

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)» д. т. н., профессор  
Равикович Юрий Александрович

«12» апреля 2019 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва на диссертационную работу Дилигенской А.Н. на тему «Методы идентификации, анализ и синтез алгоритмов последовательной параметрической оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)

## **1. Актуальность темы выполненной работы**

Разработка методов и алгоритмов решения обратных задач математической физики применительно к различным видам и моделям тепло- и массообмена в настоящее время является теоретической основой новых технологий идентификации и диагностики широкого круга технологических процессов, сопровождающихся процессами нестационарной теплопроводности.

Актуальная проблема повышения точности исследования теплообменных процессов, тепловых режимов и характеристик используемых материалов и конструкций, в первую очередь, может быть решена за счет повышения точности результатов теплотехнических расчетов, что напрямую определяется правильным выбором математических моделей теплообменных процессов и достоверным заданием исходной информации, включающей функции, образующие начальные и граничные условия, значения теплофизических параметров и характеристик, и т.д. Эффективное решение задач идентификации математических моделей теплофизических процессов при использовании результатов наблюдений за ними может базироваться на методологии решения обратных задач математической физики.

Методы решения некорректно поставленных обратных задач теплообмена на сегодняшний день являются актуальным перспективным быстроразвивающимся направлением научных исследований в области технологической теплофизики, и в то же время, разработка теории и методологии решения обратных задач и их системный анализ остаются в ряду важнейших исследовательских проблем и нуждается в дальнейшем развитии.

Широкий круг аспектов, возникающих при исследовании тепловых режимов различных технических объектов, приводит к многообразию типов обратных задач, характеризующихся разными математическими моделями изучаемых процессов, различным объемом экспериментальной информации, а также отличными друг от друга наборами идентифицируемых характеристик.

Поэтому разработка методов, реализующих системный подход к решению задач идентификации математических моделей теплофизических процессов, обладающих определенной универсальностью по отношению к способу математического описания исследуемых объектов и позволяющих проводить анализ широкого класса задач, представляет существенный теоретический и практический интерес.

В представленной диссертационной работе предлагается один из возможных конструктивных подходов к решению указанного круга задач математической физики специальными методами, основанными на теории оптимального управления.

Диссертация посвящена разработке, теоретическому обоснованию и практическому применению алгоритмически точных методов решения обратных задач теплопроводности, сводящих исходные некорректные задачи к условно-корректным задачам в форме нелинейных задач математического программирования, осуществляющих поиск идентифицируемых характеристик на компактных множествах физически реализуемых функций на базе последовательной параметрической оптимизации искомых решений и позволяющих обойтись без применения регуляризирующих процедур.

Диссертация выполнялась в рамках ряда научно-исследовательских работ, поддержанных грантами Российского Фонда Фундаментальных Исследований и Заданиями Минобрнауки РФ в 2011–2018 гг.

Изложенное свидетельствует о важности и актуальности темы диссертации.

## ***2. Новизна исследований и полученных результатов***

Новизна представленных в работе исследований заключается в создании методологических и теоретических основ конструктивного алгоритмически точного метода решения обратных задач теплопроводности на основе последовательной параметрической оптимизации физически реализуемых воздействий на компактных множествах их определения.

В работе с единых методологических позиций в рамках системного подхода решаются проблемы разработки, теоретического обоснования и техники применения предлагаемого метода для широкого круга технических приложений.

Новыми в работе являются следующие результаты.

1. Процедура редукции исходных обратных задач теплопроводности (ОЗТ), сформулированных в экстремальной постановке, к условно-корректным вариационным задачам оптимального управления бесконечномерным объектом с распределенными параметрами на основе минимизации функционала оценки температурных отклонений экспериментальных данных от модельных в равномерной метрике на интервале идентификации. Существенной особенностью предложенного в диссертации подхода является поиск физически обоснованных решений обратных задач на

компактном множестве функций, непрерывных вместе со своими первыми производными, последовательно сходящихся к точному решению. Используя принципы системного подхода, автор обосновывает корректность применения разработанного метода к решению базовых граничных, внутренних, ретроспективных и коэффициентных ОЗТ. Это позволяет решать задачу поиска сосредоточенных, пространственно-распределенных и пространственно-временных характеристик в широком круге ОЗТ с единых методологических позиций.

2. Новые алгоритмы последовательной параметризации искомых решений поставленной минимаксной бесконечномерной вариационной задачи. Представленные алгоритмы определяют аналитическую процедуру параметрической оптимизации при использовании равномерной метрики оценивания температурных невязок на основе погрешности чебышевских приближений для отклонений входных данных о температурных измерениях от их модельных значений. Предлагаемый подход приводит к нелинейной задаче математического программирования, сформулированной на компактном множестве искомых параметров. Отличие предлагаемого автором решения от известных состоит в том, что полученная в результате параметризации задача математического программирования соответствует условно-корректной постановке обратной задачи и остается такой при любом числе искомых параметров, определяющем точность решения ОЗТ. Таким образом, поиск решений исходных некорректно поставленных ОЗТ производится без применения процедуры регуляризации.
3. Конструктивные методики решения задач параметрической оптимизации нелинейных чебышевских приближений идентифицируемых характеристик по отношению к широкому кругу основных постановок типовых ОЗТ. Разработанные методики на заданном интервале идентификации позволяют осуществить алгоритмически точное решение исходных некорректно поставленных обратных задач теплопроводности, сходящееся с ростом числа учитываемых параметров, к искомым величинам. Выявлены качественные закономерности и свойства получаемых параметризуемых решений ОЗТ, единые для всех рассматриваемых типов задач, независимо от их конкретной специфики.

4. Метод, реализующий идентификацию упорядоченной совокупности модальных составляющих искомых характеристик при решении ОЗТ, предусматривающих поиск пространственно-временных граничных и внутренних величин. Метод отличается от известных тем, что реализует восстановление искомых величин в форме разложения в усеченный ряд по собственным функциям исследуемых краевых задач, и его точность определяется числом учитываемых модальных составляющих.
5. Подход к задачам оптимального планирования экспериментов при решении ОЗТ по идентификации пространственно-временных воздействий, когда условия проведения эксперимента существенно влияют на точность восстанавливаемых характеристик. Задача оптимизации плана экспериментов сформулирована по отношению к координатам точек измерения температуры при априорно заданном их количестве. Новизна предлагаемого автором решения заключается в постановке задачи оптимального планирования как задачи параметрической оптимизации с использованием минимаксного критерия оптимальности, задающего оценку температурной невязки по всей пространственной области в равномерной метрике, где значения координат рассматриваются как искомый вектор параметров.
6. Анализ применения разработанных методов к решению обратных задач теплопроводности при учете влияния погрешностей экспериментальных данных. Автором предложены два подхода, основанные на параметрической оптимизации искомых характеристик: при использовании предварительного сглаживания экспериментальной информации и при учете интервальных неопределенностей возмущающих воздействий.
7. Детализированные конструктивные расчетные методики решения базовых типов обратных задач технологической теплофизики: граничных, ретроспективных, коэффициентных ОЗТ, - обратных задач с идентифицируемыми начальными состояниями, граничными и внутренними, сосредоточенными, пространственно-распределенными и пространственно-временными характеристиками, описываемыми линейными и нелинейными одномерными и двумерными уравнениями теплопроводности. Новизна заключается также в разработке специального математического и алгоритмического обеспечения. На большом числе примеров автор

убедительно демонстрирует обоснованность разработанных расчетных методик.

Обобщая сказанное, можно констатировать, что новизна представленных в работе исследований заключается в создании методологических и теоретических основ, инженерных методик и процедур, специального математического и алгоритмического обеспечения метода последовательной параметрической оптимизации для решения широкого круга обратных задач технологической теплофизики.

### ***3. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций***

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, являются достоверными и обоснованными, что подтверждается корректным применением математического аппарата с использованием современных методов теории автоматического управления, теории оптимального управления линейными и нелинейными системами с распределенными параметрами. Справедливость выводов относительно эффективности разработанных методов последовательной параметрической оптимизации подтверждена сравнением результатов теоретического анализа с результатами компьютерного моделирования, а также внедрением предлагаемых методов, алгоритмов, математического, алгоритмического и программного обеспечения в практику решения задач идентификации и оптимизации объектов технологической теплофизики, в методики определения основных характеристик и параметров процессов нестационарной теплопроводности при реализации технологических процессов.

Основные положения диссертации докладывались на авторитетных международных, всесоюзных и всероссийских научно-технических конференциях.

Все основные научные положения диссертации опубликованы в сорока четырех научных работах, в том числе в четырнадцати научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и пяти рецензируемых журналах, относящихся к системам Web of Science и Scopus.

#### **4. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики**

Автор предлагает новые эффективные методы последовательной параметрической оптимизации для решения обратных задач технологической теплофизики, позволяющие восстанавливать физически обоснованные решения на компактных множествах их определения исходя из гладкости идентифицируемых функций.

В работе предложены новые, отличающиеся от известных, методики решения ОЗТ, позволяющие идентифицировать основные характеристики и параметры процессов нестационарной теплопроводности при реализации технологических процессов.

Совокупность разработанных в диссертации вычислительных алгоритмов представляют собой методологические основы решения широкого круга прикладных задач идентификации теплофизических процессов.

Автор предлагает конструктивные методы детализации выявленных закономерностей общего характера применительно к целому ряду прикладных задач, представляющих самостоятельный интерес. На основе подобного подхода могут быть получены научно обоснованные, объективно достоверные и эффективные решения многих важных обратных задач технологической теплофизики и других систем с распределенными параметрами, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа.

Полученные в работе теоретические положения и практические результаты использованы:

- при составлении паспортных характеристик по параметрам теплопроводности и термоупругости сложных неоднородных материалов и при планировании их экспериментальных исследований (ООО «Специальное Конструкторско-Технологическое Бюро «Пластик», г. Сызрань);
- при определении параметров и режимов индукционного нагрева при производстве алюминиевых полуфабрикатов (АО «Арконик СМЗ», г. Самара);
- при создании комплексного тренажёра оператора основного оборудования ТЭЦ (ООО «ГК ИНФОПРО»);
- в учебном процессе в Самарском государственном техническом университете.

## ***5. Рекомендации по использованию результатов диссертации***

Считаем целесообразным продолжить работу в Самарском государственном техническом университете по направлениям, связанным с развитием идей и результатов диссертационной работы А.Н. Диленской.

Внедрение результатов диссертационной работы рекомендуется осуществить в организациях и учреждениях, занимающихся многоплановыми исследованиями тепловых процессов, их параметрической идентификацией в объектах энергетики, машиностроения, в технологических объектах.

Целесообразным направлением использования результатов работы является системный анализ и распространение разработанных методов на комплекс базовых обратных задач технологической теплофизики в двумерных областях.

Перспективной представляется тематика, связанная с достоверной идентификацией математических моделей процессов нестационарного теплообмена при проектировании технических систем, целесообразно продолжить работы в этом направлении и распространить полученные результаты на процессы термоупругости, физико-химических превращений на поверхности, содержащие изменение фазовых состояний.

Рекомендуем внедрить разработанные методики в расчетную практику Филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс» для оптимизации работы генерирующего и теплосетевого оборудования.

Рекомендуем научные разработки по теме диссертации использовать в учебных курсах, курсовом и дипломном проектировании бакалавров по направлениям 27.03.03 «Системный анализ и управление» и 27.03.04 «Управление в технических системах» и магистров техники и технологии по направлению 27.04.00 «Управление в технических системах», при подготовке аспирантов.

## ***6. Замечания по диссертационной работе***

1. Разработанный метод параметрической оптимизации (*Глава 2*) позволяет отыскать решение в классе кусочно-параболических функций (см. (2.68), (2.69)). Чем обоснован выбор именно этого компактного множества, существует ли целесообразность увеличения степени гладкости идентифицируемых характеристик (при значениях  $k > 2$  согласно (2.11) и (2.12)), как это влияет на разработанный метод и какие могут быть сделаны рекомендации в этом случае?

2. Из представленного материала остается неясной сравнительная оценка возможностей методов минимаксной оптимизации (*Главы 2 и 3*) и модальной идентификации (*Глава 4*) и предпочтительных областей их применимости.

3. Из материалов диссертации остается непонятным, как можно охарактеризовать границы возможного применения предлагаемых методов решения ОЗТ.

4. В работе отсутствует сравнительный анализ преимуществ и недостатков разработанных методов параметрической оптимизации для решения ОЗТ.

5. В диссертации отсутствует сравнение результатов, полученных на основе разработанных методов с результатами, полученными с использованием стандартной квадратичной интегральной оценки температурной невязки.

## ***7. Общая оценка работы***

В целом, диссертация Дилигенской А.Н. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой решена крупная научная проблема, имеющая важное значение в области разработки новых конструктивных методов решения обратных задач технологической теплофизики.

Диссертация выполнена на высоком научном и методическом уровне, изложена ясным, технически грамотным языком. Автор проявил хорошие знания современного состояния решаемых в диссертации проблемных вопросов, как по существу рассматриваемых проблем, так и в терминологическом плане.

Полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным целям.

Автореферат и опубликованные работы отражают все основные положения диссертации. Научные и практические результаты диссертации представлены в достаточном количестве опубликованных работ, значительная часть которых написана автором единолично.

В диссертации четко обозначен вклад автора в разработку проблемы в работах, опубликованных коллективно с соавторами.

При использовании результатов, полученных другими авторами, в диссертации даются необходимые ссылки.

Все основные положения диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, внесенных в Перечень журналов и изданий, утвержденный Высшей аттестационной комиссией и в журналах, состоящих в международных системах Web of Science и Scopus.

Диссертация написана в форме, позволяющей получить полное и подробное представление о материалах исследования, предпринятоего автором.

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней, соответствует специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность), а ее автор, Дилигенская Анна

Николаевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук.

Диссертационная работа Дилигенской А.Н. «Методы идентификации, анализ и синтез алгоритмов последовательной параметрической оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики» заслушана на заседании кафедры «Космические системы и ракетостроение» (протокол № 8 от 27.03.2019 г.).

Заведующий кафедрой  
 «Космические системы и ракетостроение»,  
 доктор технических наук, профессор,  
 член-корреспондент РАН  
 Алифанов Олег Михайлович

Профessor кафедры  
 «Космические системы и ракетостроение»,  
 доктор технических наук, профессор  
 Ненарокомов Алексей Владимирович

Доцент кафедры  
 «Космические системы и ракетостроение»,  
 кандидат технических наук  
 Титов Дмитрий Михайлович

Доцент кафедры  
 «Космические системы и ракетостроение»,  
 кандидат технических наук  
Викулов Викулов Алексей Геннадьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

125993, Россия, г. Москва., Волоколамское шоссе, д. 4

Телефон: +7 499 158-43-33

Адрес электронной почты: mai@mai.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://mai.ru>