точность прогнозирования процессов теплопереноса и, как следствие, обеспечить высокую эффективность самого широкого круга систем.

Методы исследования

С целью решения задачи идентификации математической модели теплопереноса без использования контактных средств измерения температуры был использован расчетно-экстремальный метод, основанный на минимизации целевого функционала невязки. Анализ чувствительности модели к параметрам системы, а также, оценка эффективности решения выполнялись методом вычислительного эксперимента, для чего был разработан программный комплекс на языке Fortran. Апробация методики идентификации выполнена на натурном эксперименте.

Положения, выносимые на защиту

1. Расчетно-экспериментальный метод идентификации модели радиационно-кондуктивного теплопереноса без использования контактных средств измерения температуры;
2. Конструкция испытательного стенда для реализации разработанного метода;
3. Результаты реализации разработанного метода идентификации применительно к одномерной нестационарной модели радиационно-кондуктивного теплопереноса в образце материала под воздействием лазерного излучения.

Личный вклад автора

1. Постановка задачи идентификации модели теплопереноса без использования контактных средств измерения температуры;
2. Разработка алгоритма и программного обеспечения для решения задачи определения комплекса характеристик системы;
3. Разработка технического задания, подготовка и обработка результатов экспериментальных исследований.

Достоверность результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена корректным применением общепринятых подходов к математическому моделированию, использованием строго определенных методов теории теплообмена и решения обратных задач. Результаты вычислительных и натурных экспериментов оценивались на устойчивость, сходимость и адекватность рассматриваемому физическому процессу.

Апробация результатов работы

Положения и результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: VII Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2018), II Всероссийский научно-образовательный конгресс с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» (Москва, 2018), Современные проблемы теплофизики и энергетики (Москва, 2020), IV Всероссийский научно-образовательный Конгресс с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» (Москва, 2021), Всероссийская конференция «XXXVII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2021), XVI Минский международный форум по тепломассообмену (Минск, 2022), Всероссийская конференция «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2022).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 124 страницы, включающих 66 рисунков, 7 таблиц. Список литературы включает 95 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена формированию общего представления о состоянии решения научной проблемы, определены предпосылки к разработке методов и средств идентификации математических моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса с использованием бесконтактных измерений температуры, выполнен обзор существующих моделей теплопереноса применительно к биологическим тканям организма, средств измерения температуры, а также – показана вариабельность исследуемых теплофизических и радиационно-оптических характеристик.

С целью предметного рассмотрения тепловых процессов, в данной работе в качестве примера выбрана лазерная гипертермия поверхностных тканей. Контроль температуры в данном процессе критически важен, в равной степени, как и при разработке теплозащитных материалов и в оптимизации целого спектра внешних воздействий.

Температура тела человека является одним из наиболее часто применяемых на практике индикаторов состояния организма. При этом, в зависимости от условий, выполняют оценку внутренней или поверхностной температур. Наиболее широкое распространение методы измерения и расчета температуры тела получили в медицине и проектировании зданий и сооружений в части обеспечения комфортных условий.

Обеспечение нормального температурного режима для человека, находящегося под воздействием агрессивной окружающей среды или подвергающегося целенаправленному нагреву, в первую очередь предполагает учет радиационного и кондуктивного теплообмена на поверхности тела.

Задача моделирования теплопереноса в тканях организма зачастую сводится к описанию переноса тепла кровью. Основоположником такого подхода принято считать Гарри Пеннеса, предложившего в 1948 году модель теплопередачи в предплечии, которая впоследствии показала хорошие результаты при применении в других областях:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) - m_{bl} C_{bl} (T - T_{bl}) + Q_{bl} \quad (1)$$

где m_{bl} , C_{bl} и T_{bl} – массовый расход крови, удельная теплоемкость и температура перфузирующей крови [Дж/кг•К], соответственно. Q_m – количество вырабатываемой в результате метаболизма теплоты [Вт], λ – коэффициент теплопроводности [Вт/м•К]. Данная модель ввиду своей простоты легла в основу целого класса моделей переноса тепла кровью.

Следует отметить, что уравнение Пеннеса не учитывает диаметр кровеносных сосудов и изменение температуры циркулирующей крови, в связи с чем, его применение можно считать целесообразным в первую очередь применительно к определению объемного теплопереноса во внутренних органах, питаемых крупными артериями. В связи с этим, модель подвергалась модификациям, учитывающим влияние тех или иных допущений (таких как направление потока крови, локальную геометрию сосудов, неизменность

температуры артериальной крови при перемещении от аорты к артериям и артериолам). Так, Вульф предложил учитывать энтальпию крови, выражая поток энергии в любой точке ткани, Ming и соавторы предлагают трехслойную модель теплопереноса, учитывающую метаболизм, испарение и диффузию воды в поверхностных тканях.

Исследование теплообмена биологической ткани с окружающей средой требует учета радиационно-кондуктивного переноса. При этом, решая конкретную прикладную задачу, коэффициенты теплоотдачи часто определяют по радиационному и полному тепловым потокам от тела. Так, Kurazumi предлагает следующее выражение для общего количества теплоты Q , выделяемой телом в окружающую среду:

$$Q = C + R = \alpha_{conv}(T_s - T_a)f_{conv} + \varepsilon_s \varepsilon_{is} \sigma (T_s^4 - T_{rad}^4) F f_{rad} \quad (2)$$

где α_{conv} – конвективный коэффициент теплоотдачи [Вт/м²•К]; T_s – температура поверхности тела [К]; T_a – температура окружающего воздуха [К]; T_{rad} – средняя радиационная температура тела [К]; f_{conv} – коэффициент конвективной теплоотдачи; f_{rad} – коэффициент радиационной теплоотдачи; ε_s – степень черноты поверхности тела; ε_{is} – степень черноты внутренней поверхности ткани; σ – постоянная Стефана-Больцмана [Вт/м²•К⁴]; F – угловой показатель относительного положения тела в помещении.

При математическом описании процессов лазерной гипертермии поверхностных тканей классическим подходом является применение континуальной модели и уравнения переноса излучения для изотропной среды:

$$\vec{\Omega} \nabla I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \beta_\lambda^{tr} I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{\sigma_\lambda^{tr}}{4\pi} \int_{(4\pi)} I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' \quad (3)$$

где $I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$ – спектральная интенсивность излучения в точке \vec{r} в направлении $\vec{\Omega}$; $\sigma_\lambda^{tr} = \sigma_\lambda(1 - \bar{\mu}_\lambda)$ – транспортный коэффициент рассеяния, σ_λ – коэффициент рассеяния, $\bar{\mu}_\lambda$ – фактор асимметрии рассеяния; $\beta_\lambda^{tr} = \alpha_\lambda + \sigma_\lambda^{tr}$ – транспортный коэффициент ослабления; α_λ – коэффициент поглощения.

При этом, показано, что использование одномерной модели обеспечивает достаточную в сравнении с двумерной точность в случае лазерной гипертермии из-за высокой степени рассеяния излучения в ткани.

Выбор характеристик ткани, требующих определения при моделировании для достижения требуемой эффективности процесса гипертермии, может быть обусловлен двумя факторами: определенностью и вариабельностью. Под определенностью в данном случае понимается возможность использования табличных значений или результатов предварительного расчета (эксперимента). Исследование вариабельности той или иной характеристики предполагает определение перечня изменяемых в процессе гипертермии параметров тканей и выделение тех, чье влияние на результирующее поле температур можно считать существенным в условиях конкретной задачи.

Представленные в литературе данные о теплофизических характеристиках биологических тканей часто связаны с исследованиями на животных или in vitro. Кроме того, не смотря на отсутствие изменений структуры ткани при

температурах до 42 °С, необходимо учитывать значительную биологическую вариабельность (свойства биологической ткани определяются ее структурой и физиологическим состоянием: уровнем гидратации, гомогенностью, видовой вариантносью, характером измерений in-vivo – in-vitro и др.) и погрешность метода измерения. Поэтому, сравнительная оценка результатов работ разных авторов затруднительна.

Измерение температуры биологических тканей является отдельной нетривиальной задачей. На протяжении многих столетий изменение данного параметра использовалось в медицинской практике как критерий состояния организма, ввиду чего перечень самых разнообразных технических решений претерпевал непрерывное расширение.

С целью формирования требований к средствам измерения был выполнен анализ литературных обзоров, рассматривающих термометрию в медицинской практике и опубликованных за последние 10 лет.

Таким образом, в результате анализа был выполнен обзор существующих моделей теплопереноса применительно к биологическим тканям организма, средств измерения температуры, а также – показана вариабельность исследуемых теплофизических и радиационно-оптических характеристик.

Во второй главе приведено описание теоретического решения задачи идентификации математических моделей теплопереноса в непрозрачных материалах: сформулирована решаемая задача исследования, разработана математическая модель и алгоритм ее идентификации. С целью подтверждения работоспособности и анализа эффективности предложенного подхода проведен вычислительный эксперимент.

Рассматривалась задача радиационно-кондуктивного теплопереноса на примере лазерной гипертермии поверхностных тканей. С точки зрения описания процесса теплового воздействия, задача может быть сформулирована следующим образом. Неограниченная пластина толщиной d подвергается воздействию нормально падающего теплового потока q_l . На левой и правой границах происходит теплообмен с окружающей средой. Учитывая специфику биологических тканей, измерение температуры проводится только на левой границе бесконтактным способом. Схема процесса представлена на рисунке 1.

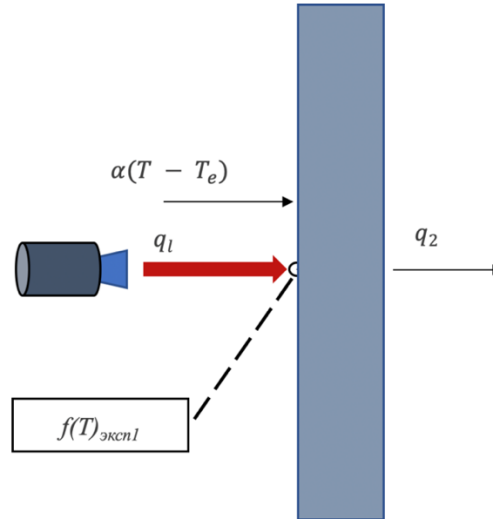


Рисунок 1. Схема процесса теплопереноса в поверхностных тканях.

Математическая модель теплопереноса в рассматриваемой системе имеет вид:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < d, 0 < \tau \leq \tau_{max}, \quad (4)$$

$$T(x_0) = T_0, 0 \leq x \leq d \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = A_s q_l(\tau) + \alpha(T(0, \tau) - T_e(\tau)), 0 \leq \tau \leq \tau_{max} \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) = \alpha(T(d, \tau) - T_e(\tau)), 0 \leq \tau \leq \tau_{max}. \quad (7)$$

где A_s – коэффициент поглощения лазерного излучения; C – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; d – толщина образца; τ – время; α – коэффициент теплоотдачи.

В случае лазерной гипертермии, целью которой является нагрев и поддержание ткани в заданном диапазоне температур, тепловой поток лазера, поглощенный поверхностью q_l определяется следующим образом:

$$q_l = q_{max} \varphi(\tau) \quad (8)$$

А функция распределения $\varphi(\tau)$, в свою очередь, описывается вектором временных параметров $\bar{\tau} = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n, \Delta\tau_1, \Delta\tau_1, \dots\}$.

В рассматриваемой задаче предполагается, что все определяемые характеристики являются постоянными величинами. Разработанный алгоритм основывается на решении обратной задачи теплообмена по результатам измерений температуры на поверхности $T_{exp}(0, \tau) = f(\tau)$.

В операторном виде задача определения комплекса характеристик $\bar{u} = \{\alpha, q, \lambda\}$ (где $q = q_{max} A_s$) может быть сформулирована как решение уравнения

$$A \bar{u} = f(\tau) \quad (9)$$

где под оператором A понимается краевая задача (4)–(7). Следуя принципу итерационной регуляризации и введя в рассмотрение среднеквадратичный функционал невязки расчетных и экспериментально-измеренных температур,

переформулируем задачу следующим образом: необходимо определить такое значение $\bar{u} = \{\alpha, q, \lambda\}$, при котором выполняется условие

$$J(\bar{u}) = \int_0^{\tau_m} (A_m \bar{u} - f_m)^2 d\tau \lesssim \delta^2 \quad (10)$$

В результате задача сводится к задаче минимизации функционала $J(\bar{u})$. При этом, в случае, когда определяемые характеристики являются постоянными величинами, весьма эффективным является применение метода последовательных приближений с использованием линейной оценки приращения $\Delta \bar{u}^S$, задаваемого на каждой итерации следующим образом:

$$J(\Delta \bar{u}^{S+1}) = \min J(\bar{u}^S + \Delta \bar{u}^S) \quad (11)$$

где $\Delta u \in R^{N_u}$, $N_u = 3$,

s – номер итерации,

$\Delta \bar{u}^S$ – приращение вектора неизвестных характеристик на s итерации.

При этом, $\Delta \bar{u}^S$ определяется из условия:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta \bar{u}} (\bar{u}^S + \Delta \bar{u}^S) = 0 \quad (12)$$

или

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{\tau_m} (A(\bar{u}^S + \Delta \bar{u}^S) - f)(A)'_{\bar{u}} \bar{e} d\tau \\ = 2 \int_0^{\tau_m} (A(\bar{u}^S) + ((A)'_{\bar{u}} \bar{e})^T \Delta \bar{u}^S + O(\|\Delta \bar{u}^S\|) \\ - f)(A)'_{\bar{u}} \bar{e} d\tau \end{aligned} \quad (13)$$

где $\bar{e} = \{e_i\}_1^{N_u}$ – единичный вектор. В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$- \int_0^{\tau_m} (A(\bar{u}^S) - f)(A)'_{\bar{u}} \bar{e} d\tau = \int_0^{\tau_m} (A)'_{\bar{u}} \bar{e} ((A)'_{\bar{u}} \bar{e})^T \Delta \bar{u} d\tau \quad (14)$$

или

$$- \int_0^{\tau_m} (A(\bar{u}^S) - f)(A)'_{\bar{u}_i} u_i d\tau = \sum_{k=1}^{N_u} \int_0^{\tau_m} (A)'_{u_k} e_k (A)'_{u_i} e_i \Delta u_k d\tau, \quad (15)$$

где $i = \overline{1, N_u}$.

С целью получения выражения для $(A)'_{\bar{u}}$, предположим, что неизвестная характеристика u_i получила приращение Δu_i , при этом некоторое приращение $\theta^i(x, \tau)$ получит и поле температур в рассматриваемой системе. С точностью порядка $O(\Delta u^2)$ приращение $\theta^i(x, \tau)$ удовлетворяет следующей задаче:

$$C \frac{\partial \theta^i}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 \theta^i}{\partial x^2} + \delta_i^\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < d, 0 < \tau \leq \tau_{max} \quad (16)$$

$$\theta^i(x, 0) = 0, x \in (0, d) \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
-\lambda \frac{\partial \theta^i}{\partial x}(0, \tau) - \delta_i^\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) &= \delta_i^q \varphi(\tau) + \delta_i^\alpha (T(0, \tau) - T_e(\tau) + \alpha \theta^i(0, \tau)), \\
0 \leq \tau \leq \tau_{max}, &
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
-\lambda \frac{\partial \theta^i}{\partial x}(d, \tau) - \delta_i^\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) &= \delta_i^q(\tau), \\
i &= 1, 2, 3
\end{aligned} \tag{19}$$

где

$$\delta_i^\alpha = \begin{cases} 1, u_i = \alpha \\ 0, u_i \neq \alpha \end{cases}$$

$$\delta_i^q = \begin{cases} 1, u_i = q \\ 0, u_i \neq q \end{cases}$$

$$\delta_i^\lambda = \begin{cases} 1, u_i = \lambda \\ 0, u_i \neq \lambda \end{cases}$$

Тогда

$$(A_m)'_{u_i}, \Delta u_i = \theta_{mi}(X_m, \tau), \tag{20}$$

В результате, система уравнений может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^{N_u} \left(\int_0^{\tau_m} \tilde{\theta}_m^k(X_m, \tau) \tilde{\theta}_m^i(X_m, \tau) d\tau \right) du_i & \\
= - \int_0^{\tau_m} (T_m(X_m, \tau) - f_m(\tau)) \tilde{\theta}_m^i(X_m, \tau) d\tau, \quad i = 1, 2, 3 &
\end{aligned} \tag{21}$$

Система алгебраических уравнений (16–20) имеет симметричную матрицу и может быть решена методом квадратного корня.

Итерационный процесс строится следующим образом:

1. Задается начальное приближение искомых характеристик (нулевое или основанное на априорной информации);
2. Решается прямая краевая задача и система задач для приращения температуры; вычисляется приращение неизвестных характеристик $\Delta \bar{u}^s$ и значение минимизируемого функционала $J(\bar{u}^{s+1})$;
3. Проверяется условие окончания итерационного процесса и, если оно не удовлетворено, происходит возврат к п. 2.

Эффективность предложенного алгоритма анализировалась при определении радиационно-оптических характеристик терморегулирующих покрытий космических летательных аппаратов. Проведенные численные исследования показали возможность использования критерия невязки для останова итерационного процесса.

С целью подтверждения работоспособности и анализа эффективности предложенного подхода проведен вычислительный эксперимент.

Третья глава посвящена экспериментальной отработке разработанного подхода и включает в себя описание испытательного стенда и отчет о подготовке, проведении и обработке результатов эксперимента. Проведен анализ полученных результатов.

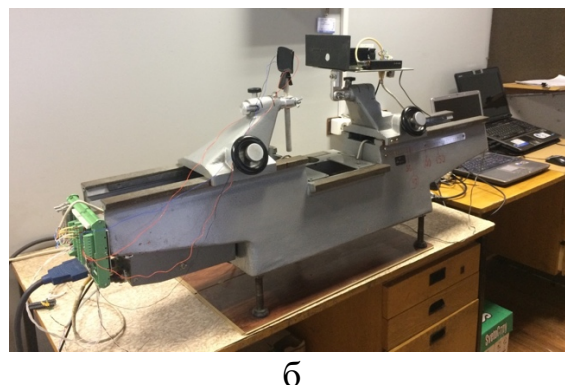
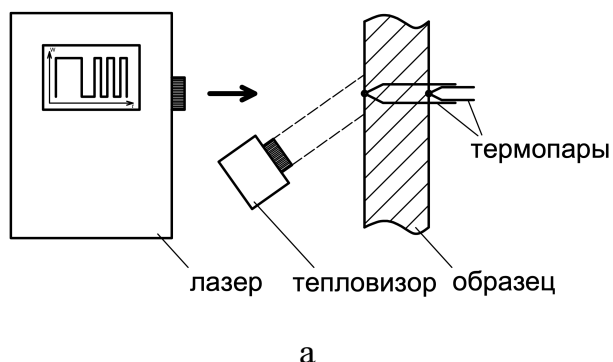


Рисунок 2. Экспериментальная установка: а – схема, б – внешний вид

В качестве образца на данном этапе работы использовалась пластина из полиэтилена низкого давления (ПНД) размером 50 x 50 x 3 мм с установленными микротермопарами. Следует отметить, что термопарные измерения не использовались в расчетах и применялись исключительно с методологической целью – в частности, для предварительного подбора режимов работы и дополнительного контроля протекания эксперимента.

Бесконтактное измерение температуры поверхности осуществлялось при помощи тепловизионной камеры FLIR SC660 (США).

С целью апробации разработанной методики был проведен эксперимент, в рамках которого исследуемый образец подвергался импульсному нагреву лазером и проводились измерения температуры его поверхности. Процедура идентификации включала в себя два этапа: получение экспериментальных данных и расчет.

Режим работы лазера, позволяющий обеспечить поддержание температуры поверхности образца в заданном диапазоне (40–42 °С) был подобран по результатам вычислительного эксперимента. Испытания проводились при температуре окружающего воздуха $T_c = 24,6$ °С, давлении $P = 1,0$ бар.

В результате эксперимента получен массив значений температуры облучаемой поверхности T_{IR} (рис. 3).

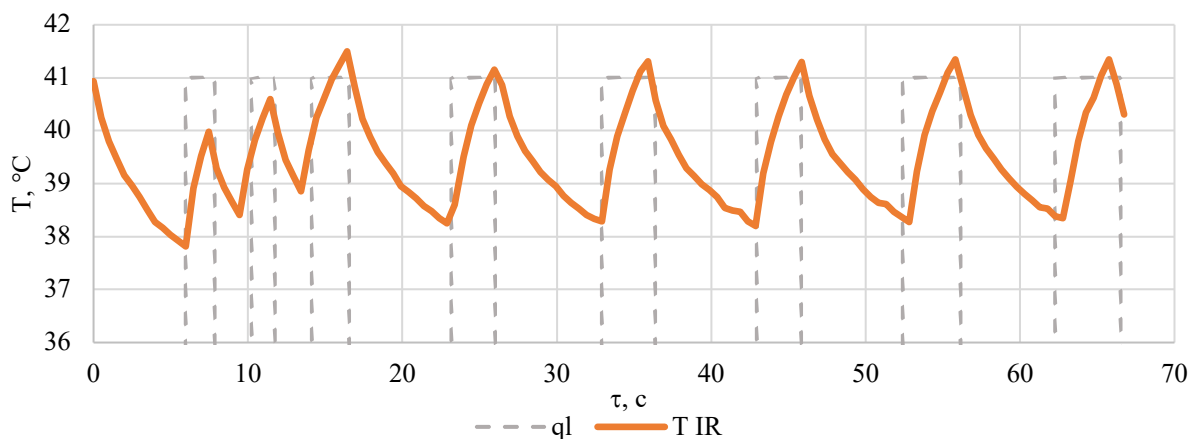


Рисунок 3. Диаграмма работы лазера и показания тепловизора.

Полученный массив использовался в качестве входных данных для разработанного программного комплекса, реализующего методику идентификации математической модели.

В результате, по экспериментальным данным были восстановлены значения коэффициента теплоотдачи α (рис. 4а) и амплитуды поглощенного теплового потока лазера q_{max} (рис. 4б). На приведенных ниже графиках представлены значения данных характеристик на каждом шаге итерационного процесса.

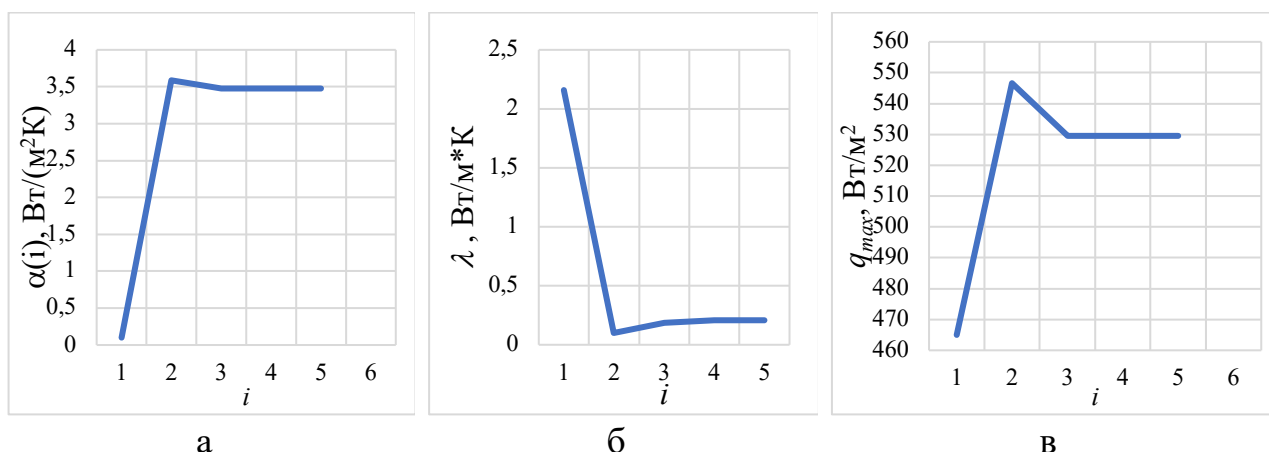


Рисунок 4. График зависимости: а – восстанавливаемого коэффициента теплоотдачи α , Вт/м²К, б – коэффициента теплопроводности λ , Вт/м*К, в – амплитуды поглощенного теплового потока лазера Aq_{max} , Вт/м² от номера итерации i .

Следует отметить, что в случае конкретной задачи наблюдается расхождение расчетных и определенных в ходе эксперимента значений температур (рис. 5).

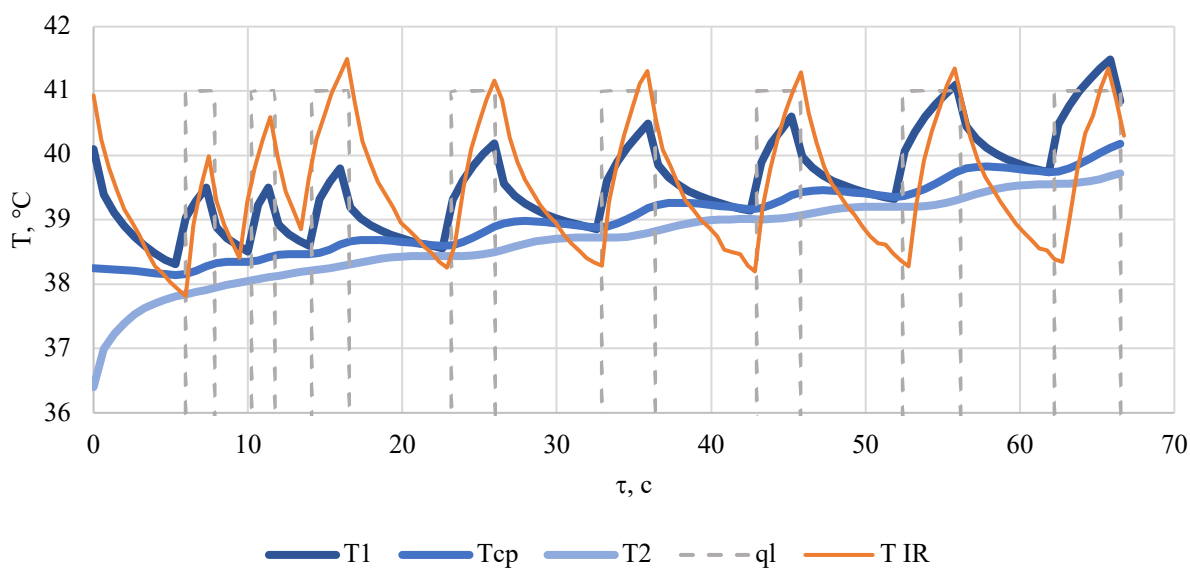


Рисунок 5. Результаты решения прямой задачи теплопереноса

Это расхождение может объясняться отсутствием учета в выбранной модели полупрозрачности материала, а также, вероятным воздействием естественной конвекции воздуха и другими возможными методологическими погрешностями. Несмотря на это, решение задачи определения комплекса характеристик системы сходится, о чем говорит значение минимизируемого функционала невязки. Точность воспроизведения условий вычислительного эксперимента, при необходимости, может быть повышена исключением внешних факторов и снижением систематических погрешностей.

В четвертой главе изложен модифицированный подход к решению поставленной задачи обеспечивающий повышение точности моделирования исследуемого процесса путем внедрения дополнительных параметров в математическую модель, а именно – учета полупрозрачности исследуемого образца. С целью обеспечения единственности решения задачи параметрической идентификации, предложен подход, основанный на декомпозиции процесса теплопереноса путем разбиения его на составные части. Разработано программное обеспечение для реализации данного подхода и проведена апробация методом вычислительного эксперимента.

Решение задачи прогнозирования теплового воздействия, как правило, предполагает итерационное усложнение математической модели с целью обеспечения требуемой точности расчетов. В связи с этим, на данном этапе работы предлагается модифицированная модель, учитывающая рассеяние теплового потока лазера в ткани: полупрозрачный материал нагревается импульсным облучением лазера q_l с одной стороны, на левой и правой границах происходит теплообмен с окружающей средой. При этом, измерение температуры поверхности, как характеристики состояния системы, происходит бесконтактным способом. Процесс теплопереноса в неограниченной пластине толщиной d описывается системой уравнений:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A_s q_l(\tau) e^{-rx}, \quad 0 < x < d, \quad 0 < \tau \leq \tau_{max}, \quad (22)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq d \quad (23)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = A_s q_l(\tau) + \alpha(T(0, \tau) - T_e(\tau)), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{max} \quad (24)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) = q_2(\tau), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_{max} \quad (25)$$

где C – теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; d – толщина образца; τ – время; α – коэффициент теплоотдачи; r – линейный коэффициент поглощения; A_s – поглощающая способность.

В рамках данной работы начальное распределение температур в исследуемом образце (до воздействия лазера) считалось линейным: 32 °С на поверхности и 36,6 °С на глубине d . В действительности, реальное распределение температур в коже в некоторой степени отличается от линейного и должно быть рассчитано применительно к конкретной практической задаче.

Учитывая, итерационность предлагаемой методики определения характеристик, точное моделирование начального распределения температур может позволить сократить время расчетов (что особенно актуально при реализации системы корректировки процесса гипертермии в режиме реального времени), однако, данный вопрос выходит за рамки работы.

В случае, когда внешнее тепловое воздействие на исследуемый объект обуславливается импульсным излучением (как при лазерной гипертермии поверхностных тканей), целесообразным с точки зрения оптимизации вычислительного процесса, является дискретизация расчета. В связи с тем, что для достижения необходимого терапевтического эффекта температура поверхностных тканей должна поддерживаться в некотором диапазоне, процедура предполагает первичный нагрев и периодическое отключение излучателя на определенный промежуток времени. Таким образом, целесообразным представляется независимое рассмотрение процессов нагрева и остывания исследуемого образца.

Теплоемкость и коэффициент теплопроводности, при этом, могут быть определены по предварительным калориметрическим испытаниям (например, по de Rivera и соавт.), а начальное приближение коэффициента поглощения – по методу, предложенному Kono и Yamada.

Рассмотрим детально каждый из этапов идентификации модели теплопереноса в полупрозрачном материале.

Исходя из применяемой на практике методики гипертермии, на поверхность ткани периодически воздействует лазерное излучение с целью поддержания температуры в заданном диапазоне. После завершения процедуры лазерный модуль отключается и происходит естественное охлаждение. С целью решения задачи идентификации обработка экспериментальных данных выполнялась в обратном порядке. Рассмотрим детально каждый из этапов идентификации модели теплопереноса в полупрозрачном материале.

Рассмотрим сначала второй этап процедуры – охлаждение поверхности. Радиационный тепловой поток не действует на поверхность ткани и снижение температуры происходит за счет естественного теплообмена с окружающей средой и прилегающими тканями. На данном промежутке времени этот процесс описывается системой уравнений:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < d, 0 < \tau \leq \tau_{max}, \quad (26)$$

$$T(x_0) = T_0, 0 \leq x \leq d \quad (27)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = \alpha(T(0, \tau) - T_e(\tau)), 0 \leq \tau \leq \tau_{max} \quad (28)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(d, \tau) = \alpha(T(d, \tau) - T_e(\tau)), 0 \leq \tau \leq \tau_{max}. \quad (29)$$

где $T_0 = 36,6$ °С.

Таким образом, этап охлаждения заключается снижении температуры равномерно прогретого образца, на левой границе которого происходит теплообмен с окружающей средой, а на правой – с внутренними тканями.

Внешнее тепловое воздействие при этом отсутствует. Считая теплоемкость образца известной и применяя подход, описанный в главе 2, методом итерационной регуляризации определяются начальные приближения коэффициентов теплопроводности λ и теплоотдачи α .

Следующим шагом является обработка измерений в процессе нагрева поверхности до температуры порядка 42 °С (в вычислительном эксперименте примем это значение как индикатор, используемый для отключения лазерного модуля).

На этапе нагрева теплообмен в исследуемой системе описывается уравнениями (22–25). При этом, учитывая полученные на предыдущем шаге результаты, неизвестными характеристиками остаются лишь поглощающая способность материала образца A_s и линейный коэффициент поглощения r .

На данном этапе – периодического нагрева – реализуется тот же процесс итерационной регуляризации для решения обратной задачи теплообмена и определения двух неизвестных характеристик.

Таким образом, на каждом этапе определяется лишь две характеристики. Причем, при необходимости, на практике вычисления могут продолжаться итерационно на каждом промежутке нагрева и охлаждения с целью уточнения значений определяемых характеристик и корректировки процесса внешнего теплового воздействия.

С целью оценки эффективности предложенной методики на этапе модернизации разработанной ранее экспериментальной установки был проведен вычислительный эксперимент. Для этого разработан программный комплекс, реализующий итерационный вычислительный процесс.

На рисунке 6 представлены значения определяемых характеристик на каждом шаге вычислений этапа охлаждения.

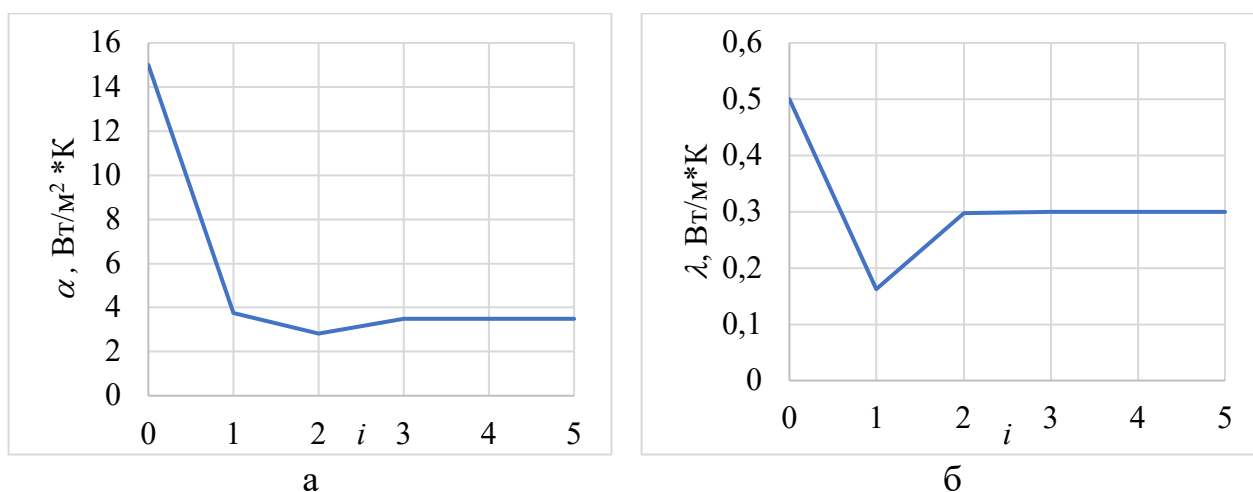


Рисунок 6. График зависимости: а – восстанавливаемого коэффициента теплоотдачи α , $\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$, б – коэффициента теплопроводности λ , $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ от номера итерации i .

На следующем шаге вычислительного эксперимента во время периодического нагрева левой поверхности образца были восстановлены

линейный коэффициент поглощения r и поглощенный тепловой поток лазера $A_s q_1$ (рис. 7).

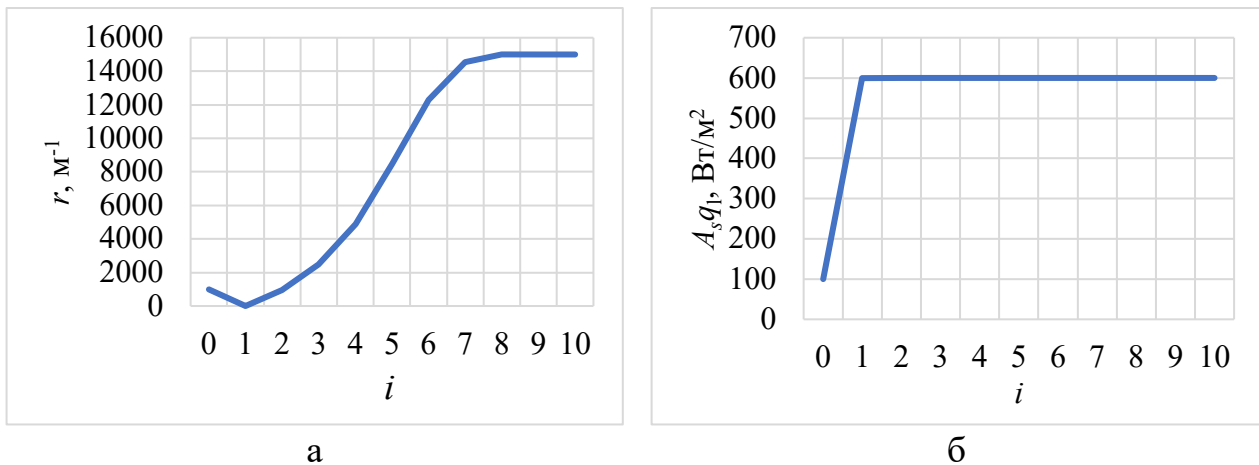


Рисунок 7. Значения: а – линейного коэффициента поглощения $r, \text{м}^{-1}$ и б – поглощенного теплового потока лазера $A_s q_1, \text{Вт}/\text{м}^2$ на каждом шаге i вычислений.

В результате применения предложенного подхода одновременно решено две задачи: в математическую модель включен новый параметр, потенциально обеспечивающий точность расчета поля температур в исследуемой системе и, в то же время, разработан способ реализации алгоритма идентификации без включения дополнительных измерительных устройств.

Пятая глава включает в себя описание процесса экспериментальной отработки метода идентификации модели теплопереноса в полупрозрачном материале, а именно: решена задача модернизации испытательного стенда, процедуры оптимального планирования эксперимента и инструментов для регистрации состояния системы в процессе исследования. Показана эффективность разработанного решения применительно к определению комплекса теплофизических и радиационно-оптических характеристик исследуемого образца.

Аналогично идентификации модели теплопереноса в непрозрачном материале, следующим этапом являлась экспериментальная отработка метода. При этом, конструкция установки была модернизирована с учетом опыта проведения предыдущих испытаний (рис. 8).

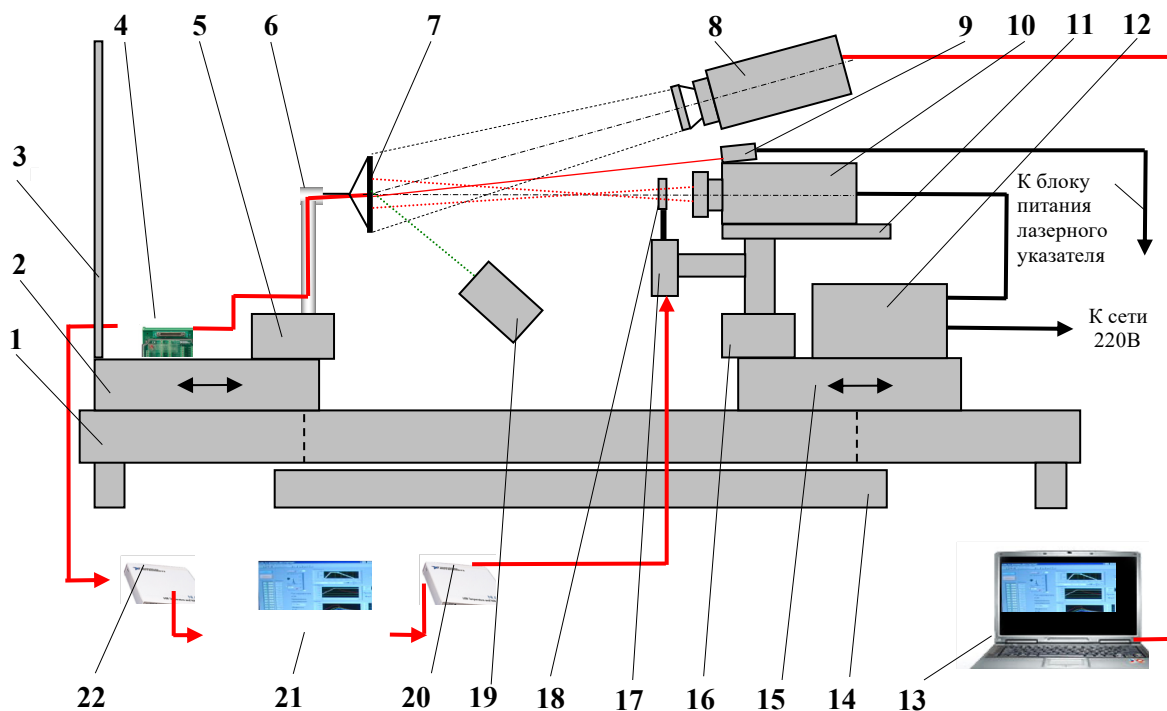


Рисунок 8. Схема установки лазерного нагрева: 1 – основание, 2 – продольная каретка образца, 3 – защитный радиационный экран, 4 – изотермический коннекторный блок TBX-68, 5 – узел регулировки в продольном направлении, 6 – державка образца, 7 – образец, 8 – тепловизионная камера FLIR SC-660, 9 – лазерный указатель, 10 – инфракрасный лазерный модуль, 11 – основание лазера, 12 – блок управления и питания лазера, 13 – контроллер мобильного измерительного узла FLIR SC660, 14 – поддон с огнеупорным материалом, 15 – продольная каретка лазера, 16 – узел регулировки в продольном направлении, 17 – электромеханический блок управления защитной шторкой, 18 – защитная шторка, 19 – инфракрасный медицинский термометр, 20 – модуль ввода-вывода NI 6020E (USB), 21 – контроллер мобильного измерительно-управляющего узла, 22 – измерительный модуль NI-4350 (USB), красным отмечены измерительные и управляющие линии, черным – линии электропитания.

В качестве источника внешнего теплового потока использовался тот же лазерный модуль. Однако, он имеет постоянную мощность излучения, которая превышает требуемые значения, необходимые для решения задач проводимых теплофизических исследований. В связи с этим штатный модуль был доработан. В частности, был разработан и изготовлен специальный электронный блок управления, позволяющий регулировать мощность лазера в сторону ее уменьшения. Кроме того, для уменьшения плотности теплового потока в пятне облучения на поверхности образца была демонтирована оптическая система фокусировки лазера.

Тепловые испытания образцов исследуемого материала проводятся в два этапа. На первом этапе проводятся пробные (отладочные) испытания, в процессе которых проверяется и настраивается экспериментальное оборудование, включая системы управления, измерения и сбора информации, а также подбираются, и отлаживаются режимы нагрева образца. Далее проводятся

штатные (зачетные) испытания, результаты которых обрабатываются и анализируются.

Итоговый эксперимент выполнялся при температуре окружающей среды 24,0 °С, температуре термостата 37,2 °С и атмосферном давлении 1,0 бар.

После начала испытаний, поверхность образца была нагрета до 45 °С и поддерживалась в диапазоне 41–45 °С путем периодического включения и выключения лазера. Результатом эксперимента является полученная зависимость температуры поверхности образца от времени, представленная на рис. 9.

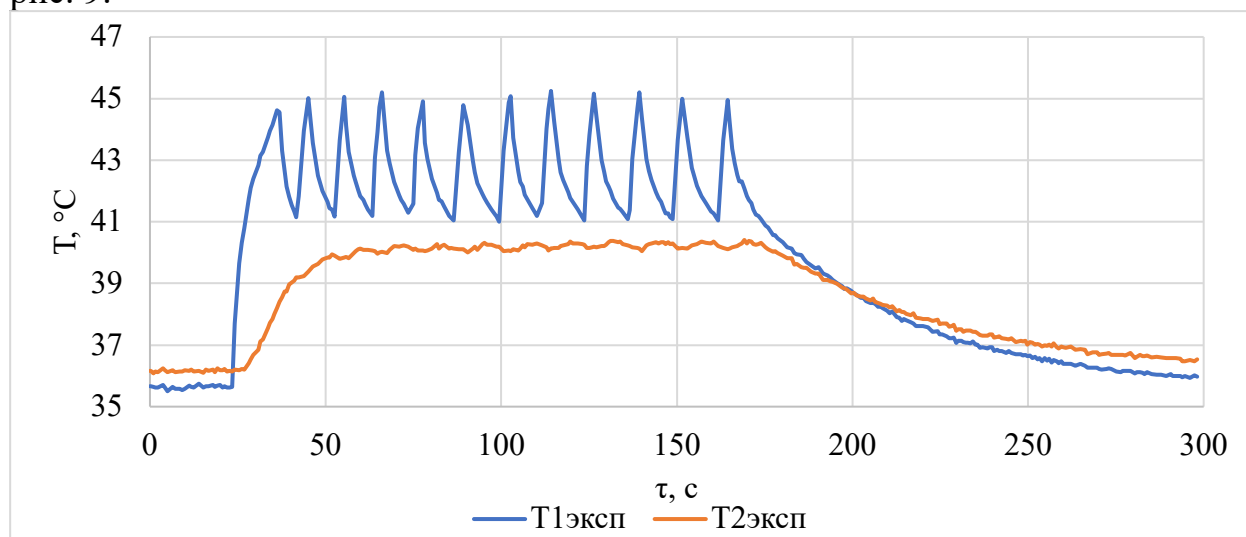


Рисунок 9. Результаты эксперимента: $T_{1\text{эксп}}$ – показания тепловизионной камеры на левой границе, $T_{2\text{эксп}}$ – термопарные измерения на правой (справочно).

Следующим шагом является применение экспериментальных данных в качестве входного массива для разработанного программного комплекса. Реализуя описанный в главе 4 подход, обрабатывая часть массива, характеризующую этап охлаждения, были восстановлены коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности (рис. 10).

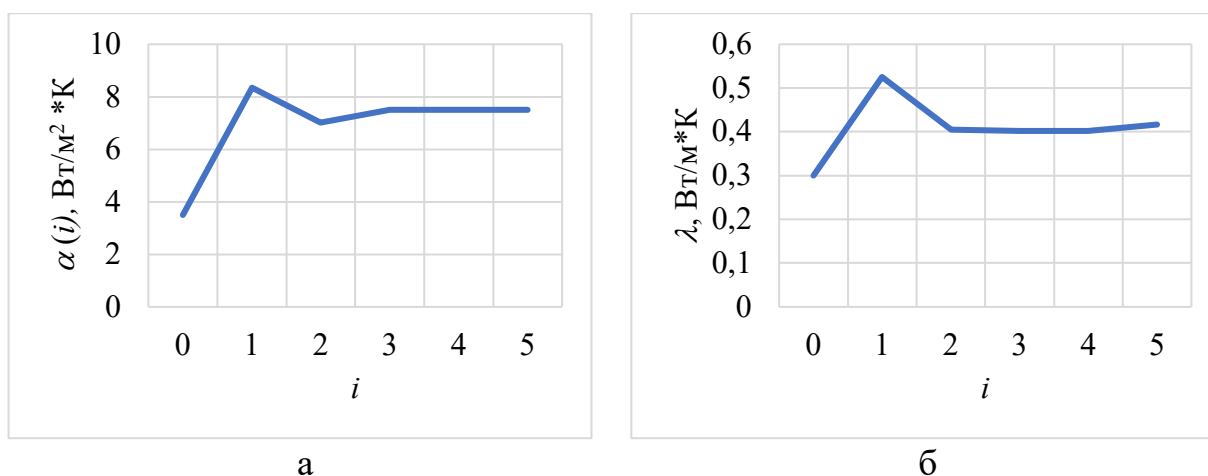


Рисунок 10. График зависимости: а – восстанавливаемого коэффициента теплоотдачи α , Вт/м²К, б – коэффициента теплопроводности λ , Вт/м*К от номера итерации i .

На этапе нагрева восстановлены значения поглощенного теплового потока $A_s q$ и линейного коэффициента поглощения r (рис. 11).

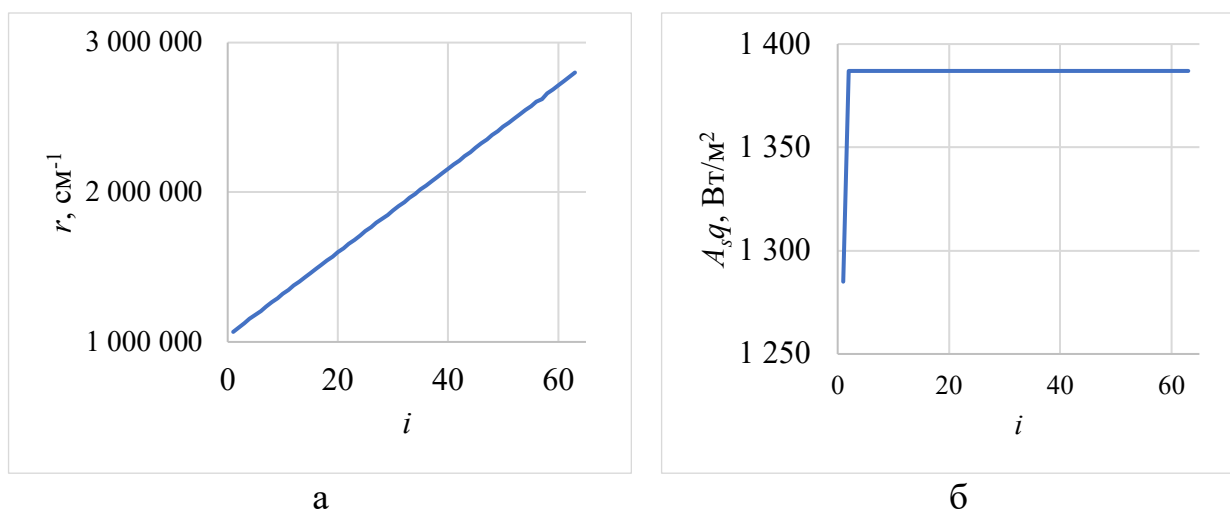


Рисунок 11. График зависимости: а – восстанавливаемого линейного коэффициента поглощения r, cm^{-1} , б – поглощенного теплового потока $A_s q, \text{W/m}^2$ от номера итерации i .

Как видно, разработанный аппаратно-программный комплекс, реализующий методику идентификации математической модели, позволяет эффективно реализовать решение обратной задачи теплопереноса применительно к конкретной прикладной задаче.

Следует отметить, что не смотря на спецификацию моделируемого теплового процесса, методика является универсальной и может быть применена для широкого спектра прикладных задач.

В результате, показана эффективность разработанного решения применительно к определению комплекса теплофизических и радиационно-оптических характеристик исследуемого образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена решению задачи идентификации математических моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса без использования контактных средств измерения температуры на основе аппарата обратных задач теплообмена. С целью конкретизации модели в качестве целевого физического процесса была выбрана лазерная гипертермия поверхностных тканей человека.

В процессе решения поставленных в исследовании задач были получены следующие результаты.

1. Разработана математическая модель нестационарного теплопереноса в полупрозрачном материале, соответствующая применяемой на практике процедуре нагрева биологических тканей;
2. Проведен анализ коэффициентов модели в части влияния неопределенности тех или иных характеристик на эффективность прогнозирования теплового процесса;

3. Разработан алгоритм решения обратной задачи теплообмена по результатам измерений температуры на облучаемой поверхности, основанный на методе итерационной регуляризации;
4. Разработан программный комплекс, реализующий предложенный алгоритм;
5. Сформированы требования к экспериментальной отработке процедуры идентификации, определены необходимые условия проведения тепловых испытаний;
6. Разработана экспериментальная установка и проведены испытания, показавшие эффективность применения разработанного алгоритма;
7. Предложен метод повышения точности расчета благодаря включению учета полупрозрачности исследуемого образца, основанный на дискретизации процесса идентификации математической модели;
8. Выполнена модернизация экспериментальной установки для обеспечения возможности проведения новых испытаний;
9. Проведена серия тепловых испытаний, по результатам которых восстановлен комплекс характеристик исследуемой системы.

В результате выполнения данной работы был сформирован комплекс методических средств идентификации математических моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса на основе аппарата обратных задач теплообмена разработан довольно простой и в то же время достаточно эффективный вариант метода итерационной регуляризации.

Результаты исследования могут быть эффективно использованы при создании перспективных средств индивидуальной защиты для авиационной и ракетно-космической техники, тепловой и атомной энергетики, криогенной техники, при выполнении бесконтактной термометрии внешних поверхностей орбитальных космических станций (внекарабельная деятельность).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (по специальности 1.3.14.):

1. Ненарокомов А.В., Семенов Д.С., Домбровский Л.А. Идентификация математических моделей теплообмена с использованием бесконтактных измерений. *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т.10. № 7-8. С. 354-360.
2. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В., Будник С.А. Идентификация математических моделей нагрева тканей без контактных измерений. Экспериментальная обработка. *Тепловые процессы в технике*. 2019. Т. 11. № 12. С. 550-555.
3. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В., Кудрявцев Н.Д. Обзор методов измерения температуры в медицине. *Тепловые процессы в технике*. 2021. Т.13. № 10. С. 467-480. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-10-467-480

В ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в базы данных системы индексирования «Scopus»:

1. D.S. Semenov, A.V. Nenarokomov, S.A. Budnik. Non-contact heat transfer models identification: Laser hyperthermia of superficial human tissues. *Journal of Physics: Conference Series*. 1683 (2020) 022011. doi:10.1088/1742-6596/1683/2/022011
2. Semenov D.S., Yatseev V.A., Akhmad E.S., Vasilev Yu.A., Sergunova K.A., Petraikin A.V. High-precision temperature measurement system for magnetic resonance imaging. *Measurement Techniques*. Vol.63. No. 5. 2020. P.401–406. DOI 10.1007/s11018-020-01801-4
3. D.S. Semenov, A.V. Nenarokomov. Non-contact heat transfer models identification for laser hyperthermia of semi-transparent materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2119 (2021) 012147. doi: 10.1088/1742-6596/2119/1/012147
4. Ненарокомов А.В., Семенов Д.С. Исследование радиационно-кондуктивного теплопереноса путем бесконтактных измерений. Идентификация математических моделей теплообмена для непрозрачных материалов. *Инженерно-физический журнал*. 2021. Т. 94. №6. С.1458–1464.
5. A.V. Nenarokomov, D.S. Semenov. Investigation of radiative-conductive heat transfer by noncontact measurements. Identification of mathematical models of heat transfer for nontransparent materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 94, No. 6, November, 2021. P.1425–1431. DOI 10.1007/s10891-021-02422-6

В ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по другим специальностям:

1. Семенов Д.С., Сергунова К.А., Ахмад Е.С., Петрайкин А.В., Васильев Ю.А., Яцеев В.А. Оценка нагрева металлоконструкций при проведении магнитно-резонансной томографии // *Радиология–практика*. 2019. №3 (75). С. 30–40.
2. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В., Домбровский Л.А. Идентификация математических моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса с использованием бесконтактных методов измерения температуры применительно к лазерной гипертермии поверхностных опухолей. *Медицинская физика*. 2019. №1(81). С. 57-58.

3. Семенов Д.С., Яцеев В.А., Ахмад Е.С., Васильев Ю.А., Сергунова К.А., Петрайкин А.В. Высокоточная система измерений температуры для магнитно-резонансной томографии. Измерительная техника. №5. 2020. С.66–71.
4. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В. Методика выбора оптимального режима лазерной гипертермии поверхностных тканей // Медицинская физика. 2021. №1 (89). С. 46–47.

В материалах научных конференций:

1. Ненарокомов А.В., Семенов Д.С., Домбровский Л.А. Идентификация математических моделей теплопереноса без внутренних измерений температуры. Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену в 3х томах. Издательский дом МЭИ. 2018. С.159-161.
2. Ненарокомов А.В., Семенов Д.С. Идентификация моделей радиационно-кондуктивного теплопереноса применительно к лазерной гипертермии поверхностных тканей. Современные проблемы теплофизики и энергетики (19–23 октября 2020): материалы III международной конференции – М.: Издательство МЭИ, 2020. – 708 с. С.208–209.
3. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В. Идентификация моделей теплопереноса в полупрозрачных материалах без использования контактных измерений. XXXXVII Сибирский теплофизический семинар. Тезисы докладов. С.228.
4. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В., Будник С.А. Расчетно-экспериментальный метод идентификации математических моделей переноса тепла при лазерной гипертермии поверхностных тканей с использованием бесконтактных измерений. 2021. XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений. С.1256–1259.
5. Семенов Д.С., Ненарокомов А.В. Расчетно-экспериментальный метод идентификации моделей теплопереноса без использования контактных средств измерения температуры. XXXXVIII Сибирский теплофизический семинар. Тезисы докладов. С.224