

## О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, заведующего лабораторией ФГБУН «Институт космических исследований Российской академии наук»

### **Семены Николая Петровича**

на диссертационную работу **Борщева Никиты Олеговича** на тему: «Методы исследования тепловой модели многоразового элемента конструкции спускаемого космического аппарата с учетом свойства анизотропии»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летальных аппаратов

Диссертационная работа Борщова О.Н. посвящена изучению теплового состояния переднего шпангоута перспективного многоразового транспортного корабля «Орел». Основной задачей автора являлось определение пространственного профиля коэффициентов теплопроводности данного узла в условиях, соответствующих реальному аэродинамическому нагреву в предположении наличия анизотропии теплопроводности.

Очевидно, что аэродинамическое тепловое воздействие несет наибольшие риски для спускаемого модуля космического аппарата. Поэтому отработка теплонагруженных элементов новых космических возвращаемых аппаратов всегда является чрезвычайно **актуальной** задачей. В данном случае ее актуальность повышает то, что космический корабль является многоразовым и обитаемым. Многоразовость требует гораздо большей информативности при исследовании влияния тепловых воздействий на конструкцию. Обитаемость повышает ответственность, а, следовательно, и требование к достоверности полученных результатов. Именно необходимость повышенной информативности и достоверности заставляют строить тепловые математические модели узлов новых космических аппаратов на более глубоком уровне по сравнению с моделями существующих одноразовых спускаемых модулей.

Широкое использование композитных материалов в космической технике делает учет анизотропии еще более востребованным при тепловом моделировании перспективных космических аппаратов. В данных материалах теплопроводность

имеет сильную зависимость от направления внутри материала, поэтому тепловую модель космического аппарата с большим количеством композитных элементов невозможно построить без учета свойства анизотропии.

Для достижения поставленной цели автор использует одну прямую и две обратные тепловые задачи, связанные через физический или расчетный тепловой эксперимент. Первая обратная задача состоит в определении поля радиационного теплового потока, воздействие которого на облучаемую поверхность переднего шпангоута максимально приближено к воздействию аэродинамического нагрева. Результат решения данной задачи позволяет создать систему облучателей, моделирующую близкое к аэродинамическому нагреву поле радиационного потока, поглощенного поверхностью исследуемого шпангоута.

Второй обратной тепловой задачей является восстановление тензора теплопроводности шпангоута из распределения температуры по нему при радиационном тепловом воздействии, определенном на предыдущем этапе. Для решения данной задачи с учетом свойств анизотропии необходимо решить прямую задачу теплопереноса в анизотропных твердых телах.

Необходимо отметить, что в обосновании корректности каждого шага автор представляет анализ привлекаемых методов и моделей. Данный анализ охватывает широкий, иногда даже избыточный, круг вопросов от описания всех существующих тепловых моделей и типов обратных тепловых задач, представленного в главе 1 до подробного описания некоторых методов регуляризации, представленного во 2-ой главе работы.

**Новизной** в работе обладает и постановка задачи и способ ее решения. Обычной задачей теплового эксперимента с полноценным узлом космического аппарата является квалификация его стойкости к определенному температурному режиму (квалификационные испытания), или проверка корректности тепловой модели с одновременной оценкой граничных тепловых режимов (термобалансные испытания). Для определения базовых теплофизических характеристик, к которым относится коэффициент теплопроводности, служат специализированные эксперименты со специально изготовленными образцами, как правило, максимально упрощенной конструкции. Автор ставит задачу определения тензора теплопроводности реального узла космического аппарата по результатам модельного неспециализированного

эксперимента и именно в тех условиях, в которых этот узел будет эксплуатироваться. Такая постановка обладает явными признаками новизны.

Вышеописанный комплексный алгоритм решения этой задачи так же является оригинальным. Несомненное достоинство данного алгоритма состоит в использовании обратных тепловых задач. При преодолении проблем сходимости и устойчивости решений некорректных обратных тепловых задач результаты их применения, как правило, позволяют получить наиболее достоверное решение тепловой проблемы.

Заслуживает одобрения использование автором двух конкурирующих методов решения задачи восстановления тензора теплопроводности – метода регуляризации Тихонова и метода итерационной регуляризации. Это, во-первых, позволило в конечном итоге использовать количественный критерий для окончательного выбора, а, во-вторых, резко снизило вероятность глобальной ошибки решения поставленной задачи за счет перекрестной проверки результатов.

В целом множественность привлекаемых расчетных методов является сильной стороной работы. В этой связи можно отметить успешное использование в третьей главе метода переменных направлений для решения задачи теплопереноса в анизотропных твердых телах, применение трассировки лучей методом Монте-Карло для расчета лучистого теплообмена с многократным переотражением. Кроме этого в работе дается краткая характеристика некоторых неиспользуемых автором методов, например, метода угловых коэффициентов, что говорит о тщательности подхода соискателя к выбору применяемых методов.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов подтверждается экспериментальными данными, показанными в четвертой главе работы и анализом свойств предложенного алгоритма, представленным в пятой главе работы. В ней для двух конкурирующих методов анализируется корректность решения и определяется погрешность результатов. За исключением отдельных аномальных выбросов, которые будут отмечены в перечне недостатков, погрешность расчета методом регуляризации Тихонова составила 4,5%, что можно считать вполне удовлетворительным уровнем.

Полученные результаты обладают как практической, так и теоретической значимостью. **Практическая значимость** состоит в том, что предложенный способ



определения тензора теплопроводности применим для реальных сложных конструкций космических объектов. Важность этого знания может быть проиллюстрирована на примере решенной автором задачи. На передний узел спускаемого аппарата действуют максимальные из всех возможных тепловые потоки. При этом анизотропия теплопроводности этого узла будет определять распределение поглощенной части этого теплового потока по элементам прилегающей конструкции. Это, в свою очередь позволяет оптимизировать схему теплозащиты спускаемого аппарата и повысить степень безопасности экипажа.

**Теоретическая значимость** работы состоит в том, что на базе разнородных прямых и обратных тепловых задач создан алгоритм определения тензора теплопроводности теплонагруженных конструкций.

Однако работа не лишена **недостатков**.

Основные претензии касаются стиля изложения работы. Теоретическую часть работы автор излагает в очень общих терминах и рассуждениях, что более подходит к учебной или справочной литературе. В диссертационной работе необходима адаптация общих рассуждений и моделей к конкретной проблематике работы. В результате текст работы сложен для понимания, поскольку дополнительные усилия требуются для ассоциирования общих теоретических выкладок с конкретными решаемыми автором задачами.

В работе ощущается явный дефицит графического материала. Так, например, на странице 98 дается словесное описание двухуровневой сетки разбиения, которое все равно оставляет некоторые вопросы. В то время как графическое изображение данной сетки было бы более понятным и сократило бы время для восприятия материала.

Без некоторых фрагментов работа только бы выиграла. Так, излишними, по моему мнению, являются общефилософские и тривиальные высказывания, такие, например, как абзац на странице 11 – «Математическое моделирование это один из самых эффективных способов дать обоснованные рекомендации по исследованию какого-либо эффекта ...».

Отдельного внимания заслуживает классификация погрешностей, представленная на странице 43. Во-первых, эта классификация достаточно спорная. Во-вторых, далее в работе она практически не используется. Как и многие другие

фрагменты работы, данную классификацию из диссертации можно исключить без потери ценности проведенных исследований.

Кроме того в работе имеются несогласованные предложения, выпадение слов из предложений и неточности в определении некоторых параметров.

Гораздо меньше претензий к сути работы.

Отсутствует описание взаимодействия экспериментальной и теоретической частей работы. При этом в эксперименте при управлении нагревом не понятен смысл обратной связи по температурному полю, поскольку более логичным было бы сделать потоки и температуры независимыми параметрами.

Необходимо уточнение того, откуда взято реальное значение коэффициента теплопроводности, с которым сравниваются восстановленные компоненты тензора теплопроводности при анализе предложенного алгоритма в разделе 5.3.

Требуется пояснения значительная погрешность (более 0,9) восстановленного компонента  $\lambda_{zx}$  тензора теплопроводности, найденного и методом регуляризации Тихонова и методом итерационной регуляризации.

Целесообразно сделать выводы и выдать рекомендации по результатам использования двух конкурирующих методов в алгоритме восстановления компонентов тензора теплопроводности.

Из вышеизложенного видно, что все содержательные замечания носят частный характер и не снижают общего высокого уровня представленной работы. Что касается стиля, то выражаю надежду, что в дальнейшем автор будет уделять такое же внимание к представлению результатов своих работ, как и к их содержанию.

Таким образом, диссертация Борщова Никиты Олеговича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по исследованию теплового состояния стыковочного узла перспективного космического корабля в предположении анизотропии его теплопроводности с помощью разработанного автором алгоритма. Полученные результаты являются актуальными, новыми, научно обоснованными, имеют высокую теоретическую и практическую значимость.


Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Борщева Никиты Олеговича соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией Астрофизических рентгеновских детекторов и телескопов, доктор технических наук

  
Николай Петрович Семена

Подпись Семены Н.П. удостоверяю,  
заместитель директора, доктор физико-математических наук, профессор РАН

  
Александр Анатольевич Лутовинов

11 мая 2021 г.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН); адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32; тел.: +7(495) 333-52-12, факс +7(495) 333-12-48; e-mail: iki@cosmos.ru; сайт: www.iki.rssi.ru