



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846) 278-44-00
E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО 02068396, ОГРН 1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

26.08.19. № 02 01/2967

На № _____ от _____

Ученый совет ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4.

Тел. +7 499 158 58 62

Факс: +7 499 158 29 77

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» направляет отзыв официального оппонента Лившица М.Ю. на диссертационную работу Викулова Алексея Геннадьевича «Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Приложения:

1. Отзыв официального оппонента – 11 л., 2 экз.;

Первый проректор-проректор
научной работе



Ненашев М.В.

Исполнитель:

М.Ю. Лившиц

инициалы, фамилия

332-42-34

телефон

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

30 08 2019

Отзыв
официального оппонента

доктора технических наук Лившица Михаила Юрьевича на диссертационную работу Викулова Алексея Геннадьевича «Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Актуальность темы диссертации.

Проблема идентификации различного рода моделей всех без исключения машин и механизмов является важнейшей проблемой, определяющей научно-технический прогресс человечества с момента осмысленного применения орудий. С продвижением человечества по пути прогресса эта проблема становится все острее в полном соответствии с системным принципом сложности. Наиболее остро она проявляется в космической отрасли при математическом моделировании космических аппаратов (КА). В первую очередь это связано с неприемлемыми финансовыми затратами, а зачастую с технической невозможностью проведения непосредственных экспериментов в космосе для идентификации процессов на борту КА. Проблема идентификации соответствующих тепловых процессов при отработке температурных режимов составных частей (СЧ) КА даже при наземных испытаниях усугубляется сложностью неразрушающего контроля распределенных во времени и пространстве температурных полей.

С другой стороны, КА подвергаются сложному комплексу воздействий со стороны изменяющегося в соответствии с положением КА на орбите теплового излучения планет и звезд, излучения в космическое пространство с поверхности КА и нестационарного тепловыделения аппаратурой размещенной на несущих конструкциях КА и работающей по своей, обычно недетерминированной, циклограмме. Неравномерность и нестационарность темпера-

турных полей СЧ КА определяют температурную составляющую погрешности информационно-измерительной системы, особенно оптической ее компоненты, что может привести к недопустимым курсовым отклонениям КА и ошибкам в получаемой информации. Имитация при наземных испытаниях всего комплекса этих воздействий представляет собой весьма сложную проблему, неразрешимую современными техническими средствами без использования математических моделей для сокращения продолжительности, количества и снижения информационной нагрузки наземных экспериментов.

Одной из важнейших задач тепловых испытаний КА является определение или уточнение теплофизических характеристик материалов, допустимых параметров тепловой нагрузки на теплоизоляцию КА по доступной в ходе испытаний или полученной в режиме эксплуатации информации о температуре в контролируемых точках СЧ КА. Эта задача относится к области идентификации теплофизических математических моделей, включающей самые сложные типы задач многочисленных разделов теории идентификации. Сложность этих задач определяется тем, что они относятся к обратным задачам, большинство из которых, в первую очередь обратные задачи теплофизики, некорректны по Адамару из-за нарушения причинно-следственных связей. При этом для этих задач зачастую характерно наличие всех трех компонент некорректности – несуществование решения обратной задачи в рассматриваемой области, его неединственность в случае существования и его неустойчивость. Последнее обстоятельство особенно затрудняет решение задачи идентификации тепловых моделей, так как тепловые измерения производятся со значительной погрешностью, а исходные данные для обратных задач подвержены существенным возмущениям (неточностям). Несмотря на то, что впервые задачи идентификации тепловых моделей как обратные задачи теплопроводности, по-видимому, были поставлены и решены в 19 веке Ж.Фурье, а затем У. Кельвином, долгое время в силу некорректности их практическое использование наталкивалось на серьезные затруднения. Однако основополагающими работами А.Н. Тихонова, М.М. Лаврентьева, В.К.

Иванова, В.Я. Арсенина, А.Л. Бухгейма, Ф.П. Васильева, В.В. Васина, В.Б. Гласко, Дж.Бэка, А.Г.Тёмкина, В.А.Морозова, О.М.Алифанова, Ю.М.Артюхина, Д.Ф.Симбирского, С.В.Резника, В.К.Иванова, М.М.Лаврентьева, А.В.Ненарокова, Л.А.Коздобы, Р. Латтеса, Ж.Л. Лионса, J. Gullum, K. Miller и многих других к настоящему времени созданы основы теории некорректных задач математической физики как одного из основных направлений современной прикладной математики.

При этом следует отметить, что проблема создания эффективных методы решения задач идентификации математических моделей теплообмена в КА далека от исчерпывающего решения. Автор диссертации развивает основные идеи ведущей в нашей стране научной школы в области обратных задач теплообмена в КА, заложенной работами О.М. Алифанова и Ю.М. Артюхина, А.В. Ненарокова.

Тематика исследований диссертации А.Г.Викулова актуальны, а их результаты вносят существенный теоретический и практический вклад в решение остро стоящей перед космической отраслью проблемы идентификации математических моделей теплообмена КА.

Структура и объем диссертации.

Диссертация включает введение, пять глав, заключение и список литературы.

В первой главе проведен анализ работ по расчетно-экспериментальной тепловой обработке КА и обратным задачам теплообмена.

Автор продемонстрировал высокий уровень профессиональной эрудиции в рассматриваемой в диссертации области. Проведен исчерпывающий обзор и анализ работ по тепловой обработке КА расчетно-экспериментальными методами. При этом выделены характерные особенности методов проектирования теплозащитных покрытий транспортно-

космических систем и спускаемых космических аппаратов, расчета и проектирования долгоресурсных космических аппаратов, оптических систем, антенн и телескопов.

Применительно к предметной области автор интерпретирует идентификацию граничных условий в краевой задаче теплообмена (в классификации обратных задач теплопроводности известную так же как граничная), как задачу диагностики граничных условий.

Проанализированы различные методы идентификации математических моделей теплообмена с распределенными (МРП) и сосредоточенными (МСП) параметрами, предложена авторская классификация этих методов. По результатам аналитического обзора автора, можно сделать вывод о перспективности дальнейшего развития расчетно-экспериментальной методологии путем интеграции двухмодельной концепции, позволяющей увеличить точность и уменьшить количество тепловых расчетов за счет идентификации МСП. Идентификация таких моделей может проводиться как методом итерационной регуляризации на основе градиентных методов, так и итерационным методом на основе вариационного метода А.Н. Тихонова. Таким образом, автором обоснована основная цель диссертационной работы – повышение эффективности наземной отработки КА путем разработки и применения модифицированного вариационного метода итерационной регуляризации на основе системной минимизации функционала невязки температуры и сглаживающего функционала, а также использования единых аналитических выражений расчета шага спуска.

Во второй главе предложено термодинамическое описание теплофизических систем космических аппаратов, как наиболее общее для всех видов взаимодействий, поскольку большинство из них характеризуется энергообменом и может описано дифференциальными уравнениями в частных производных по времени и координатам (МРП) или системой обыкновенных дифференциальных уравнений (МСП). Автор устанавливает для СЧ КА

редукцию МРП к МСП, при этом, правда, не указывает на границы применимости предлагаемого морфизма.

МРП идентифицируется при помощи связанных с ней МСП по экспериментальным полям температуры и граничным условиям тепловакуумных испытаний (ТВИ).

Идентифицированные коэффициенты могут непосредственно задаваться в МРП. Если МСП недостаточно детализирована, ее коэффициенты идентифицируются как по данным ТВИ, так и по тепловым расчетам на основе МРП, а их частные используются для уточнения искомым коэффициентов МРП. Полный набор внутренних связей термодинамически открытой теплофизической системы является линейно зависимым и идентифицируется по граничным условиям и полю потенциала только для одного узла, если остальные коэффициенты однозначно определены. При наличии первого приближения задача идентификации полного набора связей решается итерационно последовательным перебором узлов системы на каждой итерации.

Автор подразделяет тепловые расчеты на проектные и поверочные. Как проектные, так и поверочные расчеты делятся на расчеты наземных и летных испытаний. Для каждой категории расчетов определены цель и задачи. Особенно следует отметить высокое качество системного анализа статистических характеристик тепловой модели (таблица 2.3) для обоснованного выбора идентифицируемых параметров.

Данные тепловых расчетов и результаты ТВИ используются для оценки погрешности тепловых моделей СЧ КА. Для оценки расхождения расчетных и экспериментальных данных в нестационарных режимах принимается предположение об аналогии погрешности расчета и функции отклика электронного измерительного устройства.

В третьей главе исследуется устойчивость решения задач идентификации МСП. Итерационная регуляризация позволяет получить условно устойчивое решение, используя экспериментальную температуру одного узла для идентификации одной координаты искомого вектора. Для идентифика-

ции тепловых МСП проанализированы итерационные методы регуляризации решения на основе сглаживающего функционала и функционала невязки температуры. Анализ метода итерационной регуляризации на основе функционала температурной невязки, проведенный для обобщенной теплофизической системы, позволил получить аналитические выражения для вычисления неопределенных множителей Лагранжа, входящих в выражения градиента функционала и векторного шага спуска. В методе итерационной регуляризации на основе сглаживающего функционала (вариационный метод Тихонова) требуется решение проблемы определения безразмерного параметра регуляризации. Решение задачи идентификации МСП в общем виде может находиться приближенно с использованием экспериментальной температуры одного узла для идентификации одного столбца (строки) матрицы искомого параметра, что обеспечивается расчетом единого шага спуска для каждого искомого вектора при последовательном итерационном переборе узлов системы.

В четвертой главе получены аналитические выражения шага спуска при минимизации функционала температурной невязки (параметра регуляризации), единые для методов итерационной регуляризации на основе функционала невязки температуры и сглаживающего функционала. При этом установлено, что безразмерный шаг спуска градиента функционала температурной невязки обратен параметру регуляризации.

По результатам вычислительных экспериментов установлено, что в задачах идентификации с неустойчивым решением единое аналитическое выражение шага спуска позволяет получить условно устойчивое решение. В то же время, вариационный принцип, основанный на отборе решений в классе векторов, невязки которых с нормальным решением сопоставимы с точностью задания исходных данных, не исключает неединственности решения (в задачах с неединственным решением) и требует усиления дополнительными условиями, аналогичными условиям постановки задач с неустойчивым решением – каждая координата векторного шага спуска должна соответствовать

одной координате искомого вектора и обеспечиваться временной зависимостью экспериментальной температуры одного узла МСП.

В пятой главе метод регуляризации применен для идентификации излучательной способности модельного элемента экранно-вакуумной тепловой изоляции (ЭВТИ) в виде поверхности, находящейся в тепловом контакте с конструкцией КА, поглощающей внешнее излучение и излучающей в окружающую среду. По результатам идентификации, излучательная способность ЭВТИ изменяется от 0,02 при внешнем нагреве инфракрасными имитаторами до 0,05 при охлаждении криозэкранами и существенно отличается от коэффициента излучения наружной поверхности, равного 0,65. Полученные результаты позволяют существенно уточнить расчетные значения, т.к. имеют доверительную вероятность 0,981.

С использованием модифицированного вариационного метода итерационной регуляризации получена временная функция тепловой проводимости контурной тепловой трубы и в первом приближении решена задача управления тепловой мощностью СЧ КА.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в развитии метода регуляризации решения обратных задач теплообмена посредством объединения вариационного метода, основанного на минимизации сглаживающего функционала, и метода итерационной регуляризации, основанного на минимизации функционала температурной невязки. В результате разработан новый модифицированный вариационный метод итерационной регуляризации для решения нелинейных задач идентификации математических моделей теплообмена в конструкциях космических аппаратов. Этот метод включает аналитические выражения множителей Лагранжа для минимизации температурной невязки при итерационной регуляризации и аналитические выражения для параметра регуляризации, что имеет самостоятельное научное значение.

Достоверность результатов и их практическая значимость

Достоверность результатов подтверждена их соответствием фундаментальным математическим и естественнонаучным закономерностям, многочисленными тепловакуумными испытаниями на сертифицированном оборудовании с участием автора, удовлетворительным совпадением с экспериментальными результатами тепловакуумных испытаний в СЧ КА и практической проектно-эксплуатационной деятельности по информации, полученной из независимых опубликованных источников.

Диссертация имеет практическую ценность, обусловленную комплексным решением задач систематизации тепловых расчетов, идентификации и оценки точности математических моделей теплообмена в рамках расчетно-экспериментальной методологии, примененной при тепловой обработке СЧ КА.

Практическая значимость научных результатов заключается в эффективной системной методологии тепловакуумной обработки КА, основанной на авторском модифицированном вариационном методе итерационной регуляризации решения задач идентификации математических моделей СЧ КА.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с предъявляемыми к ним Положением о присуждении ученых степеней требованиями, содержат качественный иллюстративный и статистический материал.

Материалы диссертации опубликованы в докладах на всероссийских и международных конференциях, статьях в рецензируемых научных изданиях. Автор диссертации известен в научных кругах как специалист в области теплофизики и теоретической теплотехники. Автореферат и публикации отражают основные положения диссертации.

Замечания по оформлению и содержанию диссертации

1. Несмотря на имеющееся достаточно большое количество работ, связанных с конечномерной аппроксимацией математических моделей с распределенными параметрами вообще, и математических моделей в форме крае-

вых задач теплообмена в частности, следовало бы обосновать для конкретных приложений использование этих конечномерных форм для параметрической идентификации распределенных математических моделей.

Ссылки на предложенную Н.В. Дилигенским и С.Л. Балаковским концепцию двухмодельного итерационного метода решения обратной задачи теплообмена, по мнению оппонента, недостаточно, т.к. в этой концепции для конкретных приложений проанализирована корректность предельного перехода от одной модели к другой путем анализа сжимающих свойств оператора перехода, чего нет в диссертации.

Для определенных видов конечномерной аппроксимации даже простейших обратных задач теплопроводности этот предельный переход носит сингулярный характер, что в ряде приложений может приводить к принципиально ошибочным выводам. В частности, результаты по наблюдаемости и управляемости распределенных систем и их конечномерной аппроксимации принципиально не совпадают даже при большой размерности такой аппроксимации (см., например работы Ф.П. Васильева, Э.Я. Рапопорта и т.п.)

При этом итерационное уточнение параметров (см. рис. 2.5) путем сравнения МРП и МСП может быть немонотонным или вообще расходящимся.

2. В работе отсутствует обоснование, позволяющее считать элементы СЧ КА теплотехнически тонкими в условиях нестационарной тепловой нагрузки, поэтому аппроксимация краевой задачи (2.1) системой уравнений (2.8) в предположении, что каждый узел модели с сосредоточенными параметрами является изотермическим, требует для обеспечения приемлемой погрешности большого количества N уравнений системы (2.8) и аналогичных ей систем, описывающих в конечномерном пространстве СЧ КА.

Это обстоятельство требует указания на специальные экономичные методы для решения больших систем уравнений при минимизации соответствующих функционалов.

3. Оценка расхождений между расчетными и экспериментальными данными, опирающаяся на решение (2.113) дифференциального уравнения первого порядка, с постоянными коэффициентами нуждается для процесса теплообмена в дополнительном обосновании с указанием границ ее применимости, т.к. аналогия справедлива только в отдельных частных случаях стационарного процесса в теплотехнически тонких изотропных телах с постоянными теплофизическими характеристиками.

4. Оценка устойчивости МРП на основании анализа собственных чисел λ_j ; матрицы обратной конечномерной задачи МСП требует оценки сходимости собственных чисел обратных задач МСП и МРП. Поэтому выводы п. 3.1.2 диссертации требуют уточнения.

5. Метод синтеза алгоритма управления мощностью внутренних теплоисточников в системе терморегулирования СЧ КА на основе решения обратной задачи теплообмена, предложенный в разделе 5.4, нуждается в дополнительном обосновании, т.к., по существу, автор не предложил метод синтеза системы стабилизации заданной постоянной или переменной температуры, обеспечивающий требуемые (или оптимальные) показатели качества системы в динамике и статике при возмущениях различного уровня, частотного спектра и места приложения в структуре системы.

6. Несмотря на грамотное и корректное изложение, встречаются стилистические и логические недостатки в оформлении диссертации. Так на стр. 9 употребляется непонятный термин: «физические процессы первого порядка...», неясно для чего на стр. 71 приведены взаимно обратные графики удельных тепловых сопротивлений и проводимостей, на стр.13 автореферата используются обозначения из диссертации без пояснений, что затрудняет восприятие материала автореферата и т.д.

Заключение


Замечания носят частный характер и не снижают общего высокого научного и практического уровня диссертации в целом. Работа представляет

научную и практическую ценность, является завершенным научно-квалификационным трудом, содержащим новые научно-обоснованные технические решения, которые вносят значительный вклад в развитие космической отрасли.

Диссертация удовлетворяет всем критериям, предъявляемым к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842.

Автор работы Викулов Алексей Геннадьевич достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент
заведующий кафедрой «Управление
и системный анализ теплоэнергетических
и социотехнических комплексов»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
Почетный работник высшего
профессионального образования РФ,
д.т.н., профессор

 Лившиц Михаил Юрьевич

Подпись Лившица Михаила Юрьевича удостоверяю:
Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»



 Малиновская Юлия Александровна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»,
Адрес: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус; Факс:
+7(846) 278-44-00; E-mail: rector@samgtu.ru; Сайт: <https://samgtu.ru>.

М.П.