

Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.125.08,
ФГБОУ «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет) (МАИ),
доктору технических наук, профессору
Зуеву Юрию Владимировичу

125993 Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамске ш., д.4.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Викулова Алексея Геннадьевича

на тему: Идентификация математических моделей теплообмена в космических
аппаратах

по специальности 01.04.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника
на соискание учёной степени доктора технических наук

Диссертационная работа Викулова А.Г. посвящена исследованию расчетно-экспериментальных (РЭ) методов отработки тепловых режимов космических аппаратов (КА), в частности, решению проблемы идентификации математических моделей, описывающих процессы теплообмена в конструкциях КА и являющихся составной частью расчетно-экспериментального метода тепловой отработки КА.

Актуальность избранной темы.

Как известно, основой расчетно-экспериментального метода тепловой отработки КА является идентификация математических моделей теплообмена, которая служит связующим звеном между математическими и физическими моделями КА, увязывающим между собой результаты испытаний КА или его составных частей и параметры математических моделей, используемые для проведения расчетов тепловых режимов КА.

Очевидно, что при наличии более точной, адекватной математической модели теплообмена при РЭ методах тепловой отработки КА может быть достигнут ряд *косвенных положительных эффектов: сокращения объема испытаний за счет уменьшения количества режимов и продолжительности тепло-вакуумных испытаний (ТВИ); уменьшение необходимого объема вакуумных камер путем замены испытаний полномасштабного КА автономными испытаниями его составных частей; обеспечение возможности планирования теплофизического*

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх № _____
19. 08 2019

эксперимента и организации управления тепловыми режимами при наземных и летных испытаниях КА и др.

Повышение точности РЭ методов исследований теплового режима КА может быть практически достигнуто путем использования автоматизированных информационно-измерительных комплексов, программное обеспечение которых основано на методах решения обратных задач теплообмена (ОЗТ).

В общем же, присутствие связи в виде обратных задач теплообмена между физическими и математическими моделями при РЭ методе тепловой отработки КА и их составных частей позволяет рассматривать физические и математические модели как элементы единой системы, параметры которой настраиваются решением обратных задач теплообмена.

Основной целью своих исследований автор диссертации ставит **математическую формализацию** расчетно-экспериментального метода тепловой отработки КА на основе математического моделирования и решения обратных задач теплообмена, разработку метода итерационной регуляризации решения нелинейных задач на основе вариационного метода А.Н. Тихонова и методологическое обоснование системного применения этих методов для создания новых образцов космической техники.

Автор полагает, что успешное достижение этой цели обусловит получение ожидаемого *прямого положительного эффекта – снижения материальных затрат на создание новых изделий космической техники и увеличения объема проводимых фундаментальных исследований космического пространства путем повышения ресурса КА за счет более точного прогноза его температурного состояния.*

Отмеченные обстоятельства свидетельствуют об **актуальности** темы диссертации.

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

В ходе проведения исследований Викулов А.Г. планомерно и в логической последовательности решает ряд сопутствующих задач, обуславливающих достижение основной цели работы.

Сначала, в гл. 1, им выполнен аналитический обзор большого объема научно-технической литературы **по расчетно-экспериментальным методам тепловой отработки КА, и методам решения обратных задач теплообмена,** касающимся их системного применения в структуре РЭ методов.

Анализ работ по ОЗТ показал, что к настоящему времени РЭ методы тепловой отработки КА и их систем сформированы фактически на основе математического моделирования тепловых процессов с использованием идентифицированных математических моделей. При этом идентификация таких моделей может проводиться успешно как методом итерационной регуляризации на основе

градиентных методов, так и итерационным методом на основе вариационного метода А.Н. Тихонова.

Проведя этот анализ, автор находит, что для решения исследуемой проблемы необходимо дальнейшее развитие ОЗТ и этого можно достичь путем построения вариационного принципа при одновременной итерационной минимизации сглаживающего и температурного функционалов, единого подхода к определению параметра регуляризации вариационного метода А.Н. Тихонова и формулирует **основную идею диссертации о разработке модифицированного метода итерационной регуляризации, основанного на одновременной итерационной минимизации указанных выше параметров и его применения в рамках двухмодельного (с распределенными и сосредоточенными параметрами) метода для идентификации математических моделей теплообмена, использование которого должно повысить точность математического моделирования процессов теплообмена в теплотехнических системах.**

В итоге, на основе проведенных в этой главе предварительных исследований, Викулов А.Г. **обоснованно** приходит к **выводу** о том, что дальнейшее развитие РЭ метода тепловой отработки КА возможно в рамках иерархической идентификации интеграцией в него двухмодельного метода, позволяющего увеличить точность и уменьшить время тепловых расчетов.

Затем, в гл. 2, автором анализируются математические модели теплообмена в конструкциях КА с сосредоточенными параметрами, обеспечивающие точность расчетов стационарных режимов, соизмеримую (по литературным источникам) с точностью расчетов по моделям с распределенными параметрами, и эквивалентны последним в пределах определенной погрешности и в переходных режимах.

Этот факт учтен автором при постановке обобщенной теплофизической задачи идентификации математической модели с сосредоточенными параметрами для КА и их составных частей. В этой задаче использована термодинамическая параметризация, унифицирующая описание физических систем первого порядка производной по времени. Отмечена линейная зависимость полного набора неизвестных коэффициентов обобщенной модели, приводящая к неединственности решения обратных задач идентификации матрицы коэффициентов и на основе теорем математического анализа **сделаны выводы** о возможности идентификации полного набора неизвестных коэффициентов обобщенной модели итерационным методом при наличии первого приближения.

Здесь же на ряде поверочных расчетов им получены аналитические выражения для расчета первых приближений зависимости удельных номинальных значений контактного теплового сопротивления и проводимости тонкостенных многослойных конструкций, характерных для объектов космической техники, от относительной контактной площади и от средней температуры контакта.

Полученные результаты этой главы проиллюстрированы также на примере математической модели теплообмена составной части КА простой конфигурации.

Далее, в гл. 3, автором исследуются математические модели теплообмена с сосредоточенными параметрами и методы регуляризации их решения с обращением особого внимания на условия математической корректности задач теплообмена, устойчивости и единственности их решения.

Затем на основе вариационного метода А.Н. Тихонова Викуловым А.Г. **разрабатываются модифицированный метод регуляризации решения нелинейных задач теплообмена и итерационные алгоритмы регуляризации решения на основе сглаживающего функционала и функционала невязки температуры.** Математически им показано, что в случае неустойчивого решения использование итерационной регуляризации позволяет получить условно устойчивое решение, используя экспериментальную температуру одного узла для идентификации одной координаты искомого вектора.

Анализ метода итерационной регуляризации на основе функционала температурной невязки, проведенный для гипотетической теплофизической системы, позволил автору **получить аналитические выражения для вычисления неопределенных множителей Лагранжа**, входящих в выражения градиента функционала и шага спуска. Приведенный алгоритм обобщен для технических систем, характерных для космических аппаратов герметичного и негерметичного исполнения.

Таким образом, в результате совокупности проведенных исследований автором **сформулирована методология системного применения** этого метода для создания изделий космической отрасли.

В гл. 4 автор работы проводит математический анализ выведенных им соотношений разработанного модифицированного вариационного метода итерационной регуляризации и результатов выполненных им вычислительных экспериментов и исследует свойства и возможности этого метода, суть которого заключается в последовательном приближении к целевой итерации уточнением решения на каждом промежуточном шаге итерации с помощью минимизации сглаживающего функционала и приходит к важным **выводам**:

- полученные им аналитические выражения шага спуска (параметра регуляризации), едины для методов итерационной регуляризации на основе функционала невязки температуры и сглаживающего функционала;

- при замене в выражении шага спуска функции градиента функционала температурной невязки разностью значений искомой функции на двух соседних итерациях получается выражение безразмерного шага спуска, обратного параметру регуляризации;

- в задачах идентификации с неустойчивым решением единое аналитическое выражение шага спуска позволяет получить условно устойчивое решение;

- вариационный принцип, основанный на отборе решений в классе векторов, невязки которых с нормальным решением сопоставимы с точностью задания исходных данных, в задачах с неединственным решением не исключает неединственности решения и требует усиления дополнительными условиями;

- условная устойчивость решения подтверждается сохранением характера расчетных температур и функций при возмущении температурного поля и совпадением решения с функциями, идентифицированными при отсутствии возмущения.

Глава 5 посвящена изложению результатов применения разработанного в диссертации метода идентификации математических моделей теплообмена для определения температурного состояния, теплофизических и оптических свойств некоторых пассивных средств систем обеспечения теплового режима КА: многослойной тепловой изоляции и теплозащиты, сотовых панелей, тепловой проводимости контурных тепловых труб.

Дополнительно, на примере решения математической модели с сосредоточенными параметрами, описывающей теплообмен в составной части КА, состоящего из трех узлов и одного граничного, автор диссертации показывает, что на основе модифицированного им итерационно-вариационного метода регуляризации задачи идентификации такой модели может быть построена методика нетерминального управления тепловой мощностью внутренних источников такого КА. Причем применение её для такой простейшей четырёхузловой модели позволило получить решение уже на первой итерации.

Таким образом, суммируя изложенное в этом разделе отзыва, можно сделать вывод, что проведенная в диссертации автором совокупность теоретических и вычислительных исследований ряда задач рассматриваемой проблемы, обеспечила ему возможность сделать соответствующие **выводы и рекомендации, сформулированные в заключении диссертации.**

3. Новыми результатами исследований следует признать:

- методологическую систематизацию и математическую формализацию тепловой отработки КА на основе расчетно-экспериментального метода с использованием двухмодельного метода математического моделирования итерационной регуляризации решения задач идентификации;
- модифицированный вариационный метод итерационной регуляризации решения задач идентификации и комбинированную методику определения параметра регуляризации на основе минимизации сглаживающего функционала и функционала невязки температуры;
- уравнение для идентификации параметров граничных узлов термодинамически закрытых технических систем;
- аналитические выражения неопределенных множителей Лагранжа, входящих в выражение градиента функционала температурной невязки метода итерационной регуляризации, и аналитические выражения параметра регуляризации вариационно-итерационного метода на основе метода Тихонова;
- формулировку и решение модифицированным вариационно-итерационным методом задачи нетерминального управления тепловой мощностью внутренних

источников обобщенной модели с сосредоточенными параметрами, обеспечивающей для простейшей модели теплообмена в негерметичном КА сходимость к устойчивому решению на первых итерациях.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Теоретическая значимость результатов исследований, изложенных в диссертации, состоит в том, что автором путем математического анализа методов математического моделирования тепловых процессов, с привлечением способов решения обратных задач теплообмена и методов итерационной регуляризации решения задач идентификации, разработан, по сути дела, инструмент для расчетно-экспериментального проектирования систем обеспечения теплового режима (СОТР) создаваемых изделий космической техники.

Приведенные автором работы результаты выполненных им вычислительных экспериментов по определению теплофизических свойств пассивных средств в структурах СОТР КА (теплоизоляция, теплозащита, тепловые трубы и др.) подтверждают возможность использования этого инструмента в **практике создания КА при их тепловой отработке.**

Стиль изложения и объем материала в диссертации соответствует обычному написанию учеными своих специализированных **монографий**. В этой связи диссертация Викулова А.Г. может служить учебным пособием при изучении методов математического моделирования тепловых процессов в технических системах, решения обратных задач теплообмена, методов идентификации (отождествления) параметров математической модели, обеспечивающих требуемую корреляцию теоретических и экспериментальных результатов.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы, вытекающие из содержания диссертации, должны быть доведены до специалистов предприятий, занимающихся расчетно-экспериментальной отработкой тепловых режимов изделий теплотехники, включены в учебные пособия специализированных учебных заведений.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенности

Материалы диссертации изложены в пяти главах в логической последовательности, в достаточном для формулировки выводов объеме и на техническом языке, понятном для специалистов по выбранной тематике. **Завершенность** работы подтверждается достижением поставленной цели и соответствующими содержанию диссертации **выводами (заключением).**

Содержание автореферата в краткой форме повторяет основное содержание диссертации.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом

Основные достоинства диссертации освещены в предыдущих пунктах настоящего отзыва. Особенно следует отметить научно грамотное, логически выстроенное и аккуратное изложение материала, свидетельствующее о высокой квалификации автора работы в области математики, теплофизики и теплотехники.

Что же касается основных замечаний, то **необходимо и полезно** для соискателя по мере их важности выделить следующие:

а) верификация автором разработанного метода двухмодельного математического моделирования, проведенная на физических объектах простейшей конструкции, не достаточно убедительна для уверенного его использования при расчетно-экспериментальной тепловой обработке КА, СОТР которых описывается тепло-гидравлическими математическими моделями;

б) в работе отсутствуют сведения о наличии комплексной вычислительной программы, реализующей возможность проведения теплофизических расчетов по предложенному модифицированному методу (ссылки на Свидетельство её регистрации или приведение в тексте работы её структуры, блок-схемы, инструкций по применению и т.д.). Это может препятствовать возможности широкого практического использования полученных в диссертации результатов исследований;

в) приведенные в работе точности по определению теплового сопротивления пакета ЭВТИ, её излучательной способности и др. не дают представления о математической точности собственно расчетных методов и как она коррелируется с точностью определения тепловых параметров физической модели испытуемого объекта в тепло-вакуумной камере;

г) как уже отмечалось в отзыве, изложение работы автором выдержано в стиле написания специализированной научной монографии – математические действия и операции описываются в неопределенно личной форме: записывается, полагается, преобразуется, аппроксимируется, принимается и т.д. Поэтому по тексту достаточно затруднено установить: это действие предлагается автором или уже известное принятое. Автору следовало бы персонифицировать выполняемые им в диссертации операции.

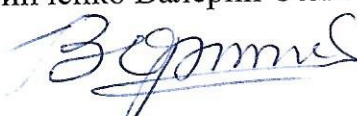
Приведенные замечания не умаляют основного значения, достоинства результатов выполненных Викуловым А.Г. исследований: им разработан новый математический инструмент для проведения теоретических расчетов в системе расчетно-экспериментального метода тепловой обработки тепловых режимов космических аппаратов.

8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Таким образом, диссертация Викулова Алексея Геннадьевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблемы, имеющей важное значение для повышения знаний в области проектирования изделий ракетно-космической техники, в частности, для расчетно-экспериментальной тепловой отработки их теплового режима.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Викулов Алексей Геннадьевич заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» Финченко Валерий Семёнович

 18.08.2019г. /Финченко В.С./

Подпись Финченко В.С. удостоверяю

Заместитель генерального директора по научной работе,

доктор технических наук, профессор



 /Шевченко С.Н./