

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

«Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44
E-mail: bauman@bmstu.ru
ОГРН 1027739051779
ИНН 7701002520 КПП 770101001

29.08.2019 № 01.03-10/786

на № _____ от _____

Учёному секретарю
диссертационного совета
Д 212.125.08

д.т.н. профессору Ю.В. Зуеву
125993, Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, дом 4.
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет). Учёный совет

Уважаемый Юрий Владимирович!

Направляю Вам отзыв официального оппонента – д.т.н., профессора С.В. Резника на диссертацию Викулова А.Г. «Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Приложение: Отзыв в 2-х экз., на 11 л. каждый

Первый проректор-проректор по
научной работе

В.Н. Зимин

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх № 30 08 2019

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана Резника Сергея Васильевича 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 направления научных исследований. Проектные исследования тепловых режимов – неотъемлемая часть процесса создания космического аппарата (КА). Такие исследования многогранны и в них особое место занимают вопросы тепловых испытаний моделей, элементов, макетов, натуральных конструкций КА. Методам и техническим средствам тепловых испытаний КА посвящены многочисленные работы в научной периодике, монографии и учебные пособия. Основу теории испытаний КА составляют методы теории подобия, автоматического управления, математического моделирования, планирования измерений и анализа погрешностей. С середины 60-х годов прошлого века теория испытаний стала усиливаться за счет новой методологии – методологии решения математически некорректных обратных задач (ОЗ) с приложением к задачам теплообмена, механики и аэродинамики.

Методология решения ОЗ бесспорно представляет мощный инструмент научных исследований в разных областях науки, техники и производства. Пионерные исследования мирового уровня в этой области принадлежат отечественным ученым А.Н. Тихонову, В.А. Морозову, О.М. Алифанову, Е.А. Артюхину, Ю.М. Мацевитому, С.В. Румянцеву, Д.Ф. Симбирскому, В.М. Юдину. Стоит подчеркнуть, что методология решения ОЗ теплообмена в нашей стране и за рубежом развивалась под влиянием практических запросов, связанных именно с испытанием ракет, КА, ракетных двигателей и энергетических установок. В разработке научных проблем, связанных с решением и применением ОЗ теплообмена, участвовали сотни специалистов.



Несмотря на достижения в области математико-алгоритмического и программного обеспечения методов теплового проектирования и отработки тепловых режимов КА при наземных и летных испытаниях, ощущается потребность в систематизации и обобщении результатов отдельных работ, повышении эффективности методов и средств научных исследований и разработок. В связи с этим актуальна подготовка крупных научных обобщающих работ, содержащих новые идеи и результаты, какими являются докторские диссертации.

Диссертационная работа А.Г. Викулова является продолжением научных исследований в области теплового проектирования и идентификации процессов теплообмена КА, которые на протяжении более 40 лет ведутся в МАИ. Поэтому кажется странным, что автор плохо обосновал тему диссертации.

Название диссертации «Идентификация моделей теплообмена в космических аппаратах» неудачное по форме и не соответствует содержанию. Его можно было бы заменить на «Идентификация моделей теплообмена автоматических космических аппаратов по результатам тепловакуумных испытаний». В авторском варианте не определены типы КА и характерные для них виды испытаний. Нет подтверждений универсальности подходов и того, что научные результаты и выводы можно распространить на любые типы КА. К примеру, разработанные в диссертации методы не учитывают особенности теплообмена и наземных испытаний крылатых КА, возвращаемых КА и их составных частей.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 243 страницы, 90 рисунков, 24 таблицы и список литературы из 272 источников.

Во введении автор изложил свой взгляд на актуальность диссертационной работы, сформулировал цель и задачи работы, ее соответствие приоритетным научно-техническим направлениям. Однако, по нашему мнению, нет ясного и четкого объяснения: какую проблему собирается решать автор и,

главное, зачем? Учитывая, что тепловые, и, в частности, термовакуумные испытания КА ведутся уже десятки лет, а методология обратных задач теплообмена развивается больше полувека, стоило бы убедительно объяснить какой новый и полезный результат будет достигнут диссертантом и в чем уникальность предлагаемых методов и средств?

Обращение к формулировке цели диссертации только подтверждает вышесказанное. Цель, как-бы, тройственная: а) – математическая формализация метода тепловой обработки космических аппаратов на основе математического моделирования и решения обратных задач теплообмена, б) – разработка метода итерационной регуляризации решения нелинейных задач на основе вариационного метода Тихонова и в) – методологическое обоснование системного применения этих методов для создания новой космической техники. Возникает вопрос: неужели ранее тепловые испытания проводились наугад без математического обеспечения, без того, что диссертантом именуется математической формализацией? Автору следовало бы объяснить в чем отличие его подходов от работ тех, кто уже внес заметный вклад в математическое обеспечение проектных исследований тепловых режимов объектов ракетной и космической техники и их тепловых испытаний.

Данная формулировка цели не содержит обязательств в части достижения принципиально новых и практически полезных результатов, типа повышения точности проектирования, сокращения сроков проектирования или испытания КА, придания им новых качеств, таких как снижение массы, габаритов, увеличения ресурса и т.п. Отсюда сомнения в весомости «*математической формализации метода тепловой обработки космических аппаратов на основе математического моделирования и решения обратных задач теплообмена*» как значительной части докторской диссертации.

Под стать цели и вытекающие из нее задачи. Так, первая задача состоит в методологической систематизации и математической формализации расчетно-экспериментального метода тепловой обработки КА с использованием ОЗ. Какую пользу принесет «методологическая систематизация»? Если это

предложенная диссертантом классификация задач идентификации и ОЗ теплообмена, то в этом, по большому счету, нет никакой нужды. Тем более, что она не лучше известных классификаций, а хуже.

Основные виды идентификации – структурная и параметрическая. Упомянутая на стр. 6, 11, 36, 150, 233 «функциональная идентификация» является разновидностью параметрической идентификации и в задачах теплообмена пока «не прижилась». Это термин встречается в трудах по медицине и психологии, но совершенно в ином смысле. Еще один термин «иерархическая идентификация» (стр. 46, 51). Известно, что сложные системы имеют иерархическую структуру. Диссертант заимствовал этот термин в работе Голева Р.В. и Четкарева В.А. (Иерархическая идентификация тепловых процессов при разработке технических систем и технологий // ИФЖ. 1989. Т. 56. №3. С. 411-414), а вместе с этим еще один термин «единый итерационный процесс параметрического синтеза». Звучит звонко, однако в чем его преимущества и почему его нужно применять в данной работе диссертант не сообщил.

Что касается классификации обратных задач теплообмена, то она сложилась достаточно давно и легко доступна (см., например, Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.). По сложившейся классификации ОЗ делятся на задачи проектирования, управления и идентификации, на математически корректные и некорректные. В зависимости от того какие величины (параметры) являются искомыми различают граничные, геометрические, коэффициентные и ретроспективные ОЗ (кстати, о геометрических ОЗ диссертант вообще не упоминает). При классификации ОЗ теплообмена учитываются механизмы передачи теплоты: конвекция, теплопроводность, излучение и их комбинации (теплопроводность и излучение, теплопроводность и конвекция и др.).

В первой главе анализируются работы по расчетно-экспериментальному методу тепловой отработки КА, являющемуся предметом исследования диссертации, классифицируются обратные задачи теплообмена по областям

применения в космической технике, приводятся их постановки и методы решения. Эти методы в системе образуют методологию тепловой отработки КА, основанную на двухмодельном методе, двухуровневых тепловых расчетах и идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами. По результатам проведенного анализа литературы для идентификации математических моделей теплообмена в КА, имеющих математически некорректное решение, предлагается использовать итерационный метод с безразмерным параметром регуляризации, в котором одновременно минимизируются сглаживающий функционал и функционал невязки температуры.

Нужно отметить весьма обстоятельный и квалифицированный анализ современного состояния работ в области теплового проектирования и тепловых испытаний различных КА и их систем, представленный в п. 1.1.

Объектом исследования диссертационной работы являются математические модели теплообмена с сосредоточенными параметрами, методы их идентификации, регуляризации решения обратных задач, и вычисления погрешности. Такое определение объекта и предмета научных исследований на наш взгляд ошибочно. Объектом исследований должны являться КА, а предметом – тепловые процессы, сопровождающие их работу и испытания. В противном случае предметная область исследований смещается в область математического моделирования и не соответствует научной специальности диссертации.

В рассуждениях о зависимости точности решения ОЗ на стр.46 автор не упомянул о влиянии на точность двух важных факторов – точности вычислений и точности задания параметров, заданных по условиям задачи, как правило, справочных. Конечно, за последние десятилетия точность вычислений заметно выросла, и нет проблем с аппроксимации дифференциальных или интегральных параметров разностными аналогами, выбором схем счета, но сам фактор остался.

Выводы к главе 1 занимают 4 страницы текста. Без потери смысла часть материалов из них можно было бы перенести в основной текст главы.

Вторая глава направлена на выявление причин некорректности задач идентификации тепловых математических моделей с сосредоточенными параметрами. В общем виде задача идентификации матрицы неизвестных функций имеет неединственное решение в силу их линейной зависимости. Единственное решение обеспечивается только в случае восстановления тепловых связей одного узла, если остальные коэффициенты системы уравнений однозначно определены. В остальных случаях для поиска неизвестных функций необходимо применение итерационного метода при наличии первого приближения. Отдельно рассмотрена задача идентификации контактных тепловых проводимостей, являющихся наряду с угловыми коэффициентами излучения наиболее сложными функциями, зависящими от температуры двух взаимодействующих узлов и времени. Сделанные выводы проиллюстрированы на примере математической модели с сосредоточенными параметрами составной части КА.

В основе методологии тепловой отработки КА и их составных частей расчетно-экспериментальным методом лежат двухуровневые тепловые расчеты по подробным математическим моделям теплообмена, связанным с упрощенными моделями с сосредоточенными параметрами, которые идентифицируются как по исходным математическим, так и по натурным моделям. Частные коэффициенты моделей с сосредоточенными параметрами, найденных по расчетным и экспериментальным данным, являются множителями, уточняющими параметры подробных математических моделей теплообмена в КА. Погрешности тепловых расчетов предлагается анализировать на основе гипотезы об аналогии математической модели теплообмена и электронной измерительной системы первого порядка производной по времени, теоретически подтвержденной в частном случае.

Третья глава посвящена решению неустойчивых задач идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами итерационным методом на основе метода регуляризации и градиентным методом итерационной регуляризации. Решая вариационную задачу в малых приращениях неизвестных коэффициентов, автор получил аналитические выражения

неопределенных множителей Лагранжа, входящих в выражения градиента функционала температурной невязки, и векторного шага спуска метода итерационной регуляризации. Методика расчета этих функций применена в обобщенной математической модели теплообмена в технической системе КА для вывода аналитических выражений размерного шага спуска. Исследована возможность использования векторного шага спуска для регуляризации решения задач с неединственным решением при условии усиления вариационного принципа дополнительными ограничениями, поскольку неустойчивое решение в смысле нарушения его непрерывности от граничных и начальных условий имеет следствием неединственность распределения искомым функций.

В четвертой главе разработана комбинированная методика определения безразмерного параметра регуляризации итерационно-вариационного метода при минимизации сглаживающего функционала и функционала температурной невязки. Если функция градиента функционала невязки становится равной изменению правой части уравнений системы математической модели относительно предыдущей итерации, то шаг спуска становится безразмерной величиной, обратной параметру регуляризации. При этом условии регуляризирующий итерационный процесс и выражения безразмерного параметра регуляризации (размерного шага спуска) являются общими для итерационно-вариационного метода и метода итерационной регуляризации. Для задач с неединственным решением в качестве дополнительных условий отбора предложены ограничения области значений функций допустимыми физическими и техническими диапазонами и функции чувствительности изменений температур узлов к изменениям искомым параметров. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что в случае задач с неустойчивым решением итерационно-вариационный метод и метод итерационной регуляризации с полученными в данной работе аналитическими выражениями множителей Лагранжа и шага спуска обеспечивают сходимость к близким между собой функциям. Для задач с неединственным решением предлагаемое усиление вариационного принципа недостаточно – необходимо соблюдение условия

идентификации одной координаты вектора по экспериментальной температуре одного узла.

В пятой главе с использованием полученных в работе теоретических результатов решены задачи идентификации излучательной способности ЭВТИ, тепловой проводимости контурной тепловой трубы, управления тепловой мощностью внутренних источников КА. Проведенные расчеты показали, что в случае идентификации одной функции итерационно-вариационный метод и метод итерационной регуляризации сходятся к одним и тем же зависимостям за несколько итераций. Идентифицированные параметры применены в тепловой математической модели составной части КА, по которой проведен анализ наземных и летных испытаний.

Представленная работа представляет научную ценность в области теоретической теплотехники и теории обратных задач.

Новизна полученных результатов состоит в том, что:

– разработан модифицированный итерационно-вариационный метод регуляризации решения задач идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами;

– выведены аналитические выражения расчета размерного шага спуска метода итерационной регуляризации для модели с сосредоточенными параметрами;

– разработана комбинированная методика расчета безразмерного параметра регуляризации итерационно-вариационного метода по выражениям, обратным выражениям шага спуска;

Практическая значимость результатов работы состоит в предложенной методологии моделирования и идентификации процессов теплообмена КА, в рамках которой разработаны соответствующие алгоритмы и программы на основе моделей с сосредоточенными параметрами. Апробация созданных инструментов подтвердила их эффективность при анализе результатов тепловых расчетов КА при наземных и летных испытаниях.

Автореферат соответствует содержанию и выводам диссертации, а тема диссертации и её содержание в основном соответствует паспорту специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Конкретные рекомендации по использованию результатов диссертации. Научные и практические результаты и рекомендации диссертационной работы могут найти применение при проектировании и наземных тепловых испытаниях КА в: ПА «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва», АО «ВПК «НПО машиностроения», АО «ИСС им. М.Ф. Решетнева», АО «НПО им. С.А. Лавочкина», АО «Корпорация «Комета» и других.

Замечания и пожелания:

1. Тема диссертации, формулировка актуальности, цели и задач не дают ясного и четкого представления о конкретной области исследований автора, ее месте среди других работ и ожидаемой ценности научных результатов.

2. Основополагающими элементами методологии диссертации являются: иерархическая идентификация [76 – Голев Р.В., Четкарев В.А. Иерархическая идентификация тепловых процессов при разработке технических систем и технологий // ИФЖ. 1989. Т. 56. №3. С. 411-414], двухмодельный метод [115 – Балаковский С.Л., Дилигенский Н.В. О двухмодельном итерационном методе решения граничной обратной задачи теплообмена // ИФЖ. 1989. Т. 56. №2. С. 313-319] и модифицированный вариационный метод итерационной регуляризации (вариационно-итерационный метод), разработанный в диссертации. Поскольку пионерные исследования в этих вопросах принадлежат другим специалистам, то следовало бы указать роль автора в развитии данной методологии.

3. Преимущества выбранного подхода к моделированию и идентификации теплообмена КА с помощью моделей с сосредоточенными параметрами по-сути не раскрыты. Нет ссылок на предшествующие научные работы, где также решались задачи параметрической идентификации на основе моделей с сосредоточенными параметрами (например, Исимото, Пан Методы коррекции тепловых моделей в кн. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов; под ред. Дж. Лукаса. М.: Мир, 1974. С. 301-326; Методы и алгоритмы

идентификации радиационных характеристик терморегулирующих покрытий по результатам летных экспериментов / Е.А. Артюхин, О.Б. Жукова-Хованская, А.В. Ненарокомов и др. // Препринт ИКИ АН СССР № 1336. М.: ИКИ АН СССР, 1988. 52 с.) и нет сравнения с результатами других авторов.

4. В списке авторских публикаций, в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, только 9 из 17 отвечают теме докторской диссертации, еще 8 посвящены исследованию теплового контакта твердых тел и связаны с результатами исследований кандидатской диссертации.

5. Имеются недостатки в оформлении:

На стр. 30 слово «*применения*» во фразе «В пределах методология тепловой отработки и *применения* космических систем должна...» следует заменить на слово «*проектирования*».

На рисунках 4.2, 4.4, 4.6, 4.9, 4.11, 4.14, 4.16, 4.20, 4.22, 4.25, 4.27, 4.29, 4.31, 5.13, 5.18, 5.23, 5.28 трудно разобрать отличие значений расчетных и экспериментальных температур. Масштаб рисунков можно было бы увеличить или дать сравнение температур в табличном виде.

В списке литературы имеются опечатки. Так, в п. 172 фамилия одного из авторов *Миков*, а не *Маков*; в п. 236 фамилии авторов, название и объем указаны на русском языке, а место издания и издательство – на английском; п. 241 имеет странную нумерацию 238>241; источники п.п. 237, 239, 242, 243, 248, 249, 255, 270, 271, отсылающие к трудам научных конференций оформлены с отступлением от ГОСТ 7.0.5-2008, 7.0.11-2011; в п. 248 отсутствует название публикации; п 246 и 247 дают ссылку на одну и ту же работу – кандидатскую диссертацию автора, причем в диссертации вместо 2007 года указан 200 год;

По нашему мнению, перечисленные замечания свидетельствуют о том, что А.Г. Викулову мог бы полнее и убедительнее раскрыть научную и практическую значимость своей диссертации. Между тем в ней применена новая эффективная научная методология для моделирования и идентификации теплообмена в конструкции КА на основе моделей с сосредоточенными

параметрами. Приведен ряд примеров, подтверждающих возможность повышения точности и одновременно быстроты получения результатов. Не вызывает сомнения, что данная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое научно обоснованное техническое решение, внедрение которого вносит значительный вклад в развитие космической техники. Ее автор – Алексей Геннадьевич Викулов, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент –

д.т.н., профессор, заведующий
кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические
композитные конструкции» ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана (националь-
ный исследовательский университет)»

Адрес: 105005 г. Москва, ул. 2-я Бауман-
ская, дом 5, стр. 1, телефон +7(499) 263 64-
66, E-mail: sreznik@bmstu.ru

(специальность 05.07.01)

Подпись Резника С.В. заверяю:

Резник Сергей Васильевич



А. Г. МАТВЕЕВ

НАЧ. УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ 8499-263-67-69