

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук, профессора Горского Валерия Владимировича на диссертацию Салосиной Маргариты Олеговны на тему «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»

В настоящее время в России разрабатывается проект «Интергелио-Зонд», в рамках которого должен быть создан космический аппарат (КА) для гелиофизических исследований в ближайшей окрестности Солнца. При этом, как справедливо отмечено в рецензируемой работе, доля массы КА данного типа, которая приходится на тепловую защиту, значительна и сравнима с массой всей научной аппаратуры, что делает актуальной проблему повышения весовой эффективности тепловой защиты, изучению которой и посвящена диссертация Салосиной М.О.

Данная диссертация содержит в своем составе введение, 5 глав и заключение.

При проектировании тепловой защиты большинства КА обычно не существует однозначного пути решения данного вопроса. И в диссертации Салосиной М.О. подробно исследуется лишь одно из возможных направлений создания системы тепловой защиты для КА рассматриваемого типа, основанной на применении высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) на основе стеклоуглерода с пористостью 0,82 – 0,98.

Во введении подробно излагается состояние вопроса, связанного с созданием солнечных зондов и, в частности, отмечается возможность «управления» теплофизическими свойствами ВПЯМ за счет изменения структуры этих материалов.

Здесь четко формулируются все основные атрибуты помещенных в диссертацию результатов исследований, которые позволяют рассматривать эту работу как законченное научно-техническое исследование:

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 7
09 12 2019

- цель проведения исследований и задачи, которые решены для ее обеспечения;
- объект, предмет и методы исследований;
- научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы,
- степень ее апробации.

Здесь же формулируются основные положения, выносимые на защиту, приведен список публикаций автора по теме диссертационных исследований и подробно описана структура диссертации.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору проблемы, связанной с обеспечением теплового режима зонда, летящего длительное время в ближайшей окрестности Солнца.

Здесь, в частности, подчеркивается важность научных проблем, решаемых с помощью зондов, летящих в ближайшей окрестности Солнца, и большой интерес к созданию зондов такого типа, который проявляется:

- и в России, планирующей запустить в 2025 году зонд по проекту «Интергелио-Зонд»;
- и в проекте NASA «Parker Solar Probe» (аппарат был запущен 12 августа 2018 г.);
- и в европейском проекте «Solar Orbiter» (дата запуска - февраль 2020 г.).

Здесь отмечается также:

- что требуемый тепловой режим этих КА в ближайшей окрестности Солнца будет обеспечиваться за счет применения специальных экранов, защищающих КА от воздействия высокоинтенсивного потока прямого солнечного излучения, жестких требованиях к ориентации КА относительно Солнца, организации регулируемого отвода тепла;

- что теплозащитный экран солнечного зонда «Parker Solar Probe», разработанный компанией The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (Laurel, Maryland, USA), представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из слоя высокопористого ячеистого материала на основе стеклоуглерода, расположенного между слоями углерод-углеродного материала (тепловые

свойства конструкции этого типа и являются предметом исследования данной диссертации).

Значительное внимание в этой главе диссертации посвящено также описанию всей совокупности факторов, воздействующих на теплозащитный экран КА, и различных теплозащитных материалов, которые, в принципе, могут быть использованы при изготовлении этого экрана. При этом обращается внимание на перспективность использования в конструкции теплозащитного экрана солнечного зонда высокопористых ячеистых материалов на основе стеклоуглерода с пористостью 0,82 – 0,98, т.е. именно тех материалов, исследованию свойств которых и посвящена диссертация.

Эти материалы обладают высокой жесткостью, достаточной прочностью при сжатии в диапазоне рабочих температур, малой плотностью и невысокой теплопроводностью. Теплоизоляционные свойства данных материалов значительно ухудшаются при высоких температурах в связи с существенным возрастанием в их пространственной сетчатой структуре доли радиационного теплопереноса.

Теплообмен в ВПЯМ в общем случае описывается четырьмя процессами: кондуктивной теплопроводностью через твердый каркас, теплопроводностью через газовую фазу в ячейках, теплообменом за счет конвекции в газовой фазе и радиационным теплообменом в пористой структуре. При невысоких температурах определяющими являются кондуктивная теплопроводность через твердый каркас и конвективный теплоперенос в ячейках, а при высоких температурах на первый план выходит радиационная составляющая теплообмена.

Исключительная сложность протекания теплообмена в пористых средах рассматриваемого класса диктует необходимость использования неких относительно простых расчетных соотношений, полученных на базе аппроксимации экспериментальных данных. Автором проведен анализ литературных данных по этому вопросу, на базе которого выбраны с его точки зрения наиболее разумные подходы для аппроксимационного расчета сложного теплообмена в ВПЯМ.

При этом сделан вывод о том, что в основу разрабатываемого метода проектирования структуры высокопористого ячеистого материала целесообразно

положить физико-математическую модель теплообмена, в соответствии с которой радиационные свойства материала рассчитываются в зависимости от диаметра ячейки и пористости.

Определение оптимальных проектных параметров многослойной теплоизоляции, удовлетворяющих заданному допустимому тепловому состоянию защищаемого объекта, является типичной оптимизационной задачей теплообмена, возникающей при проектировании тепловой защиты.

Одним из основных элементов новизны, на который претендует автор диссертации, является применение двухходового алгоритма решения задачи оптимизационного проектирования. В рамках этого метода сначала решение задачи находится методом штрафных функций, а затем, используя это решение задачи в качестве начального приближения, производится его уточнение с использованием одного из градиентных методов, обладающего хорошей сходимостью.

Завершается глава формулировкой задач, решению которых посвящены остальные части работы.

Вторая глава диссертации посвящена изложению созданного автором нового метода проектирования тепловой защиты с учетом параметров структуры высокопористого ячеистого материала.

Здесь приводится формулировка одномерного уравнения теплопроводности, предназначенного для расчета прогрева многослойного теплозащитного пакета, которая отличается от стандартной формы записи этого уравнения тем, что в одном из этих слоев, изготовленном из ВПЯМ, используются формулы для расчета зависимости теплофизических свойств материала от его пористости, а также учитывается радиационный теплообмен.

При этом представляется важным, что при учете этих факторов автор базируется на результатах многочисленных исследований, опубликованных в литературе, а также на рассмотрении радиационного теплообмена в диффузионном приближении. Естественно, что корректность сформулированного здесь подхода должна быть подтверждена результатами стендовых экспериментов.

Значительная часть второй главы посвящена подробному изложению всех расчетных соотношений, которые используются при решении обратных задач

теплопроводности в рамках отмеченного выше двухконтурного алгоритма. Здесь же приводятся расчетные формулы, используемые при решении прямой задачи теплопроводности.

Третья глава диссертации посвящена оптимальному проектированию многослойного теплозащитного пакета. Ее содержание условно может быть подразделено на две части. Первая из них посвящена созданному автором программному комплексу, который предназначен для поиска оптимальных значений проектных параметров пакета и включает в себя описание:

- его структуры;
- системы организации данных;
- средств разработки программного обеспечения.

В свою очередь, материалы, помещенные далее, иллюстрируют возможности этого комплекса для решения задач, связанных с поиском оптимальных параметров конструкционного пакета в условиях как чисто радиационного нагрева конструкции, так и в условиях полета изделия в атмосфере.

По результатам исследований, помещенным в эту главу, делается обоснованный вывод о возможности широкого использования данного комплекса при решении широкого круга научных и прикладных задач.

Достоверность полученных результатов подтверждается путем сравнения результатов расчетных и экспериментальных исследований.

Четвертая глава диссертации посвящена вопросам, связанным с апробацией используемой автором модели теплопереноса в ВПЯМ на базе сопоставления расчетных данных с результатами экспериментального определения эффективных теплофизических свойств этого материала.

При проведении исследований, результаты которых помещены в данную главу, использовался созданный в МАИ им. С.Орджоникидзе один из наиболее качественных в России теплофизических стендов.

В данной главе приведено подробное описание всей совокупности вопросов, связанных с получением экспериментальных данных по эффективным теплофизическим свойствам теплозащитных материалов, включающее в себя:

- формулировку цели и задачи тепловых испытаний;

- описание используемого оборудования, входящего в состав автоматизированного экспериментально-вычислительного комплекса ВТС-ОЗТ, на котором проводились экспериментальные исследования;

- описание образцов, изготовленных из ВПЯМ марки RVC foam, ERG Aerospace Corporation, которые используются при проведении испытаний;

- схему температурных измерений;

- методику проведения теплофизических испытаний;

- описание результатов экспериментальных исследований, которые являются исходными данными для решения обратной задачи теплопроводности по определению эффективных теплофизических характеристик ВПЯМ;

- подробное изложение принятой на данном стенде методики решения основной обратной задачи теплопроводности, в которой для аппроксимации эффективных теплофизических свойств материала используется линейная комбинация кубических В-сплайнов;

- подробное изложение аналогичной методики решения вспомогательной обратной задачи теплопроводности, предназначенной для определения тепловых потоков на тыльной поверхности образца на базе результатов измерений в керамическом материале ТЗМК-10 с известными теплофизическими характеристиками;

- описание и анализ результатов измерений.

На основании полученных экспериментальных данных проводится верификация используемой автором математической модели радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое высокопористого ячеистого материала.

При этом структура данного высокопористого материала исследовалась с помощью стереоскопического микроскопа, а в результате обработки полученных фотографий построены гистограммы распределения для геометрических характеристик, характеризующих структуру исследуемого материала.

Из результатов сопоставления расчетных и экспериментальных данных автором сделан в определенной степени обоснованный вывод о корректности используемой им модели радиационно-кондуктивного теплообмена в исследу-

емом материале в диапазоне изменения температур, ограниченном величиной 1073 К.

Пятая глава диссертации посвящена вопросу апробации модели расчета радиационно-кондуктивного теплообмена в ВПЯМ разной структуры.

Здесь:

- подробно описаны те же вопросы, связанные с проведением испытаний, что и в четвертой главе;
- проведены измерения геометрических размеров структуры для исследуемых ВПЯМ различных марок, существенно различающихся размером пор;
- получены результаты экспериментальных исследований и проведено сравнение их с результатами расчетных исследований;
- по результатам сопоставления расчетных и экспериментальных исследований сделан обоснованный вывод о корректности методики расчета радиационно-кондуктивного теплообмена в ВПЯМ, используемой автором.

Я полностью согласен с заключением, что основным итогом диссертации является решение научной задачи, которая заключается в разработке методов и алгоритмов оптимального проектирования для многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда, в рамках которых допускается выбор параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.

В работе представлен большой объем расчетных и экспериментальных исследований, свидетельствующих о том, что созданный автором программный комплекс оптимизационного проектирования многослойных конструктивных пакетов пригоден для использования при проектировании летательных аппаратов различного назначения.

Данная диссертация, конечно, не лишена определенных недостатков.

Во-первых, в ней следовало обязательно отметить, что включение в состав конструктивного пакета ВПЯМ сопряжено с введением в расчет полуэмпирических моделей радиационно-кондуктивного теплообмена в этом материале, что сопряжено с возникновением определенных проблем с переносом результатов экспериментальных исследований на натурные условия функционирования изделия. Это, в частности, иллюстрируется материалами, помещенными в четвертую главу диссертации, в которой показано, что при температурах,


превышающих 1000 К расчетные и экспериментальные данные по коэффициенту теплообмену начинают существенно расходиться между собой.

Во-вторых, исследования, относящиеся к использованию новых технических решений, должны включать проведение анализа, свидетельствующего о серьезных преимуществах предлагаемой новой технологии.

В-третьих, имеющийся в моем распоряжении опыт показывает, что применение кубических B-сплайнов в задаче оптимальной аппроксимации результатов расчетных исследований может быть сопряжено с возникновением значительных погрешностей. И в этой связи использование кусочно-линейной аппроксимации функции представляется более предпочтительным.

Несмотря на высказанные замечания, носящие в основном рекомендательный характер, считаю, что данная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор Салосина Маргарита Олеговна заслуживает присвоения ей 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).

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Главный научный сотрудник, д.т.н., профессор  В.В. Горский

Подпись от руки Горского Валерия Владимировича заверяю

Ученый секретарь НТС предприятия, к.ф.-м.н.  Л.С. Точиллов

Акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения»

Адрес: г. Реутов, ул. Гагарина, д. 33, 143966

Тел.: +7(495)528-30-18;

Факс: +7(495)302-20-01;

E-mail: vpk@vpk.npomash.ru