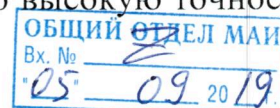


## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана Просунцова Павла Викторовича на диссертационную работу Семены Николая Петровича «Теоретико-экспериментальные методы обеспечения тепловых режимов научных космических приборов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.03. – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

**Актуальность направления научных исследований.** Обеспечение тепловых режимов космических аппаратов является одной из старейших, сложных и до конца не решенных задач их проектирования. Дело состоит в том, что за почти 60 лет истории освоения космического пространства многократно выросли требования к точности обеспечения тепловых режимов. Особенно остро это проявляется при создании специализированных научных приборов, предназначенных для исследования космического пространства. Такие приборы, к числу которых относится и первый российский рентгеновский зеркальный телескоп ART-XC, крайне дорогостоящи, срок их создания составляет многие годы, а требования к температурному режиму необычайно строги. Понятно, что при создании подобной техники необходимо взвешенное использование как теоретических методов, основанных на использовании математического моделирования, так и методов экспериментальной отработки. И здесь очень важно провести разумную грань между двумя этими подходами. Преобладание экспериментальной отработки ведет к неоправданному росту затрат на изготовление и испытание прототипов и вариантов конструкции. В свою очередь желание повысить точность расчетного определения поля температур может привести к использованию крайне подробных конечно-элементных сеток и как следствие – к экспоненциальному росту необходимых вычислительных мощностей. При этом большинство проектных решений разработчикам приходится принимать на самых ранних этапах создания образцов техники и в условиях неопределенности многих параметров.

Все это требует создания новых комбинированных расчетно-экспериментальных методов, сочетающих в себе достаточно высокую точность



моделирования полей температур и тепловых потоков с высокой производительностью. Теоретическую основу таких методов должны составлять теория сложного теплообмена, методы проектирования технических систем и аппарат обратных задач теплообмена, который дает возможность по имеющимся экспериментальным данным определять недостающие или кажущиеся недостоверными параметры. К сожалению, подобные методы, нацеленные на решение задач обеспечения теплового режима сложных научных приборов, в настоящее время отсутствуют. Поэтому тему работы Семены Н.П. следует признать актуальной.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 449 страницы, 140 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 200 источников.

Во **введении** описываются особенности и проблемы обеспечения тепловых режимов космических аппаратов научного назначения. На основании этих особенностей автор предлагает выделить научные космические приборы в отдельный класс объектов терморегулирования и, тем самым, обосновывает заявленную в работе цель разработки методов обеспечения тепловых режимов, специально адаптированных для научных космических приборов. Во введении так же формулируются задачи представленного исследования, определяется новизна и значимость результатов, описывается методология, обосновывается достоверность полученных результатов и перечисляются основные положения и результаты, выносимые на защиту. Некоторые положения автора, изложенные во введении, представляются спорными. В частности, на стр. 9 автор пишет «...Так, традиционно применяемое для теплового моделирования космических устройств сочетание математического конечно-элементного и экспериментального термобалансного методов, во-первых, не обеспечивает требуемую для прецизионных тепловых режимов научных космических аппаратов достоверность предсказания температуры, а, во-вторых, не позволяет проводить моделирование на стадиях разработки концепции прибора...». Известно, что достоверность моделирования температурного состояния научного прибора определяется во многом точностью исходных данных о

характеристиках материалов и значениях тепловых нагрузок. При этом при использовании современных пакетов конечно-элементного моделирования, например Ansys, и построении качественных и достаточно подробных сеток может быть достигнута очень высокая степень точности расчета поля температуры. Однако трудоемкость и длительность такого моделирования будет значительна и целесообразность его проведения на этапе проектирования вызывает сомнения. Таким образом первый аргумент автора не выдерживает критики. Поэтому следует признать, что целью работы является создание совокупности методов физического и математического моделирования направленных на обеспечение тепловых режимов космических приборов и обладающих большей производительностью при достаточно высокой достоверности и применимых прежде всего на этапе проектирования и отработки приборов. А вот итоговые (поверочные) расчеты все-таки остаются за конечно-элементным моделированием с использованием высокопроизводительных компьютеров.

В **первой главе** собран фактический материал по тепловым проблемам, которые решались при реализации различных космических научных экспериментов, в том числе и тех, в которых принимал участия автор работы. Обобщение и анализ этого опыта позволили автору конкретизировать и ранжировать по сложности основные тепловые проблемы современных и перспективных научных приборов. Показано, что обеспечение тепловых режимов научных приборов представляет собой сложную комплексную научно-техническую задачу, решение которой возможно только с учётом тех условий, в которых функционирует космический аппарат и установленные на нем приборы. Автор предлагает разделить космические научные приборы на четыре группы – высокоорбитальные, которые обладают свободой в выборе орбиты и ориентации, что позволяет обеспечить наиболее комфортные тепловые условия для обеспечения прецизионных тепловых режимов; приборы, размещаемые на низкоорбитальных космических аппаратах, например на МКС, в условиях короткопериодических переменных тепловых потоков, затрудняющих обеспечение высокостабильных температурных режимов; планетные приборы,

для которых практически отсутствует возможность оптимизации тепловых условий, являющихся чрезвычайно разнообразными и имеющих циклическую переменность с длительным периодом. Показано, что наиболее проблемными научными приборами для терморегулирования являются микроволновые и инфракрасные телескопы. Вторым по сложности типом астрофизических приборов являются зеркальные рентгеновские телескопы, такие как российский зеркальный рентгеновский телескоп ART-XC, в создании которого автор принимал участие.

**Вторая глава** является теоретической основой работы. В ней автором излагается комплексный метод поиска оптимальных решений по обеспечению тепловых режимов научных приборов, в котором предлагается объединить основные используемые методы математического и экспериментального моделирования в единый метод. В качестве цели объединения декларируется повышение достоверности моделирования и возможность принятия корректных решений по обеспечению тепловых режимов научных приборов на самой ранней стадии разработки их концепции, т.е. по сути обеспечение баланса точности и производительности. В основу объединения положены три принципа: масштабирования, экспериментально-аналитического моделирования и взаимодействия моделей. Под принципом масштабирования понимается, что тепловое проектирование прибора должно продолжаться, непрерывно уточняясь в течение всего процесса его создания от этапа формирования концепции до испытания летного образца прибора. Следует признать, что именно такой подход и применяется в настоящее время в проектной деятельности. Однако автор переносит фокус исследования с конечно-элементных методов, причем даже с «грубой» сеткой, на узловые методы с относительно малым количеством узлов в модели (десятки – сотни – тысячи), что резко повышает производительность метода. Принцип взаимодействия моделей означает, что каждый тип используемой модели обеспечивает максимальную достоверность расчета определенных параметров, и эти параметры используются моделями другого типа как исходные или граничные данные, что также соответствует сложившейся практике теплового проектирования и достаточно широко

используется в пакетах конечно-элементного моделирования. Основной идеей автора, представленной в данной главе является использование для обеспечения приемлемой точности узлового метода принципа экспериментально-аналитического моделирования, в рамках которого проводится определение неизвестных или трудно определяемых значений нагрузок, характеристик материалов, зон контактов, которые используются для уточнения параметров узловой модели и существенно повышают ее точность. Именно данный подход следует признать новым и важным научным достижением данной работы.

В главе приводится ряд примеров реальных приборов, запущенных в космос, для обеспечения тепловых режимов которых применен предлагаемый комплексный метод, в основном они касаются зеркального рентгеновского телескопа ART-XC

В **третьей главе** рассмотрены способы совершенствования методов и средств проведения тепловакуумных испытаний с целью сокращения затрат на проведение экспериментальных исследований, проводимых в соответствии с принципом экспериментально-аналитического моделирования. В качестве одного из таких способов предложено использование короткофокусной двухзеркальной схемы для имитатора солнечного излучения. Так, применение предложенной оптической системы в имитаторе солнца ИСИ-08 позволило разместить ее в вакуумируемой приставке к стандартной вакуумной камере КС-4029, объемом всего 2,5 м<sup>3</sup>. При этом общий вакуумируемый объем увеличился не более чем в 1,5 раза. Второй путь совершенствования средств проведения тепловакуумных испытаний связан с применением нагревательных панелей большой площади для имитатора внешних тепловых потоков. В качестве примера использования теплообменных экранов приведена лабораторная установка ТВУ-0,2, которая была использована для создания тарированных тепловых потоков, также рамках разработанного автором метода экспериментально-аналитического моделирования. Установка была использована для квалификационных испытаний некоторых узлов летного образца телескопа ART-XC обсерватории «СПЕКТР-РГ». Отдельно рассмотрено использование масштабно уменьшенных моделей для экспериментального исследования тепловых режимов научных космических приборов. При этом при

создании масштабно уменьшенной математической модели накладывается в качестве необходимого условия равенства количества узлов и идентичности структуры тепловых связей исходной и масштабно уменьшенной моделях. Применение масштабно уменьшенных моделей проиллюстрировано на примере одного из узлов уменьшенной модели телескопа ART-XC.

**Четвертая глава** посвящена оптимизации подхода к физическому формированию тепловых режимов космических приборов. Предлагаемый подход, называемый автором «тепловым встраиванием», предполагает использовать все тепловые воздействия на внешнюю поверхность прибора для обеспечения его требуемого теплового режима. Регулировку теплообмена с окружающей средой при этом предлагается проводить на основе решения геометрической обратной задачи теплообмена. Данный подход проиллюстрирован несколькими примерами изготовленных и функционирующих в космосе устройств, в частности системы обеспечения теплового режима рентгеновского монитора СПИН-Х1-МВН. Интересным представляется использование анизотропии тепловых условий космического пространства (автор хотя и объясняет данный термин, но он явно нетрадиционен) для определения ориентации космического аппарата по значениям температуры внешней поверхности. Экспериментальное подтверждение работоспособности данного способа получено при определении ориентации российско-австралийского микроспутника «Колибри».

**Пятая глава** целиком посвящена вопросам обеспечения теплового режима первого российского рентгеновского зеркального телескопа ART-XC. Это связано с тем, что данный прибор представляет собой один из наиболее сложных объектов терморегулирования. Наиболее трудной задачей является обеспечение терморегулирования рентгеновских зеркал, входная апертура которых направлена в «холодный» открытый космос, а выходная - в «теплый» внутренний объем прибора. Исходя из низкой продольной тепловой проводимости зеркала, обеспечение малого продольного теплового градиента становится трудновыполнимым. В работе выявлено свойство самофокусировки термдеформированного рентгеновского зеркала, которое позволило все-таки решить данную задачу. В главе описана последовательность и результаты

применения метода поиска оптимальных решений для обеспечения теплового режима телескопа. При этом автор комбинирует использование узловых моделей и конечно-элементных методов. Для нахождения недостоверных тепловых параметров используется их восстановление на основе экспериментальных данных, для чего были использованы результаты термобалансных испытаний натурального габаритно-массового теплового эквивалента телескопа ART-XC и двух тепловых эквивалентов рентгеновской зеркальной системы. После этого определялись параметры, которые необходимо изменить в математической модели для обеспечения необходимого теплового режима телескопа. И наконец на завершающем этапе принимались конкретные конструктивные решения. К примерам таких решений можно отнести установку перед входной апертурой тепловой бленды с рентгенопрозрачным и тепловозвращающим окном. Эффективность принятых конструктивных решений была подтверждена на этапе тепловакуумных испытаний с образцом телескопа для конструкторско-доводочных испытаний.

**В заключении работы** обобщены полученные результаты. **В приложении** представлено краткое описание космических приборов, для которых использовались разработанные методы.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в том, что автором создана система теоретических и экспериментальных методов, которая включает в себя этапы определения неизвестных или трудно определяемых значений тепловых нагрузок, характеристик материалов, зон контактов и уточнение параметров узловой модели, выявление подлежащих корректировке параметров и разработку новых вариантов конструкции, позволяющих обеспечить необходимые тепловые режимы научных космических приборов и приборных комплексов.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в создании новой методологии позволяющей сократить сроки отработки сложных научных приборов для космических аппаратов на основе комбинации расчетных и экспериментальных методов. Апробация предложенных автором подходов, в частности при обеспечении теплового режима первого российского

рентгеновского зеркального телескопа ART-XC, подтвердила их эффективность при проведении наземных конструкторско-доводочных испытаний.

**Автореферат** соответствует содержанию и выводам диссертации, а тема диссертации и её содержание соответствует паспорту специальности 05.07.03. – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

**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 «ИСС им. М.Ф. Решетнева», АО «НПО им. С.А. Лавочкина и других.

**По работе можно сделать следующие замечания:**

1. В работе отсутствует аналитический обзор работ, посвященных созданию методов обеспечения тепловых режимов космических аппаратов и их научных приборов, что затрудняет оценку достижений автора.
2. Автором не формализован принцип, по которому осуществляется выбор математической модели – конечно-элементной или узловой. Так, в п.5.2.2 произведен переход от использования узловой модели к конечно-элементной, но критерий перехода представлен только в качественной форме (очень сложная структура, трудно прогнозируемы тепловые связи).
3. Также автором не формализован принцип выбора точек измерения температуры при термобалансном эксперименте. Лишь отмечается что «...точки могут быть размещены на элементах, критически зависимых от температуры...», хотя известен алгоритм выбора оптимальных точек измерений, основанный на анализе функций чувствительности.
4. Для определения неизвестных или трудно определяемых значений тепловых нагрузок, характеристик материалов, зон контактов и уточнения параметров узловой модели автором используется аппарат обратных задач теплообмена. Однако не сами формулировки обратных



задач, ни анализ их решения в части точности и устойчивости не приведены.

5. Заключение к главам работы имеют большой объем (до 8 страниц) и представляют собой, по сути, краткое изложение главы, а не выводы.

Несмотря на сделанные замечания, 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 – Семена Николай Петрович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.03. – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Официальный оппонент –  
д.т.н., доцент, профессор  
кафедры СМ-13 «Ракетно-космические  
композитные конструкции» ФГБОУ ВО  
«Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский  
университет)»

Адрес: 105005 г. Москва, ул. 2-я  
Бауманская, дом 5, стр. 1, телефон +7(499)  
263-66-20, E-mail: [pavel.prosuntspv@mail.ru](mailto:pavel.prosuntspv@mail.ru)  
(специальность 05.07.07)

Подпись Просунцова П.В. заверяю:

Просунцов Павел Викторович

