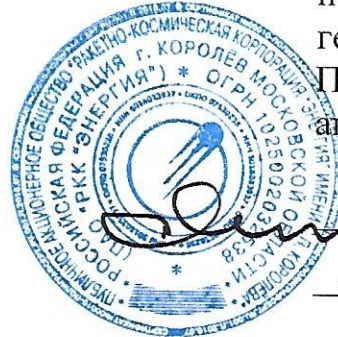


УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор –  
первый заместитель  
генерального директора  
ПАО «РКК «Энергия»,  
академик РАН



Е.А. Микрин

19 08 2019 г.

### Отзыв

ведущей организации 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»

#### 1. Актуальность диссертации.

Распространенным методом наземной тепловой отработки космических аппаратов (КА) и их составных частей (СЧ) является проведение тепловакуумных испытаний (ТВИ), режимы которых определяются предварительным математическим моделированием. Положительные результаты испытаний, подтверждающие расчеты тепловых режимов КА, гарантируют применимость математических моделей теплообмена КА для расчетов тепловых режимов летных испытаний. Однако, в общем случае, требуется уточнение параметров математических моделей по экспериментальным данным, включающее решение задачи идентификации параметров математической модели, сформулированной в виде обратной коэффициентной задачи теплообмена (ОЗТ).

Отработка КА вышеописанным расчетно-экспериментальным методом позволяет:

- заменить часть комплексных испытаний КА автономными испытаниями СЧ;
- уменьшить количество и продолжительность режимов испытаний;
- увеличить точность тепловых расчетов за счет идентификации коэффициентов математических моделей.

В то же время, следует отметить некорректность постановок обратных задач идентификации. Эта проблема может быть решена с помощью различных методов регуляризации, часть из которых (итерационная и Тихоновская регуляризация) обсуждена и использована в работе.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 21-08 20 19 г.

Актуальность диссертации обусловлена необходимостью отработки космических аппаратов с использованием математического моделирования и решения обратных задач теплообмена, включая модификацию метода итерационной регуляризации решения нелинейных задач идентификации математических моделей теплообмена в КА.

## **2. Содержание работы.**

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

Во введении определены цель и задачи работы, показана их актуальность и соответствие приоритетным научно-техническим направлениям.

В первой главе представлен подробный обзор работ по тепловой отработке космических аппаратов с помощью решения обратных задач теплообмена как для моделей с распределенными (МРП) так и сосредоточенными параметрами (МСП). Рассмотрены некоторые аспекты оценки точности решения обратных задач с точки зрения выбора параметра регуляризации.

Во второй главе рассмотрены методы математического моделирования теплообмена КА с точки зрения решения прямых и обратных задач. Рассмотрены проблемы корректности постановок задач идентификации внутренних связей математических моделей теплообмена в космических системах. Проведен термодинамический анализ аналогичных систем, описываемых параболическим уравнением теплопроводности, на основе которого сделаны выводы о внутренних связях термодинамически открытых технических систем. Представлены результаты анализа точности расчета моделей теплообмена.

В третьей главе выполнен анализ методов регуляризации задач идентификации математических моделей теплообмена с сосредоточенными параметрами, в том числе метода Тихонова и метода итерационной регуляризации. Сформирован модифицированный вариационный метод итерационной регуляризации. Получены аналитические выражения для расчета неопределенных множителей Лагранжа при определении градиента функционала и расчета шага спуска. Полученные результаты обобщены для космических систем.

В четвертой главе разработана методика расчета параметра регуляризации итерационного метода на основе вариационного метода Тихонова. Разработанный алгоритм использован для идентификации математической модели теплообмена в СЧ КА и результаты подтверждены вычислительным экспериментом.

В пятой главе разработанные методы применены для идентификации теплового сопротивления сотовой панели (СП) и излучательной способности экранно-вакуумной тепловой изоляции (ЭВИ) по экспериментальным данным, полученным в ТВИ СЧ КА, а также тепловой проводимости

контурной тепловой трубы – по модельным массивам данных. По идентифицированным параметрам построена математическая модель теплообмена в СЧ КА, использованная при его тепловой отработке. На основе идентифицированной математической модели теплообмена решена задача управления мощностью внутренних тепловых источников СЧ КА.

В заключении приведены выводы по диссертационной работе.

### **3. Научная новизна.**

Научная новизна работы состоит в создании комплексного метода тепловой отработки космических аппаратов на основе математического моделирования и решения обратных задач теплообмена, разработка метода итерационной регуляризации решения нелинейных задач на основе вариационного метода Тихонова и методологическое обоснование применения этого подхода при создании новых образцов космической техники.

Предложены методы регуляризации решения задач идентификации математических моделей по экспериментальным данным, определения погрешности тепловых расчетов, объединенные в методологию системной тепловой отработки КА. Методология основана на известных принципах двухуровневого моделирования, иерархической идентификации, вариационного отбора условно корректного решения, которые базируются на использовании математических моделей с сосредоточенными параметрами. Проведена аналогия таких моделей с искусственными нейронными сетями (ИНС), предполагающая возможность общей математической формализации методов решения задач идентификации МСП и ИНС.

### **4. Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Результаты работы позволяют провести тепловой анализ режимов летных испытаний на основе идентифицированных математических моделей теплообмена в соответствии с ГОСТ Р 56468-2015 «Аппараты космические автоматические. Системы обеспечения теплового режима», согласно которому окончательные тепловые анализы (расчет температурных прогнозов для летных испытаний) автоматических космических аппаратов проводятся с использованием математической модели, идентифицированной по термобалансным испытаниям с учетом наземной тепловакуумной отработки аппарата.

Идентифицированные математические модели являются основой оптимального проектирования, планирования теплофизического эксперимента и управления тепловыми режимами КА.

Результаты работы применены при тепловой отработке СЧ КА расчетно-экспериментальным методом.

## **5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы.**

Цель и задачи работы соответствуют пункту «Транспортные и космические системы» перечня «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации» и пункту «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» «перечня критических технологий Российской Федерации».

Результаты работы, изложенные в диссертации, представляют интерес для нашей организации, а также рекомендуются к использованию на следующих предприятиях космической отрасли для повышения эффективности тепловакуумной обработки КА и увеличения достоверности их тепловых расчетов: АО «НПО Лавочкина», АО «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева», АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва», АО «РКЦ «Прогресс».

## **6. Достоверность полученных результатов.**

Модифицированный вариационно-итерационный метод регуляризации проверен вычислительными экспериментами и применен для идентификации тепловой математической модели СЧ КА, обеспечившей требуемую точность расчетов тепловых режимов наземных и летных испытаний. Погрешность расчетов определялась по предложенной в работе методике.

## **7. Публикации по материалам диссертации.**

Работы автора обсуждались на многочисленных конференциях и достаточно подробно освещены в публикациях автора, в том числе, 16 статьях из «Перечня российских рецензируемых научных журналов» (ВАК).

## **8. Замечания по содержанию и оформлению диссертации.**

1. Утверждение о возможности полной замены комплексных испытаний КА автономными испытаниями составной части имеет определенные ограничения, а именно:

1.1 Испытания КА по частям оправдано при определенной архитектуре КА, обеспечивающей минимальность и детерминированность тепловых связей между частями КА.

1.2 Составная часть не всегда может быть выделена из состава КА.

2. При идентификации теплофизических свойств ЭВТИ существенную проблему составляет их зависимость от технологических факторов (степени поджатия при установке на изделие), имеющих случайный характер. С этой точки зрения и с точки зрения оценки точности решения обратных задач (раздел 1.4) статистическая регуляризация выглядит предпочтительнее использованных в работе итерационной и Тихоновской регуляризации.

3. Аналогия моделей с сосредоточенными параметрами и нейросетей недостаточно подробно обсуждена в работе, так как за кадром остался вопрос получения обучающего массива существенного объема, необходимого для обучения нейросетей.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы.

Оформление текста соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным работам.

Автореферат диссертации изложен достаточно четко и дает полное представление о диссертационной работе.

### **9. Заключение.**

Диссертационная работа Викулова Алексея Геннадьевича «Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах» является завершенной научной работой, выполненной на высоком научном уровне, в которой на основании проведенных автором исследований найдены научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит существенный вклад в развитие экономики и повышение технологического уровня страны, и отвечает требованиям «Положений ВАК РФ о порядке присуждения ученой степени доктора технических наук» по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Материалы диссертации Викулова А.Г. «Идентификация математических моделей теплообмена в космических аппаратах» прошли обсуждение на заседании сектора теплообмена отдела аэрогазодинамики и теплообмена от 09.08.2019, по результатам которого был утвержден отзыв.

Главный научный сотрудник, д.ф-м.н.



А. К.Алексеев