

Отзыв официального оппонента на диссертацию

Япаровой Натальи Михайловны

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

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)

Актуальность работы

В современных наукоёмких технологиях, связанных с теплопереносом, особое внимание уделяется выбору параметров режима внешнего теплового воздействия на объект, оказывающего существенное влияние на формируемые теплофизические характеристики конечного продукта. Контроль теплового состояния объекта, подвергаемого внешнему тепловому воздействию, опирается на методы обработки температурных измерений, получаемых от датчиков, расположенных вблизи его поверхности. Алгоритмы определения нестационарных температурных полей внутри объекта по результатам граничных измерений разрабатываются на основе методов решения обратных задач, суть которых заключается в определении искомым физических характеристик из результатов косвенных измерений. При разработке алгоритмов необходимо учитывать, что измеренные величины содержат отклонения от истинных значений, а специфика обратных задач заключается в том, что при применении классических методов малые отклонения в исходных данных приводят к значительному искажению конечного результата. Таким образом, для повышения эффективности технологического процесса и оптимизации режимов теплового воздействия необходимо разрабатывать методы, обеспечивающие достаточный уровень соответствия результатов обработки измерений истинному тепловому состоянию тела. В этой связи разработка и адаптация алгоритмов и методов обработки информации, позволяющих по результатам граничных измерений определять нестационарные температурные поля внутри объекта, является актуальным направлением в области обработки данных.

Существенная особенность многих технологических процессов, связанных с задачами теплопереноса, заключается в том, что к моменту начала этих процессов внутри тела накапливается остаточное тепло. Это приводит к возникновению различий между температурами на поверхности и внутри тела, которые невозможно измерить без нарушения его целостности. К таким процессам относятся комплексная термообработка, вторичная термообработка при непрерывной разливки стали, осуществление теплового контроля работающего двигателя. В настоящее время методы обработки данных, применяемые в системах теплового контроля, основаны на математических моделях с известными начальными условиями. В результате, возникает проблема неизвестных начальных условий, препятствующая применению существующих методик определения теплового состояния тела по результатам граничных измерений. Разработка методов и алгоритмов обработки граничных измерений, используемых для определения теплового состояния объекта с неизвестной начальной температурой позволит решить важнейшую

проблему идентификации теплового состояния тела в условиях неполных и динамически изменяющихся данных.

Диссертационная работа Япаровой Натальи Михайловны посвящена разработке и исследованию точности методов определения теплового состояния объекта по результатам обработки граничных измерений, в том числе в условиях неполных исходных данных, и связана с развитием актуального научного направления в области системного анализа и обработки информации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Выносимые на защиту интегральные модели теплопереноса и идентификации внутреннего теплового источника основаны на использовании фундаментальных законов механики сплошных сред, математического аппарата дифференциального и интегрального исчисления, современных методов вычислительной математики и теории регуляризации решения обратных задач. Математическая модель зависимости температуры от сопротивлений, предложенная в работе, опирается на межгосударственные стандарты по обеспечению единства измерений для термопреобразователей и основные положения теории обратных задач. Системный анализ, примененный для построения интегральных моделей и модели зависимости температуры от сопротивлений, позволил формализовать явную зависимость искомых температурных полей и тепловых функций от результатов измерений.

Предложенные алгоритмы и методы определения температурных полей и идентификации теплового источника в теле с известным начальным тепловым состоянием основаны на конечных интегральных представлениях и методах регуляризации. Точность и устойчивость этих методов обоснованы результатами имитационного моделирования и экспериментальными исследованиями.

Алгоритмы и методы определения температурных полей в теле с неизвестным начальным тепловым состоянием, предложенные в работе, основаны на конечно-разностных аппроксимациях и регуляризирующих подходах. Использование математического аппарата вычислительной математики, теории разностных схем и теории регуляризации позволило провести исследование устойчивости и сходимости построенных методов и получить теоретические оценки точности предложенных методов. Эти оценки согласуются с результатами сравнительного анализа, полученными при проведении экспериментальных исследований.

Построение и обоснование метода идентификации параметров математической модели зависимости температуры от сопротивлений опирается на математический аппарат вычислительной алгебры и основные подходы, используемые в теории обратных задач. Предложенные методы определения температур и критерии оценки качества и точности первичных измерений опираются на идеи концептуального подхода к оценке качества измерений и подтверждаются результатами экспериментального исследования.

Научная новизна и достоверность результатов исследования

Научная новизна результатов, полученных в диссертационном исследовании заключается в следующем. В диссертационной работе:

1) созданы интегральные модели теплопереноса во внутренних точках и идентификации внутреннего теплового состояния объекта с известной начальной температурой, характеризующие явную зависимость искомых тепловых функций от измеренных значений, а также предложены методы определения искомых тепловых функций по результатам граничных измерений;

2) разработан подход к решению проблемы идентификации теплового состояния тела в условиях неполных исходных данных. Автором впервые разработаны и реализованы методы прогнозирования температуры во внутренних точках объекта при линейном и нелинейном теплопереносах в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием, подвергаемому внешнему тепловому воздействию, найдены условия устойчивости и получены оценки отклонений найденных температур от искомых значений;

3) разработана математическая модель, характеризующая явную зависимость температуры от измеренных значений электрических сопротивлений, единая относительно температурного диапазона и термометров сопротивления, изготовленных из различных металлов, предложены и реализованы методы определения температуры и алгоритмы оценки точности и качества температурных измерений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в исследовании, подтверждается корректным использованием основных положений системного анализа и теории теплопереноса, теории обратных задач, математического аппарата конечно-разностных схем и конечных интегральных представлений, а также вычислительных методов решения систем линейных и нелинейных уравнений. Достоверность и обоснованность результатов исследования также подтверждается результатами имитационного моделирования и экспериментальных исследований, апробацией на конгрессах и конференциях и опубликованными работами.

Теоретическая и практическая значимости результатов исследования

В работе созданы новые модели, представленные интегральными уравнениями, характеризующим явную зависимость искомых температур или функций внутреннего источника от результатов измерений, выполненных вблизи поверхности. В работе впервые предложены методы решения линейных и нелинейных обратных задач с неизвестными начальными условиями, служащие основой для разработки вычислительных схем определения температурных полей внутри тела с неизвестным начальным тепловым состоянием. Получены теоретические оценки точности этих методов. В диссертационном исследовании построена новая математическая модель зависимости температуры от сопротивлений, сформированы методы определения температур по результатам обработки измерений сопротивлений и впервые представлены алгоритмы, позволяющие проводить качественную оценку результатов измерений.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования определяется тем, что его основные положения, предложенные модели, методы и алгоритмы создают основу для создания единого комплекса методов обработки данных, включающих как методы определения нестационарных температурных полей в условиях динамически изменяющихся исходных данных, так и методы обработки первичных измерений, а также вычислительные алгоритмы оценки точности и качества результатов первичных

измерений, полученных непосредственно от средств измерения. Полученные результаты могут быть использованы при выработке рекомендаций по выбору и регулированию настраиваемых параметров температурных режимов, при формировании и оптимизации технического регламента технологических процессов, связанных с теплопереносом. Представленные в Приложениях документы о внедрении результатов исследования подтверждают применимость на практике предложенных в диссертации научных положений и разработок.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и 10 приложений. Общий объем работы составляет 333 страницы, список литературы включает 245 наименований.

Первая глава посвящена анализу проблемы обработки результатов измерений в системах контроля и прогнозирования нестационарных температурных полей. 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.

Во *второй главе* предложен новый подход к определению температурных полей, формируемых под влиянием внешнего теплового воздействия в телах с известным начальным тепловым состоянием. В разделе рассмотрена проблема определения температуры внутри однородного тела и проблема идентификации неизвестного внутреннего теплового источника. Для решения поставленных задач автором разработан единый подход, заключающийся в переходе от исходной обратной задачи теплопроводности к интегральным уравнениям. В качестве инструмента реализации разработанной концепции предлагаются вычислительные схемы, которые включают использование стабилизирующих функционалов, обеспечивающих устойчивость вычислительных алгоритмов относительно погрешности исходных данных. Данные схемы служат основой для разработки методов обработки данных, поступающих от средств измерения с фиксированным временным интервалом.

В *третьей главе* рассмотрена проблема прогнозирования внутренних температурных полей, формируемых под влиянием внешнего теплового воздействия в теле с неизвестным начальным тепловым состоянием. В работе впервые предложена вычислительная схема, основанная на конечно-разностных уравнениях с введенным стабилизирующим функционалом, позволяющая определять искомые распределения температуры при изменяющихся теплофизических характеристиках в линейных и двумерных объектах. Найдены условия, гарантирующие устойчивость вычислительных схем. Получены теоретические оценки погрешностей приближенных решений обратных задач с неизвестными начальными условиями, согласующиеся с результатами вычислительного эксперимента, проводимого с целью получения оценок наибольших температурных отклонений. Результаты экспериментов свидетельствуют о достаточной эффективности и точности предложенных методов.

Четвертая глава посвящена разработке метода определения температуры внутри тела с неизвестным начальным тепловым состоянием в ситуации, когда изменения основных теплофизических свойств материала определяются в зависимости от изменений температуры. В работе впервые предложены методы определения температуры по результатам граничных измерений для осесимметричных постановок задач распространения тепла в кольцевом и полном цилиндрах. Вычислительные схемы являются явными и включают стабилизирующий функционал. Автором найдены условия, гарантирующие устойчивость вычислительных схем относительно погрешности исходных данных, получены теоретические оценки точности приближенных решений нелинейных обратных задач, а также найдены экспериментальные оценки отклонений прогнозируемых температур от действительных значений. Эффективность и точность предложенных вычислительных алгоритмов подтверждается результатами обработки экспериментальных данных. Это позволяет заключить, что разработанные методы определения температур в теле с неизвестным начальным тепловым состоянием могут быть с успехом применены для совершенствования технологического процесса термообработки на промышленных предприятиях.

В *пятой главе* рассмотрена проблема определения температуры из результатов обработки информации о первичных измерениях, полученных от термопреобразователей, изготовленных из различных металлов. В работе предложена новая математическая модель зависимости температуры от сопротивлений. Разработан метод идентификации параметров этой модели и доказана его оптимальность по порядку при использовании измерений, уровень погрешности которых находится в пределах, установленных на этапе калибровки. В работе предложены методы определения температур по результатам обработки первичных измерений, используемые как на этапе калибровки, так и на этапе эксплуатации. В диссертационном исследовании автором впервые представлены алгоритмы оценки точности измерений, апробированные на экспериментальных данных. Результаты экспериментов приводят к выводу о том, что построенный метод позволяет на этапе эксплуатации определять температурные значения с точностью, отражающей характер и уровень отклонений измеренных сопротивлений, а алгоритмы оценки точности измерений могут служить основой для формирования функции самоконтроля в интеллектуальных средствах измерения.

В диссертации имеются сведения о практическом использовании результатов, полученных автором, а также свидетельства о государственной регистрации программ на ЭВМ. Представленный материал будет полезен специалистам в области анализа данных и интеллектуализации производственных процессов.

Основные научные результаты Япаровой Н.М. по теме исследования изложены в 15 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 10 публикациях в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science, а также в публикациях по материалам международных конгрессов и в статьях в сборниках научных трудов конференций.

Автореферат и публикации автора соответствуют содержанию диссертации.

Высоко оценивая диссертационную работу в целом, хочу отметить следующие недостатки:

1. Интегральные уравнения, полученные во второй главе, относятся к классу уравнений Вольтерра, для которых разработаны численные методы, обладающие эффектом саморегуляризации. Автор предлагает методы, включающие использование стабилизирующих аддитивных функционалов, но при этом не обосновывает причины своего выбора.

2. В результатах вычислительного эксперимента, связанного с ретроспективной задачей теплопереноса в пространственном объекте (стр. 156, 209), Автор использует термины «нормированные переменные» и «нормированные функции», которые следовало бы заменить на «масштабированные», так как они более соответствуют сути проведенных операций, а также следовало бы в разделе 3.3.2.5 привести формулы, определяющие правила масштабирования переменных и функций.

3. В четвертой главе для задач нелинейного теплопереноса в кольцевом и полном цилиндрах Автором получены теоретические оценки наибольших отклонений вычисленных температур от действительных значений и по сути являются одинаковыми. Следовало бы окончательную формулировку оценок также привести к единому виду (стр. 192, 205).

4. В пятой главе предложен метод обработки результатов измерений для определения температур на этапе калибровки (стр.262), но в работе не сформулированы рекомендации по количеству измерений, необходимому для обеспечения точности калибровки.

5. Несмотря на то, что изложение результатов исследования проведено последовательно и логично, а представленные модели и формулы корректны, в тексте имеются досадные опечатки (стр.4, 50, 267).

Высказанные замечания носят, в основном, рекомендательный характер и не снижают высокой положительной оценки проведенного автором исследования.

Заключение

Диссертация Натальи Михайловны Япаровой представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. В работе представлено решение важной проблемы – формирование комплексного подхода и разработка методов прогнозирования нестационарных температурных полей внутри объекта по результатам граничных измерений, в том числе для объектов с неизвестным начальным тепловым состоянием, служащих основой для идентификации теплового состояния тела в условиях неполных и динамически изменяющихся данных.

Оценивая работу в целом, следует отметить, что все представленные в работе модели и формулы вполне корректны, а общие выводы по работе и выводы по главам диссертационного исследования логичны и обоснованы и позволяют утверждать, что соискателем проведено целостное и завершённое научное исследование, обладающее научной новизной и практической значимостью.

На основании вышесказанного считаю, что диссертационная работа Япаровой Натальи Михайловны «Методы и алгоритмы обработки информации в системах контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динамически

изменяющихся данных» соответствует требованиям п.9, п.10, п.11, п.13 и п. 14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а автор диссертации Наталья Михайловна Япарова достойна присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность).

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, профессор

Василий Иванович Васильев

«7» сентября 2020 года.

Василий Иванович Васильев:

доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, заведующий кафедрой «Вычислительные технологии» «Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»
677000, г. Якутск, ул. Кулаковского, 42, каб. 247а,

Телефон: +79245997282

e-mail: vasvasil@mail.ru

Подпись В.И. Васильева и сведения заверяю

Ученый секретарь «Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», к.ф.-м.н.



Шарин Евгений Федорович