

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана Просунцова Павла Викторовича на диссертационную работу Салосиной Маргариты Олеговны «Методы исследования и проектирования тепловой защиты солнечного зонда с учетом параметров структуры теплозащитных материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» и 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

**Актуальность работы.** Одной из важных проблем при создании современных образцов космической техники является обеспечение теплового режима бортового оборудования. Особенно остро эта проблема стоит при создании аппаратов, предназначенных для проведения исследований космического пространства вблизи Солнца, на расстоянии от 9 до 60 его радиусов. На таком расстоянии на аппарат действует мощный поток солнечного излучения, а температура его внешней поверхности может достигать 1650 К. Понятно, что обеспечение работы научных приборов возможно только при использовании для защиты от потока солнечного излучения специального теплозащитного экрана. Масса подобного экрана велика и сравнима с массой всей научной аппаратуры. Поэтому, тема работы Салосиной Маргариты Олеговны, направленной на снижение массы тепловой защиты солнечного зонда на основе более полного учета механизмов переноса тепла в материалах экрана и разработке методов оптимального проектирования его конструкции является актуальной.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 159 страниц основного текста, 111 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 111 источников.

**Во введении** обоснована актуальность работы, дан краткий обзор отечественных и зарубежных исследований по теме диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость результатов, обоснована достоверность полученных результатов и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы рассматриваются проекты космических аппаратов для гелиофизических исследований в ближайшей

окрестности Солнца, а также конструкции теплозащитных экранов, разработанные для обеспечения требуемого теплового режима солнечных зондов. Проанализированы факторы, воздействующие на материалы и конструкции солнечного зонда в ближайшем околосолнечном пространстве, и выяснена степень их влияния на тепловое состояние космического аппарата. Автором сделан вывод о том, что определяющую роль в формировании теплового состояния аппарата оказывает поток прямого солнечного излучения, а прочие эффекты, обусловленные радиационным и ударным воздействием высокоскоростных частиц пылевого облака короны Солнца, не оказывают заметного влияния на процесс теплообмена в многослойном теплозащитном экране, и поэтому могут не учитываться при его проектировании. Автором приводится подробный обзор высокотемпературных материалов, которые могут использоваться в конструкции экрана. Сделан вывод, что перспективными для изготовления теплозащитного экрана солнечного зонда являются высокопористые ячеистые углеродные материалы с пористостью 0,82 – 0,98. Ввиду того, что теплофизические характеристики высокопористых ячеистых материалов существенно зависят от параметров структуры, появляется возможность управления характеристиками за счет оптимального выбора данных параметров. Автором предложен алгоритм, объединяющий метод штрафных функций и метод спроектированного лагранжиана, обеспечивающий высокую скорость сходимости даже при отсутствии близкого к оптимальному начального приближения.

**Вторая глава** является теоретической основой работы. В ней излагается разработанный автором метод оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия, в котором в число проектных переменных, кроме традиционных толщин слоев, включены значения пористости и диаметра ячейки углеродного материала. Подробно изложены вычислительные алгоритмы как собственно задачи проектирования, так и прямой задачи теплопроводности в многослойном пакете и краевой задачи для вариаций температуры.

**В третьей главе** представлены структура и особенности разработанного автором программного комплекса. Возможности программного комплекса продемонстрированы при решении задачи проектирования тепловой защиты солнечного зонда с учетом структуры высокопористого ячеистого материала, а также многослойного теплозащитного покрытия летательного аппарата, осуществляющего

спуск в атмосфере Земли. Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности использования данного комплекса при решении широкого круга научных и прикладных задач проектирования многослойных теплозащитных покрытий летательных аппаратов различного назначения.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментальных исследований процесса теплообмена в экспериментальных образцах, изготовленных из высокопористого ячеистого материала RVC foam (ERG Aerospace Corporation, США). При этом для определения характеристик высокопористого ячеистого материала использована методология обратных задач теплообмена. Описана методика подготовки и проведения тепловых испытаний, характеристики использованного экспериментального оборудования, представлены схема температурных измерений и программа испытаний. Приводятся результаты измерений температуры в заданных точках экспериментальных образцов. Значения плотности теплового потока на внешней поверхности нагревательного элемента определялись из решения граничной обратной задачи теплообмена. Описывается алгоритм решения коэффициентной обратной задачи теплообмена по определению теплофизических характеристик высокопористого ячеистого материала. Проведено сравнение теплопроводности исследуемого материала, полученной из решения обратной задачи теплообмена с расчетными характеристиками, полученными на основе математического моделирования радиационно-кондуктивного теплообмена. Показано удовлетворительное согласие результатов расчетных и экспериментальных исследований, что позволило автору сделать вывод о корректности предложенного метода расчета.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований образцов высокопористых ячеистых материалов, существенно различающихся размером ячеек. Рассмотрены подготовка и проведение тепловых испытаний, описывается экспериментальное оборудование и образцы исследуемых материалов, программы нагрева и схема температурных измерений. Приводятся результаты статистической обработки измерений параметров, характеризующих структуру исследуемых материалов. Результаты тепловых испытаний (значение температуры и плотность теплового потока на поверхности нагревательного элемента) использованы для выбора оптимальной толщины слоя высокопористого ячеистого

материала, обеспечивающей минимальное значение удельной массы трехслойного пакета. Показано, что, как и было предсказано теоретически, рациональным является применение для построения экрана пористого материала с минимальным диаметром ячейки.

**В заключении** обобщены полученные результаты исследований и представлены выводы по работе.

**Научная новизна работы** заключается в создании метода оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия высокопористых ячеистых материалов, при котором в число проектных переменных включаются основные параметры структуры материала – его пористость и диаметр ячейки.

#### **Практическая значимость работы.**

Разработанный автором метод оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия, который учитывает параметры структуры ячеистого материала, может быть использован при решении широкого круга прикладных задач, включающих проектирование перспективных систем тепловой защиты космических аппаратов, функционирующих в условиях экстремальных тепловых воздействий, в том числе солнечных и планетарных зондов.

**Достоверность полученных результатов** основывается на применении для построения модели теплопереноса в слое высокопористого ячеистого материала фундаментальных законов сохранения энергии, использовании проверенных принципов реализации алгоритмов численного решения задач и сравнении результатов численного моделирования и полученных экспериментальных данных.

По работе можно сделать следующие **замечания**:

1. Не дано обоснование выбора выражения для вычисления коэффициента ослабления пористой среды (выражение 2.17).
2. Не освещен вопрос о выборе количества и границ спектральных интервалов при вычислении среднего коэффициента ослабления.
3. Автор называет использованный им приближенный метод решения уравнения переноса излучения «диффузионным приближением», хотя правильно было бы использовать название «метод Росселанда».
4. В некоторых местах работы, например, в п. 4.7, автор использует термин «коэффициент теплопроводности», не указывая, о каком собственно

коэффициенте теплопроводности – кондуктивном или эффективном идет речь, что осложняет понимание текста.

Указанные замечания носят частный характер и не снижают общую положительную оценку работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 работах, 5 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК для публикации результатов диссертаций.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Несмотря на сделанные замечания, не вызывает сомнения, что данная диссертация по актуальности, научной новизне и практической значимости соответствует комплексу требований «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Салосина Маргарита Олеговна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук специальностям 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов» и 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)

Просунцов Павел Викторович

Подпись Просунцова П.В. заверяю



**А. Т. МАТВЕЕВ**  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ЕЛ. 8499-263-67-69