

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Япаровой Натальи Михайловны:
«Методы и алгоритмы обработки информации в системах контроля и прогнозирования процессов теплопереноса в условиях неполных и динамически изменяющихся данных», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)

Актуальность темы исследования

Разработка и реализация успешной стратегии развития и управления промышленными производствами, связанными с переносом и использованием тепловой энергии, сопряжена с обновлением и оптимизацией технологических процессов. Приоритетным направлением в области создания и развития современных производственных комплексов, отвечающих мировым вызовам, является цифровизация. Повышение требований к качеству конечного продукта и строгому соблюдению выбранного режима теплового воздействия на технологический объект требует разработки новых методов и алгоритмов обработки данных о тепловом состоянии объекта, учитывающих специфику технической реализации систем теплового контроля. Важная особенность систем контроля заключается в том, что датчики, используемые для измерения температуры, могут быть расположены только вблизи поверхности контролируемого объекта и прогнозирование температурных полей внутри объекта осуществляется по результатам косвенных измерений. Необходимо особо отметить, что точность определения теплового состояния объекта напрямую зависит от устойчивости методов обработки информации относительно шумов, неизбежно присутствующих в результатах измерений. Проблема обработки неточных исходных приобретает критические масштабы в ситуации, когда при определении внутренних температурных полей отсутствует априорная информация о первоначальном тепловом состоянии объекта, подвергаемого внешнему тепловому воздействию, так как в этом случае невозможно адаптировать существующие методы определения температур для цифровизации технологических процессов (для систем контроля и прогнозирования). Проблема неполных исходных данных обуславливается тем, что вычислительные схемы методов либо построены относительно переменной, характеризующей время, и опираются на информацию о начальном тепловом состоянии, либо включают переход к вспомогательным задачам и проведение расчетов с помощью этих методов требует высокой научной квалификации исполнителя.

Изложенные выше проблемы полностью свидетельствуют об актуальности и востребованности исследований, связанных с созданием методов и алгоритмов обработки информации, позволяющих снизить негативное влияние неточных, а также неполных исходных данных на результаты расчетов.

В работе Япаровой Натальи Михайловны предложены и исследованы методы определения нестационарных температурных полей объекта по зашумленным исходным данным, полученным вблизи его поверхности, а также разработаны новые алгоритмы решения задач теплопереноса с неизвестными начальными условиями, служащие основой решения важнейшей проблемы прогнозирования нестационарных температурных полей в условиях неполных и динамически изменяющихся исходных данных в объекте, подвергаемом внешнему тепловому воздействию.

Научная новизна, степень обоснованности и достоверность результатов работы

В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1) создан единый подход к построению метода прогнозирования температуры в контрольных точках однородного объекта и метода идентификации внутреннего теплового источника в объекте с известной начальной температурой: построены

математические модели, представленные интегральными уравнениями, устанавливающими явную зависимость искомых тепловых функций от параметров внешнего теплового режима, поддерживаемого на границе объекта. В работе предложены методы решения интегральных уравнений, включающие использование регуляризирующих функционалов, что обеспечивает устойчивость методов относительно погрешности исходных данных при фиксированном интервала измерений по времени;

2) впервые разработаны вычислительные схемы, позволяющие определять нестационарные температурные поля, формируемые во внутренних точках объекта под влиянием выбранного режима теплового воздействия на его поверхность в ситуации, когда начальная температура объекта неизвестна. Найдены условия, гарантирующие устойчивость вычислительных схем методов относительно погрешности исходных данных, и получены теоретические и экспериментальные оценки отклонений найденных температур от действительных значений;

3) для осесимметричных задач теплопереноса в объекте с неизвестным начальным тепловым состоянием впервые предложен метод, позволяющий определять температуру его внутренних точек в ситуации, когда теплофизические характеристики материала зависят от температуры. Найдены условия, обеспечивающие устойчивость вычислительных схем, а также получены оценки отклонений вычисляемых температур от действительных значений, подтвержденные результатами обработки экспериментальных данных.

4) предложен метод формирования температурных значений вблизи поверхности объекта из результатов первичных измерений. Получаемые температуры составляют основу для исходных данных в алгоритмах определения внутренних температурных полей. В работе предложена единая математическая модель явной зависимости температуры от значений электрических сопротивлений, полученных от преобразователей температуры, чувствительные элементы которых изготовлены из различных материалов и позволяют определять температуру в произвольном диапазоне. Предложен метод идентификации параметров математической модели, разработаны методы определения температуры, опирающиеся на эту модель, а также впервые представлены численные алгоритмы оценки качества измерений.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается корректным использованием основ системного анализа, теории теплопереноса, математического аппарата теории обратных задач, операционного исчисления, численных методов, теории управления и оптимизации, результатами имитационного моделирования и экспериментальных исследований. Результаты работы не противоречат принятым российским стандартам (ГОСТ 6651-2009, ГОСТ Р 8.825-2013) в области обеспечения единства измерений для термопреобразователей сопротивления и интеллектуальных средств измерения, а также международным стандартам (IEC 60751).

Достоверность полученных результатов также подтверждается свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, использованием предложенных методов и алгоритмов для анализа и обработки результатов температурных измерений и эффективным внедрением научных положений диссертационного исследования в практику деятельности ряда промышленных предприятий.

Основные научные результаты Япаровой Н.М. по теме исследования представлены в 15 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, в 10 публикациях в изданиях, включенных в базы Scopus и Web of Science, а также в публикациях по материалам международных конгрессов и научных конференций.

Теоретическая значимость результатов исследования

В работе созданы новые интегральные модели процесса теплообменных процессов в объекте, подвергаемом внешнему тепловому воздействию, позволяющие определять температуру в контрольной точке, а в случае неоднородности теплопереноса идентифицировать внутренний тепловой источник по зашумленным данным, полученным вблизи поверхности объекта. В работе впервые предложены методы решения обратных задач теплопереноса с неизвестными начальными условиями, служащие основой для разработки явных вычислительных схем определения температурных полей внутри тела с неизвестным начальным тепловым состоянием, поверхность которого подвергается внешнему тепловому воздействию. Найдены условия, обеспечивающие устойчивость вычислительных схем и получены теоретические оценки наибольших температурных отклонений. В диссертационном исследовании предложен единый подход к определению температуры по результатам первичных измерений, выполненных с помощью термопреобразователей сопротивления, чувствительные элементы которых изготовлены из различных металлов. Создана математическая модель зависимости температуры от сопротивлений, разработан метод идентификации параметров модели и алгоритмы обработки результатов измерений сопротивлений, используемые для вычисления температур на этапах калибровки и эксплуатации. В работе впервые предложены алгоритмы, позволяющие проводить качественную оценку результатов измерений.

Практическая значимость

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке моделей теплопереноса, методов и алгоритмов определения нестационарных температурных полей, в том числе в условиях неполных исходных данных, служащих основой для методов обработки результатов косвенных измерений, реализуемых в системах контроля и прогнозирования теплового состояния заготовок, различных ключевых узлов оборудования, а также для выбора и корректировки тепловых режимов термообработки, позволяющих формировать желаемое температурное поле внутри объектов. Предложенные алгоритмы оценки точности и качества результатов первичных измерений имеют широкие перспективы применения в области самодиагностики и создания интеллектуальных средств измерения. Практическая значимость предложенных в диссертации научных положений и разработок подтверждается свидетельствами о регистрации программных продуктов и документами о внедрении результатов исследования, представленными в приложениях.

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.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, а также приведены сведения о публикациях, апробации и реализации результатов исследования.

В первой главе проведен анализ проблемы обработки результатов косвенных измерений, получаемых от систем контроля АСУТП и служащих основой для определения нестационарных температурных полей в объектах, подвергаемых внешнему тепловому воздействию. Особое внимание уделено анализу проблемы определения внутренних нестационарных температурных полей при неполных исходных данных, когда прогнозирование температур осуществляется по результатам поверхностных температурных измерений, содержащих отклонения от действительных значений и

отсутствует информация о начальном тепловом состоянии объекта. Проведенный анализ позволили выявить специфические особенности расположения средств измерения и технологических процессов, приводящих к решению обратных задач и требующие разработки новых методов обработки информации. В первой главе также проведен анализ проблемы обработки первичных измерений, полученных с помощью термометров сопротивлений и связанной с формированием оценки уровня точности и качества измерений. Обоснована необходимость создания новой общей для всех диапазонов и материалов методики расчета температур, позволяющей выделить параметры, необходимые для формирования алгоритмов оценки качества измерения. В главе представлена предметная область, сформулированы цель и основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена методам обработки информации в задачах линейного теплопереноса в объектах с известным начальным тепловым состоянием, подвергаемым внешнему тепловому воздействию. В работе созданы интегральные модели теплопереноса в однородном теле и идентификации внутреннего теплового источника в неоднородном теле. Автором предложен единый подход к построению моделей, опирающийся на системный анализ зависимости искомых тепловых функций от параметров режима внешнего теплового воздействия. Вывод интегральных уравнений основывается на использовании операционного исчисления и последующей регуляризации, что является принципиальным отличием от существующих методик. В работе также предложены методы решения полученных интегральных уравнений, включающие использование аддитивного стабилизирующего функционала. Разработанные вычислительные алгоритмы позволяют повысить точность прогнозирования температурных полей и могут служить основой для выбора параметров режима внешнего теплового воздействия уже на этапе компьютерного моделирования технологического процесса.

Третья глава посвящена проблеме определения внутренних нестационарных температурных полей по результатам поверхностных температурных измерений, содержащих шум, в ситуации, когда информации о начальном тепловом состоянии внутри объекта отсутствует, а основные теплофизические характеристики изменяются относительно пространства и времени. Автором выявлены особенности технологических процессов, порождающие проблему неполных данных. В работе предложены явные вычислительные схемы, основанные на конечно-разностных аналогах уравнения теплопроводности и позволяющие определять температуру относительно пространственной переменной. Такой подход к построению вычислительной процедуры предложен впервые. Автором исследована устойчивость схемы и получены теоретические оценки погрешности метода. Эффективность метода подтверждается результатами имитационного моделирования, также представленными в работе. Предложенные методы позволяют найти решение проблемы неизвестных начальных условий и получать искомые температурные значения с достаточным уровнем точности.

В *четвертой главе* разработаны методы определения температуры внутри тела с неизвестным начальным тепловым состоянием в ситуации, когда изменения основных теплофизических свойств материала зависят от изменений температуры. Вычислительные схемы созданы для осесимметричных задач теплопереноса, являются явными относительно пространственной переменной и включает регуляризацию соотношений, используемых для вычисления теплофизических характеристик. Автором обоснована локальная устойчивость вычислительной схемы, найдены теоретические оценки погрешностей методов. Результатами обработки экспериментальных данных и подтверждают надежность и достаточную точность созданных вычислительных

алгоритмов и позволяют сделать вывод о перспективности разработанных методов для практического применения на промышленных предприятиях.

В *пятой главе* предложены методы определения температуры по результатам обработки измерений сопротивлений, служащих основой для разработки алгоритмов обработки информации на этапах калибровки и эксплуатации, а также алгоритмов оценки качества и точности измерений, позволяющих реализовывать функцию самодиагностики в интеллектуальных средствах измерения. Автор предлагает проводить оценку качества измерений на основе избыточной информации, для получения которой использует средства измерения с чувствительными элементами, изготовленными из различных металлов. Основой методов определения температуры служит математическая модель, предложенная автором и опирающаяся на анализ зависимости температуры от сопротивлений. В работе создан метод идентификации параметров модели, реализуемый на этапе калибровки, и обоснована его оптимальность по порядку. Методы определения температуры и алгоритмы оценки точности и качества измерений были апробированы на экспериментальных данных. Результаты апробации свидетельствуют о том, что построенные алгоритмы позволяют осуществлять количественную оценку точности определения температур по результатам первичных измерений на этапе эксплуатации и осуществлять численную реализацию концепций, являющихся основой для оценки качества измерений и диагностики состояния средства измерения.

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

Замечания по диссертационной работе:

1. В п. 1.3 диссертации (стр. 30) утверждается, что источником информации для диагностики состояния технологического процесса, контроля за соблюдением выбранного внешнего управляющего режима и прогнозирования теплового состояния объекта, подвергаемого тепловому воздействию, служат измерения температур. В действительности, в реальных технологических процессах часто измеряют другие параметры – расходы воды, подаваемой на поверхность сляба в МНЛЗ, расходы газа в зонах нагревательных печей и т.п., и на основе этих данных определяют условия теплообмена на поверхности изучаемого объекта (сляба, заготовки). Например, на МНЛЗ, особенно в зоне вторичного охлаждения, невозможно в каждой точке поверхности сляба измерить температуру, которая в реальных условиях (из-за контакта с роликами, струями воды) может колебаться по ширине и длине сляба на десятки и сотни градусов.

2. В диссертации для решения довольно простой одномерной задачи теплопроводности (2.30) (стр. 63) предлагается использовать довольно громоздкий интегральный метод с прямым и обратным преобразованием Лапласа, и численным методом решения (2.41) (стр. 67). Не проще ли сразу решить данную задачу численным методом, например, методом конечных разностей, тем более что, в п. 2.3.4 (стр. 74) проводится верификация интегрального метода в вычислительном эксперименте, проводимом на основе имитационного моделирования, которое проводится численно методом конечных разностей и получаемое решение принимается за «точное», с которым и сравнивается решение, полученное сложным интегральным методом. То есть, более простой численный метод принимается за более «точный», чем предлагаемый сложный интегральный метод решения? То же самое относится к задаче, решаемой в п. 2.4 диссертации (стр. 82). Кроме того, интегральный метод, по-видимому, можно применить только для одномерных задач теплопроводности, но не для двухмерных и трехмерных задач, имеющих большое значение для практики.

3. В п. 3.2 диссертации (стр. 115) рассматриваются математические модели задач измерения, связанных с технологическими процессами теплопереноса в объектах с неизвестным начальным тепловым состоянием, и в качестве примера взято формирование сляба из жидкого металла на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В действительности, начальная температура жидкого металла, подаваемого в кристаллизатор МНЛЗ, как правило, известна, так как она находится в достаточно узком диапазоне (например, 1530-1560 °С), и ее периодически измеряют с помощью одноразовых термопар. Поэтому, начальное тепловое состояние сляба (точнее жидкого металла) как правило, является известным.

4. Математическая модель задачи измерения, связанной с процессом теплопереноса внутри сляба, содержащего твердую и жидкую фазу, представленная выражениями (3.13) и (3.14) в диссертации (стр. 117), является весьма упрощенной. Во-первых, уравнение (3.13) описывает температурное поле только в твердой фазе, а теплоперенос в жидкой фазе, который происходит путем конвекции и теплопроводности, никак не учитывается. Скорость изменения положения границы раздела между жидкой и твердой фазами $\Pi(t)$ зависит от градиентов температур вблизи этой границы в твердой и жидкой фазе, и от теплоты фазового перехода, выделяющейся при затвердевании металла, которая в задаче никак не фигурирует. Температуру T_h на границе не нужно поддерживать за счет теплообмена, так как это температура фазового перехода, и поддерживается сама собой. Кроме того, за счет теплообмена на поверхности сляба можно лишь в начальные моменты времени, когда величина $\Pi(t)$ довольно мала, значительно повлиять на положение границы $\Pi(t)$. При достаточно большой величине $\Pi(t)$ ее рост является довольно инерционным, и теплообмен на поверхности сляба в гораздо меньшей степени влияет на рост величины $\Pi(t)$. В практических задачах при разливке металла на МНЛЗ стараются выдержать заданное изменение температуры поверхности сляба вдоль технологической оси, а не изменение положения границы $\Pi(t)$. Кроме того, при разливке не чистых металлов, а, например, сталей, затвердевание металла происходит в некотором диапазоне температур, поэтому нельзя строго зафиксировать положение границы $\Pi(t)$.

5. В уравнении (3.23) диссертации (стр. 121), описывающем температурное поле заготовки при вторичной термической обработке при горячей прокатке, входит коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к затвердевшей оболочке $\gamma(x,y,t)$. Обычно, при термической обработке металл находится в твердом состоянии, и там не нужно задавать коэффициент теплоотдачи от жидкого металла к твердой оболочке. Кроме того, коэффициент $\gamma(x,y,t)$ в уравнении (3.23) является совершенно неуместным, так коэффициент теплоотдачи обычно входит в граничные условия на поверхности тела (или поверхности раздела), а не в уравнение теплопроводности, которым является выражение (3.23).

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, ее научной новизны и практической значимости. Автореферат и публикации автора соответствуют содержанию диссертации.

Заключение

Диссертация Натальи Михайловны Япаровой представляет собой законченное научное исследование, направленное на решение важной проблемы – создание методов обработки информации в области прогнозирования нестационарных температурных полей в условиях неполных и динамически изменяющихся данных системы в объектах, подвергаемых внешнему тепловому воздействию. Основные результаты, представленные в диссертации, полностью соответствуют поставленным целям и задачам работы, являются новыми, имеют теоретическую и практическую значимость в области анализа

