

На правах рукописи



Салосина Маргарита Олеговна

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕПЛОЙ ЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНОГО ЗОНДА С УЧЕТОМ
ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальности

- 05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов
05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН

Алифанов Олег Михайлович

Научный консультант – д.т.н., профессор **Ненарокомов Алексей Владимирович**

Официальные оппоненты:

Горский Валерий Владимирович – д.т.н., профессор,

акционерное общество «Военно-промышленная корпорация «Научно-производственное объединение машиностроения», главный научный сотрудник

Просунцов Павел Викторович – д.т.н., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор

Ведущая организация: акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»

Защита состоится «26» декабря 2019 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в зале Музея истории МАИ, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=108871

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.10

кандидат технических наук, доцент



Денискина А.П.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена созданию математического аппарата для оптимального проектирования многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью повышения весовой эффективности тепловой защиты космических аппаратов (КА), функционирующих в условиях экстремальных тепловых воздействий, в том числе солнечных и планетарных зондов.

Конструкции и системы, входящие в состав солнечных зондов, в течение длительного периода времени подвергаются высокоинтенсивному радиационному тепловому воздействию. Обеспечение допустимого теплового режима данных аппаратов является сложной технической задачей, от практического решения которой зависит успешное выполнение научных задач миссии и возможность реализации проекта в целом.

Допустимый тепловой режим КА обеспечивается за счет применения экрана, защищающего КА от воздействия высокоинтенсивного потока прямого солнечного излучения. Доля массы КА, которая приходится на тепловую защиту, значительна и сравнима с массой всей научной аппаратуры, что делает актуальной проблему повышения весовой эффективности тепловой защиты.

Один из путей её решения связан с применением теплозащитных и теплоизоляционных материалов низкой плотности. Большими потенциальными возможностями для изготовления высокотемпературной теплоизоляции обладают высокопористые ячеистые материалы на основе стеклоуглерода. Теплофизические характеристики высокопористых ячеистых материалов существенно зависят от многих факторов: условий эксплуатации и температуры, используемой технологии производства материала, состава, параметров структуры, свойств исходного сырья. Благодаря этому появляется возможность в процессе производства управлять свойствами получаемых высокопористых ячеистых материалов в достаточно широком диапазоне, создавая материалы с заранее заданными свойствами, имеющие оптимальную для конкретных условий эксплуатации структуру.

Выбор оптимальных параметров структуры высокопористого ячеистого материала совместно с толщинами слоев многослойной теплоизоляции на стадии проектирования теплозащитного экрана является актуальной задачей, решение которой позволит минимизировать массу тепловой защиты.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов оптимального проектирования многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.

Цель диссертационной работы достигается в результате последовательного решения следующих основных **задач**:

1. Анализ факторов, воздействующих на материалы и конструкции солнечного зонда в ближайшей окрестности Солнца, и степени их влияния на тепловое состояние космического аппарата.

2. Разработка метода оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.
3. Экспериментально-расчетное исследование процесса теплообмена в плоском слое высокопористого ячеистого материала методом обратных задач теплообмена.
4. Разработка используемой математической модели теплообмена в высокопористом ячеистом материале, учитывающей его структуру, и её верификация путем сравнения результатов математического моделирования с экспериментальными данными.
5. Разработка и реализация алгоритма оптимального проектирования многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.
6. Верификация разработанного алгоритма путем сравнения результатов вычислительных экспериментов с аналитическими решениями тестовых задач и экспериментальными данными.

Объектом исследования является многослойный теплозащитный экран солнечного зонда.

Предметом исследования является процесс теплообмена в многослойном теплозащитном экране солнечного зонда.

В работе используются теоретические и экспериментальные **методы исследования**. Разработанное программное обеспечение основывается на методах штрафных функций и спроектированного лагранжиана с квадратичной подзадачей для решения задачи оптимизации; методе конечных разностей для решения краевой задачи для нелинейного параболического уравнения второго порядка в одномерной по пространственной переменной многослойной области с произвольными граничными условиями на внешних границах. При определении теплофизических характеристик исследуемых образцов высокопористых ячеистых углеродных материалов используется метод обратных задач теплообмена.

Научная новизна результатов состоит в том, что

- разработан метод оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов;
- для решения оптимизационной задачи разработана вычислительная схема, объединяющая метод штрафных функций и метод спроектированного лагранжиана, позволяющая получать оптимальные решения с высокой скоростью сходимости в условиях отсутствия близкого к оптимальному начального приближения;
- обоснованы факторы, определяющие тепловое состояние тепловой защиты солнечного зонда.

Достоверность разработанного метода и полученных на его основе результатов обеспечивается обоснованностью принятых исходных предпосылок и допущений, и подтверждается согласованностью результатов математического моделирования с экспериментальными данными и аналитическими решениями отдельных задач.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в создании

метода и алгоритма для оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов. Реализующее разработанный алгоритм программное обеспечение может использоваться 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.

На защиту выносятся:

- метод оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов;
- результаты выбора параметров теплозащитного экрана солнечного зонда и многослойного теплозащитного покрытия летательного аппарата, осуществляющего спуск в атмосфере Земли, а также оптимальной структуры высокопористых ячеистых материалов;
- результаты анализа теплофизических характеристик образцов высокопористых ячеистых материалов с разной структурой.

Апробация работы проводилась на международных и российских научно-технических конференциях. В частности, на 69-ом Международном астронавтическом конгрессе (Бремен, Германия, 2018), 5-ой Международной конференции по методам обратных задач (Жешув, Польша, 2019), 7-ой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018), 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2018), XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов РКК «Энергия» им. С.П.Королева (г. Королев, 2017), конференции «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017), на конференции «XL Академические чтения по космонавтике» (Москва, 2016), XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену, (Минск, Республика Беларусь, 2016), международной конференции «Eurotherm Seminar № 109 Numerical Heat Transfer 2015» (Варшава, Польша, 2015), на 8-ом, 9-ом и 10-ом Всероссийском молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2016, 2017, 2018).

Личный вклад автора в проведенное исследование

Автором разработан метод, алгоритм и соответствующее программное обеспечение для оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов; проведены расчеты по выбору оптимальных параметров тепловой защиты, включающей слои высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ); обработаны и проанализированы экспериментальные данные, полученные для образцов высокопористых ячеистых материалов с разной структурой; определен комплекс теплофизических характеристик ВПЯМ методом обратных задач теплообмена. Автор лично принимал участие в работах по подготовке экспериментальных исследований образцов высокопористых ячеистых материалов, участвовал в разработке технического задания на проведение экспериментальных

исследований и методики проведения тепловых испытаний.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 14 работ, 5 из них – в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы; содержит 159 страниц основного текста, 111 рисунков, 19 таблиц, список литературы из 111 наименований.

Содержание

В первой главе диссертационной работы приведен краткий обзор разрабатываемых в настоящее время теплозащитных экранов солнечных зондов и высокотемпературных материалов, представляющих интерес для использования в конструкции экрана. Рассмотрены факторы, воздействующие на материалы теплозащитного экрана солнечного зонда в ближайшей окрестности Солнца. Показано, что существенное влияние на тепловое состояние космического аппарата оказывает только тепловое излучение Солнца; эффекты, обусловленные радиационным воздействием и ударным воздействием высокоскоростных частиц пылевого облака короны Солнца, не оказывают заметного влияния на процесс теплообмена в многослойном теплозащитном экране, и могут не учитываться при его проектировании. Проведен краткий анализ существующих математических моделей теплообмена в плоском слое ВПЯМ, учитывающих зависимость плотности потока излучения от структуры материала. Сформулирована математическая постановка задачи исследования. Рассмотрены существующие методы оптимизации многослойных теплозащитных покрытий. Обоснована целесообразность разработки вычислительной схемы, сочетающей метод штрафных функций и метод спроектированного лагранжиана, для решения задачи оптимизации.

Постановка традиционной для теплового проектирования оптимизационной задачи подразумевает определение толщин слоев, обеспечивающих минимум удельной массы покрытия при соблюдении заданных ограничений на максимальные температуры в слоях. В данной работе наряду с толщинами слоев многослойной изоляции d_l в число проектных параметров включаются диаметр ячейки a и пористость δ , характеризующие структуру ВПЯМ.

Искомый вектор проектных параметров \mathbf{p} должен обеспечить минимум массы единицы площади поверхности покрытия, которая определяется функцией:

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{l=1}^L \rho_l d_l, \quad (1)$$

ρ_l – плотность; для слоя ВПЯМ $\rho_l = (1 - \delta)\rho_{ТВ}$, $\rho_{ТВ}$ – плотность материала, образующего структуру ВПЯМ; δ – пористость ВПЯМ, при ограничениях

$$d_l > 0, l = 1, 2, \dots, L, \quad (2)$$

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \quad (3)$$

$$0,85 \leq \delta \leq \delta_{\max}, \quad (4)$$

$$T(X_l, \tau) \leq T_{lim}^l, l = 1, 2, \dots, L, \tau \in (\tau_{min}, \tau_{max}], \quad (5)$$

где T_{lim}^l - значения предельно допустимых температур на границах слоев X_l , $l = 1, 2, \dots, L$, a – диаметр ячейки ВПЯМ.

Существующие методы решения задачи оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия подразумевают, что теплофизические характеристики всех материалов известны в широком диапазоне температур. Требуемая информация о теплофизических характеристиках может быть получена в результате тепловых испытаний образцов рассматриваемых материалов или математического моделирования их теплофизических свойств. Предлагаемый в данной работе алгоритм позволяет оценить оптимальные для конкретных условий эксплуатации пористость и диаметр ячейки ВПЯМ совместно с толщинами слоев. Данный подход дает возможность расширить область поиска оптимальных параметров тепловой защиты, включающей слои из высокопористых ячеистых материалов, способствуя повышению эффективности решения задачи оптимального проектирования.

Во второй главе представлен алгоритм оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.

Рассматривается многослойное теплозащитное покрытие, состоящее из L слоев различных материалов толщиной d_l и плотностью ρ_l , $l=1, 2, \dots, L$. Проектируемая система эксплуатируется в условиях вакуума. Предполагается, что процесс распространения тепла в покрытии является одномерным по пространственной координате и описывается уравнением теплопроводности, коэффициенты которого C_l , λ_l зависят от температуры. Тогда поле температуры $T_l(x, \tau)$ в l -ом слое, $l \neq n$, где n соответствует слою, изготовленному из высокопористого ячеистого материала, описывается следующей системой уравнений:

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial x} \right), x \in (X_{l-1}, X_l), l \neq n, \tau \in (\tau_{min}, \tau_{max}]. \quad (6)$$

$$T_l(x, \tau_{min}) = T_0, \quad x \in [X_{l-1}, X_l], \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (7)$$

На границах могут быть заданы граничные условия I, II или III рода, или условие теплообмена, учитывающее тепловой поток, излучаемый нагретой поверхностью экрана:

$$-\lambda_L(T_L(X_L, \tau)) \frac{\partial T_L(X_L, \tau)}{\partial x} = -q_R(\tau) + q_{изл}, \quad \tau \in (\tau_{min}, \tau_{max}], \quad (8)$$

где $q_R(\tau)$ - плотность радиационного теплового потока, $q_{изл}$ – плотность теплового потока, излучаемого нагретой поверхностью экрана.

Контактный теплообмен между слоями $l \neq n$ характеризуется контактными термическими сопротивлениями R_l , являющимися функциями температуры.

Радиационно-кондуктивный теплообмен в слое теплозащитного покрытия, изготовленном из высокопористого ячеистого материала, описывается уравнением:

$$C_n \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_R(x)}{\partial x}, \quad (9)$$

$$C_n = (1 - \delta) \rho c_{тв}, \quad \lambda_n = \frac{1}{3} (1 - \delta) \lambda_{тв}.$$

При высоких температурах доминирующим механизмом теплопереноса является излучение, и радиационная составляющая теплопроводности ВПЯМ значительно превышает кондуктивную. Плотность радиационного теплового потока может быть получена только путем численного решения уравнение переноса излучения, требующего больших вычислительных ресурсов. Поэтому в рассматриваемой задаче для определения плотности потока результирующего излучения в слое теплозащитного материала используется диффузионное приближение, применимое для сред с большой оптической толщиной. Данное приближение приводит к заметным ошибкам при описании процесса вблизи границ, так как в нем не учитывается излучение от граничных поверхностей. Однако внутри оптически толстого слоя влияние граничных эффектов пренебрежимо мало, поскольку излучение от граничных поверхностей не достигает внутренних слоев. Диффузионное приближение позволяет получить простые выражения для плотности потока излучения, и для приращений этой величины по определяемым параметрам, которые в дальнейшем используются в алгоритме решения задачи оптимизации:

$$q_R = -\lambda_R \frac{dT}{dx}, \quad \lambda_R = \frac{16n^2 \bar{\sigma} T^3}{3\beta_R}$$

Усредненный показатель преломления среды можно принять равным 1 ввиду высокой пористости рассматриваемого ВПЯМ (~97 %).

Влияние поглощения и рассеяния среды на радиационный теплообмен учитывается только через средний по Росселанду коэффициент ослабления β_R :

$$\frac{1}{\beta_R} = \int_0^\infty \frac{1}{\beta_\lambda^*} \frac{\partial I_{\lambda b}(T)}{\partial I_b(T)} d\lambda, \quad \beta_\lambda^* = \alpha_\lambda + \sigma_\lambda^*$$

Для учета анизотропии рассеяния излучения вводится транспортный коэффициент:

$$\sigma_\lambda^* = \sigma_\lambda \cdot \left(1 - \langle \cos \theta \rangle_\lambda \right), \quad \langle \cos \theta \rangle_\lambda = \frac{1}{2} \int_0^\pi \Phi(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta$$

Индикатриса рассеяния открытоячеистой структуры, полученная с помощью численных методов статистического моделирования, близка индикатрисе рассеяния больших выпуклых белых (диффузно отражающих) частиц, ориентированных случайным образом. Диаграмма рассеяния, обусловленная отражением от таких частиц, тождественна с диаграммой рассеяния при отражении от больших сферических частиц из того же вещества с теми же свойствами поверхности. Рассеяние света большими сферическими частицами, отражение излучения от

поверхности которых является полным и диффузным и подчиняется закону Ламберта, описывается следующим выражением:

$$\Phi(\theta) = \frac{8}{3\pi} (\sin\theta - \theta \cos\theta). \quad (10)$$

Для функции (10) средний косинус угла рассеяния равен $\langle \cos\theta \rangle \approx -4/9$.

Поскольку предполагается, что узлы и стержни, образующие структуру ВПЯМ, непрозрачны, рассеяние ограничивается диффузным отражением, спектральное альbedo ω_λ равно спектральной отражательной способности материала ρ_λ :

$$\beta_\lambda^* = (1 - \rho_\lambda) \cdot \beta + \rho_\lambda \cdot \beta \cdot \left(1 + \frac{4}{9}\right), \quad \frac{1}{\beta_R} = \frac{1}{\beta_0} \int_0^\infty \frac{1}{(1 + 0,4444\rho_\lambda)} \frac{\partial I_{\lambda b}(T)}{\partial I_b(T)} d\lambda.$$

В основе технологии производства стеклоуглеродных ВПЯМ лежит процесс пиролиза высокопористой открытоячейистой органической матрицы, например, пенополиуретана (ППУ), предварительно пропитанного фенолоформальдегидной смолой. Структура полученных таким образом материалов представляет собой пространственный каркас, образованный стержнями, соединяющимися в узлах. Основными параметрами, описывающими структуру материала, являются средний размер ячейки и пористость, характеризующая пространство внутри ячеек. Полученные с помощью методов статистического моделирования теоретические результаты показывают, что данные параметры оказывают наибольшее влияние на радиационные свойства ВПЯМ. Таким образом, коэффициент ослабления материала β рассчитывается в зависимости от среднего диаметра ячейки и пористости:

$$\beta = \frac{2,62\sqrt{1-\delta} \left[1 + 0,22(1-k)^2\right] \left[1 - 0,22(1-t)^2\right]}{a}, \quad (11)$$

где $t = b_{min}/b_{max}$ – отношение минимального и максимального диаметров стержня (рисунок 1), k – параметр, учитывающий форму поперечного сечения стержня (рисунок 2).

Алгоритм решения оптимизационной задачи основывается на методе штрафных функций, применяемого в качестве средства поиска близкого к оптимальному начального приближения, и методе спроектированного лагранжиана, обладающего высокой скоростью локальной сходимости. Вспомогательная функция, минимизируемая при фиксированном значении параметра штрафа имеет вид:

$$P(\mathbf{p}, r) = J(\mathbf{p}) + r \left(\sum_{k=1}^K \frac{1}{p_k} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{T_i(\mathbf{p})} \right), \quad (12)$$

где K – количество простых ограничений на переменные; T_i – ограничения на температуру границ слоев, которые в результате конечно-разностной аппроксимации краевой задачи на сетке с N_t узлами по времени представляются в виде:

$$T_i = T_{lim}^i - T(X_j, \tau_j), \quad i=1,2,\dots,L, j=1,2,\dots, N_\tau$$

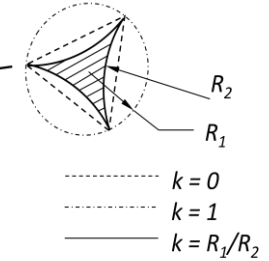
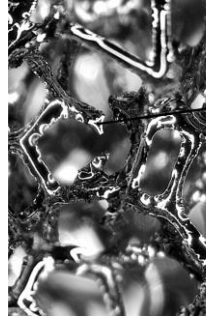
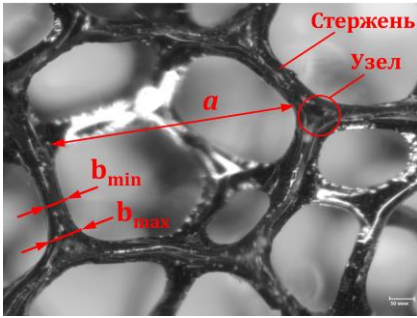


Рис. 2 – Форма поперечного сечения стержня

Рис. 1 – Параметры структуры ВПЯМ

Локальный минимум вспомогательной функции (12) при фиксированном значении параметра штрафа r ищется методом Дэвидона-Флетчера-Пауэлла. Вспомогательная функция минимизируется до тех пор, пока два последовательных значения P_k и P_{k+1} не станут такими, что $\left| \frac{P_k - P_{k+1}}{P_k} \right| < \varepsilon_o$ и $r_k P_k < \varepsilon_o$, где ε_o - наперед заданное значение погрешности решения задачи. Найденное таким образом приближение оптимального решения задачи затем уточняется методом спроектированного лагранжиана с квадратичной подзадачей.

Согласно данному методу в искомой оптимальной точке \mathbf{p}^* достигается минимум функции Лагранжа $L(\mathbf{p}, \Psi) = J(\mathbf{p}) - \Psi^T \mathbf{T}$, (Ψ^T - вектор множителей Лагранжа; $\mathbf{T}(\mathbf{p})^T = \{T_{lim}^1 - T(X_1, \tau_1), \dots, T_{lim}^L - T(X_L, \tau_{N_\tau})\}$ - вектор ограничений) на множестве векторов, ортогональных градиентам активных в точке \mathbf{p}^* ограничений. Искомое решение должно удовлетворять условиям:

$$1) T_{lim}^i - T(X_j, \tau_{N_j}) \geq 0, \quad i=1,2,\dots,L, j=1,2,\dots, N_j; \text{ причем } \mathbf{T}(\mathbf{p}^*)=0; \quad (13)$$

$$2) \text{grad}J(\mathbf{p}^*) = \mathbf{A}(\mathbf{p}^*)^T \Psi^*; \quad (14)$$

$$3) \Psi_i^* \geq 0, \quad i=1,2,\dots,t; \quad (15)$$

$$4) \text{Матрица } Z(\mathbf{p}^*)^T H(\mathbf{p}^*, \Psi^*) Z(\mathbf{p}^*) \text{ положительно определена,} \quad (16)$$

где $Z(\mathbf{p}^*)$ - матрица, столбцы которой формируют базис подпространства векторов, ортогональных строкам $\mathbf{A}(\mathbf{p}^*)$.

Очередное приближение оптимального вектора проектных параметров \mathbf{p}^{i+1} имеет вид:

$$\mathbf{p}^{i+1} = \mathbf{p}^i + \gamma^i \mathbf{s}^i$$

Направление \mathbf{s}^i определяется в результате решения подзадачи, целевая функция которой представляет собой квадратичную аппроксимацию функции

Лагранжа, а система ограничений определяет множество точек, в которых равна нулю линейная аппроксимация нелинейных ограничений T . Квадратичная подзадача формулируется следующим образом:

$$\Phi_L = \mathbf{g}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T H \mathbf{s} \text{ при ограничениях } A(\mathbf{p})\mathbf{s} \leq -T, \quad (17)$$

где $\mathbf{g} = \text{grad}J(\mathbf{p}) - A(\mathbf{p})^T \Psi$ – градиент функции Лагранжа.

В общем случае, когда заранее неизвестно, какие ограничения будут активны в процессе решения, для квадратичной подзадачи (17) используется техника рабочего списка – учет перечня ограничений, интерпретируемых в процессе поиска минимума как равенства. Алгоритм строится по принципу генерирования последовательности допустимых точек с монотонно убывающими значениями целевой функции. Имея текущее допустимое приближение \mathbf{p} , очередное вычисляют как:

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{p} + \sigma \Delta \mathbf{p},$$

где σ – длина шага вдоль направления $\Delta \mathbf{p}$. Направление поиска ищется среди векторов, ортогональных строкам A и удовлетворяющих условию:

$$A \Delta \mathbf{p} = 0 \text{ или } \Delta \mathbf{p} = Z \Delta \mathbf{p}_z$$

Вектор $\Delta \mathbf{p}_z$ является решением линейной системы:

$$Z^T H Z \Delta \mathbf{p}_z = -Z^T \mathbf{g}$$

Чтобы очередное приближение $\tilde{\mathbf{p}}$ было допустимым, шаг σ не должен нарушать ограничений, не содержащихся в рабочем списке. Если точка $\tilde{\mathbf{p}} + \Delta \mathbf{p}$ является допустимой, шаг σ принимается равным единице. В противном случае σ принимается равным шагу, при котором становится активным «ближайшее» ограничение, добавляемое в рабочий список.

Затем оценивается вектор множителей Лагранжа Ψ :

$$H \mathbf{s} + \mathbf{g} = A^T \Psi$$

Ограничения, соответствующие отрицательным компонентам вектора Ψ , выводятся из рабочего списка. Значение длины шага γ^i определяется как приближенное решение задачи одномерной безусловной минимизации модифицированной функции Лагранжа вида:

$$L_A(\mathbf{p}, \Psi, r) = J(\mathbf{p}) - \Psi^T T(\mathbf{p}) + \frac{r}{2} T(\mathbf{p})^T T(\mathbf{p}),$$

где r – параметр штрафа, обеспечивающий реализацию локального минимума в безусловно стационарной точке, найденной из достаточного условия оптимальности (13 – 16). Найденная точка считается оптимальной, если выполнены следующие условия:

$$\frac{\gamma \|s\|}{(1 + \|p\|)} \leq \varepsilon_o; \frac{\|Z^T g\|}{(1 + \max(1 + |J(p)|, \|g_F(p)\|))} \leq \varepsilon_o; |T_j| \leq \varepsilon_c, \quad (18)$$

где ε_o – наперед заданное значение погрешности решения задачи оптимизации, ε_c – заданное значение погрешности выполнения ограничений, $g_F(p)$ – вектор, составленный из компонент градиента функции Лагранжа, соответствующих свободным переменным.

Матрица градиентов ограничений $A(p)$ вычисляется на основе решения краевой задачи для вариаций температуры.

Алгоритм решения прямой краевой задачи и краевой задачи для вариаций температуры строится по единой схеме и основывается на монотонной и абсолютно устойчивой конечно-разностной схеме Самарского, аппроксимирующей исходное нелинейное параболическое уравнение разностными аналогами со вторым порядком точности по пространственной координате. Корректность алгоритма и вычислительного кода для решения краевых задач проверена на тестовых задачах, имеющих аналитическое решение.

В третьей главе представлены результаты оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия. Приводятся структура и особенности вычислительного комплекса (рисунок 3), предназначенного для численного решения задачи оптимального выбора параметров структуры ВПЯМ совместно с толщинами слоев многослойной теплоизоляции.

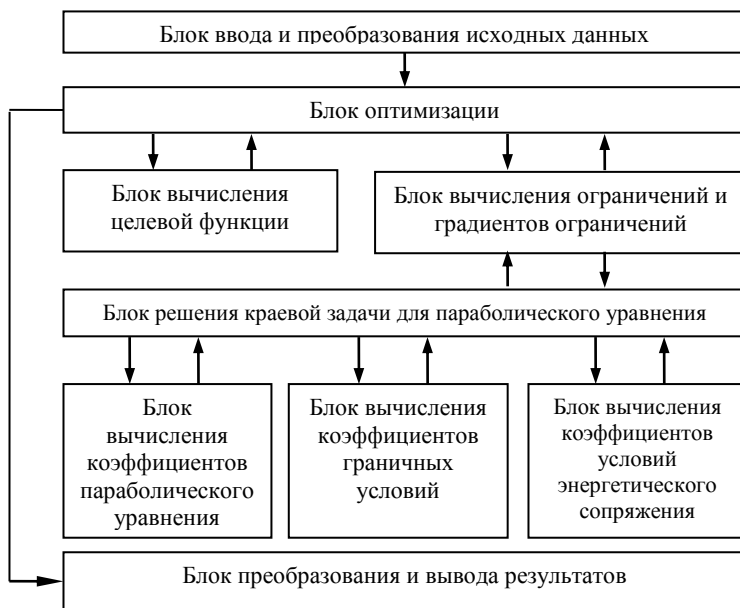


Рис. 3 – Схема вычислительного комплекса

Для проверки работоспособности разработанного комплекса рассматривается задача выбора толщин плоского трехслойного теплозащитного экрана солнечного зонда. Внешние слои экрана 1 и 3 изготовлены из углерод-углеродного композиционного материала, а промежуточный слой 2 – из высокопористого ячеистого углеродного материала.

При решении задачи проектирования теплозащитного экрана солнечного зонда в общем случае могут быть выбраны оптимальные толщины трех слоев совместно с пористостью и диаметром ячейки, характеризующими структуру ВПЯМ слоя 2.

Тепловое состояние рассматриваемой системы в разной степени зависит от данных параметров. Согласно результатам расчетов наибольшее влияние на тепловое состояние экрана оказывают параметры, характеризующие слой, изготовленный из ВПЯМ: толщина слоя (d_2), пористость (δ) и диаметр ячейки (a) ВПЯМ. Температура нагреваемой поверхности экрана $T(X_3)$ близка к равновесной для данного расстояния от Солнца, определяется, в основном, оптическими характеристиками поверхности и слабо зависит от рассматриваемых параметров. На температуру тыльной поверхности экрана сильное влияние оказывают интегральная степень черноты поверхности, толщина слоя 2, пористость и диаметр ячейки ВПЯМ. Таким образом, в качестве определяемых параметров целесообразно выбрать толщину слоя ВПЯМ, а также характеризующие его структуру пористость и диаметр ячейки, оказывающих наибольшее влияние на тепловое состояние экрана, а толщины слоев УУКМ 1 и 3 могут быть заданы, исходя из прочностных или технологических требований.

Учитывая, что разности температур на границах слоев $T(X_1) - T(0)$ и $T(X_3) - T(X_4)$ малы при любых значениях параметров, в качестве ограничения в задаче оптимизации может быть задано значение максимально допустимой температуры тыльной поверхности экрана, которая ограничивалась значением 350 К. Ограничения на переменные, характеризующие структуру материала, задавались с учетом информации о выпускаемых промышленностью высокопористых ячеистых материалах на основе стеклоуглерода: $0,85 \leq \delta \leq 0,98$, $0,36 \leq a \leq 5,08$ мм.

Оптимальные значения параметров, характеризующих слой ВПЯМ определялись для диапазона плотностей теплового потока солнечного излучения $10 - 1800$ кВт/м², соответствующих орбитам КА с радиусами перигелия $0,374 - 0,084$ а.е. Так как движение КА в окрестности перигелия орбиты происходит в течение длительного промежутка времени, за который процесс теплообмена в многослойном покрытии становится стационарным, в качестве внешнего теплового воздействия на КА рассматривался тепловой поток постоянной плотности, рассчитанной для минимального радиуса перигелия орбиты.

Оптические характеристики покрытия внешней обращенной к Солнцу поверхности принимаются равными $\alpha_s = 0,33$, $\varepsilon = 0,47$. Интегральная полусферическая степень черноты тыльной поверхности экрана составляет 0,837.

Начальные приближения искомых параметров принимались следующими: толщина пористого слоя 0,1 м, пористость и диаметр ячейки ВПЯМ 0,965 и 0,56 мм соответственно. Результаты решения задачи оптимизации представлены на

рисунках 4 -6.

Для любого значения плотности потока солнечного излучения из рассматриваемого диапазона оптимальная пористость равна верхней границе, а оптимальный диаметр ячейки – нижней границе, заданных для данных переменных. Полученный результат хорошо согласуется с теоретической моделью теплообмена в пористом слое, лежащей в основе разработанного алгоритма, подтверждая его работоспособность и надежность.

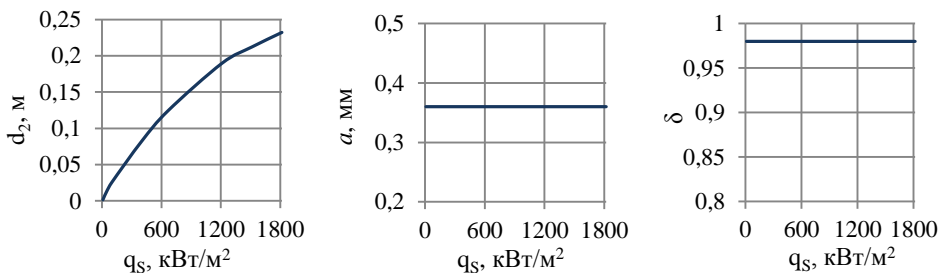


Рис. 4 – Оптимальные значения параметров в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения q_s

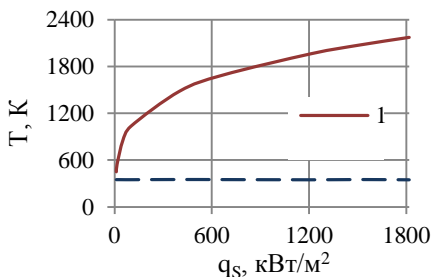


Рис. 5 – Температура нагреваемой (1) и тыльной (2) поверхности экрана в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения q_s .

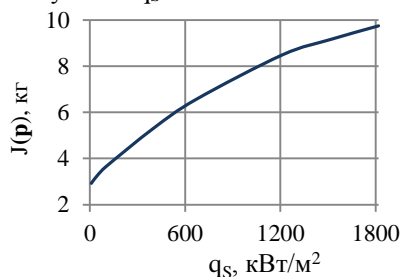


Рис. 6 – Масса единицы площади поверхности покрытия в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения q_s

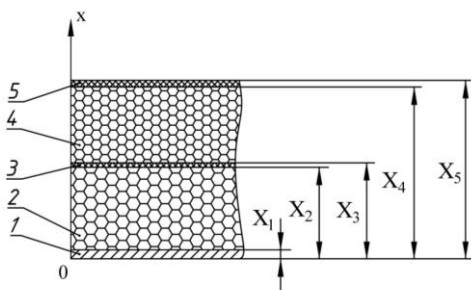
Для иллюстрации возможностей разработанного алгоритма рассматривается задача проектирования многослойного теплозащитного покрытия ЛА, осуществляющего спуск в атмосфере Земли. Покрытие, состоящее из 4 слоев различных материалов в соответствии с рисунком 7, расположено на оболочке корпуса ЛА, выполненной из алюминиевого сплава.

Определяемыми параметрами в данной задаче являются толщины слоев 2 (d_2) и 4 (d_4) и значения пористости, характеризующие структуру материалов, образующих слои 2 и 4 (δ_2 и δ_4). Диаметр ячейки высокопористых ячеистых материалов на основе стеклоуглерода и карбида кремния, образующих слои 2 и 4, принимается равным 0,36 мм.

Плотность теплового потока, воздействующего на защищаемый элемент конструкции ЛА, меняется в соответствии с зависимостью, представленной на рисунке 8. Интегральная полусферическая степень черноты внешней поверхности покрытия принимается равной 0,92. Внутренняя поверхность обшивки ЛА предполагается теплоизолированной.

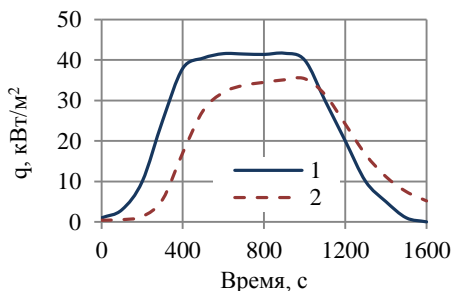
В качестве ограничений задавались максимальные температуры на границах слоя ВПЯМ на основе стеклоглерида: 300 К – на внутренней и 623 К – на внешней границах с координатами X_1 и X_2 соответственно. Максимальная пористость ВПЯМ на основе стеклоглерида ограничивалась значением 0,98, а для ВПЯМ на основе карбида кремния – значением 0,95, что соответствует максимальным значениям пористости производимых материалов данного состава.

Начальные приближения искомым параметрам принимались следующими: толщины пористых слоев $d_2 = 0,1$ м и $d_4 = 0,1$ м, пористость ВПЯМ $\delta_2 = 0,95$ и $\delta_4 = 0,9$. Начальное значение массы единицы площади поверхности покрытия составляло 47,89 кг.



1 – обшивка аппарата ($d_1 = 2,5$ мм); 2 – ВПЯМ на основе стеклоглерида; 3 – УУКМ ($d_3 = 1$ мм); 4 – ВПЯМ на основе карбида кремния; 5 – карбид кремния ($d_5 = 2$ мм)

Рис. 7 – Схема многослойного теплозащитного покрытия ЛА



1 – плотность конвективного теплового потока, поступающего из пограничного слоя;
2 – плотность теплового потока, излучаемого нагретой поверхностью

Рис. 8 – Тепловое воздействие на ЛА

В результате решения задачи получены искомые характеристики: $d_2 = 0,061$ м и $d_4 = 0,0765$ м, пористость ВПЯМ $\delta_2 = 0,98$ и $\delta_4 = 0,95$. При этом масса единицы площади поверхности покрытия равна 22,046 кг. Зависимости температур на границах слоев покрытия от времени показаны на рисунке 9.

В четвертой главе представлены результаты тепловых испытаний образцов ВПЯМ RVC foam, ERG Aerospace Corporation (США) в условиях нестационарного радиационно-кондуктивного нагрева в вакууме. В процессе проведения тепловых испытаний реализуется симметричная схема нагрева двух одинаковых экспериментальных образцов до максимальной температуры 1273 К (режим № 1) и 1573 К (режим № 2). Полученные экспериментальные зависимости температуры от времени в заданных точках исследуемых образцов используются для определения

комплекса теплофизических характеристик (ТФХ) ВПЯМ из решения коэффициентной обратной задачи теплообмена (ОЗТ).

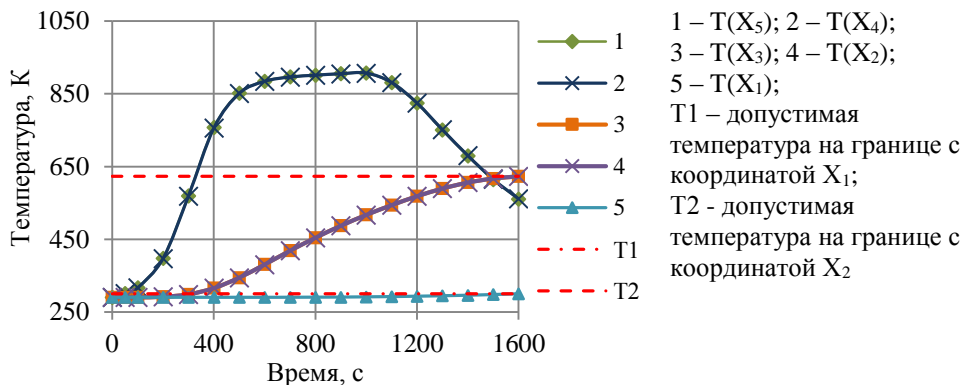


Рис. 9 – Зависимость температуры на границах слоев от времени

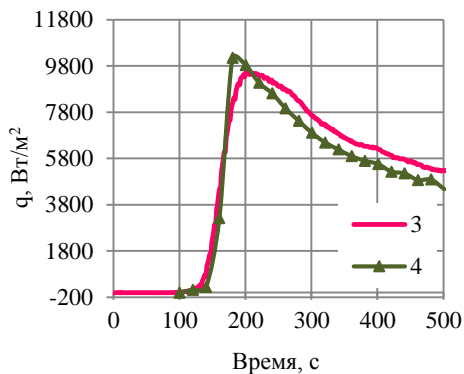
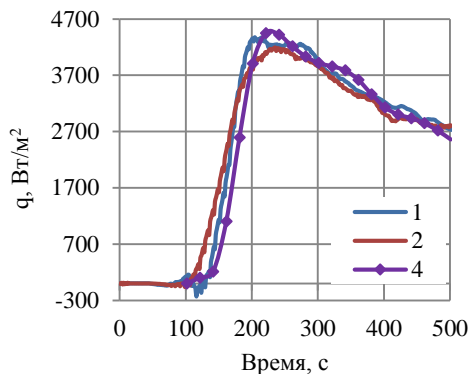
Плотность теплового потока на нагреваемой поверхности образца определяется по электрическим параметрам нагревательного элемента. Плотность теплового потока на обратной поверхности образца определяется из решения граничной ОЗТ, исходными данными для которой являются температурные измерения в чувствительных элементах датчика тепловых потоков из термостойкой керамики с известными ТФХ, установленного на обратной поверхности образца. В качестве дополнительной информации для решения ОЗТ, используются показания установленных на нагреваемой и обратной поверхностях образца датчиков температуры.

Структура высокопористого материала экспериментальных образцов исследовалась с помощью стереоскопического тринокулярного микроскопа, оснащенного цифровой видеокамерой. В результате обработки полученных фотографий определены следующие параметры: $a = 0,56$ мм, $t = 0,53$, $k = - 0,55$. Пористость материала составляет 0,97.

С целью оценки точности работы датчиков теплового потока были проведены дополнительные тепловые испытания, в которых датчики теплового потока устанавливались непосредственно на нагревательном элементе. На нагреваемых поверхностях датчиков обеспечивалась реализация зависимостей изменений температуры от времени, совпадающих с зависимостями, полученными в проведенных испытаниях образцов материала RVC foam. Плотность теплового потока на нагреваемых поверхностях датчиков определяется двумя способами: из решения граничной ОЗТ и по электрическим параметрам нагревательного элемента (рисунки 10 – 11).

Близость результатов, полученных разными способами, свидетельствуют об адекватности работы датчиков тепловых потоков и корректности используемого метода оценки плотности тепловых потоков, основанного на решении граничной ОЗТ, а также соответствующего программного обеспечения.

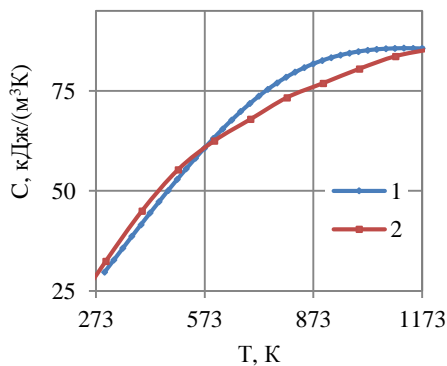
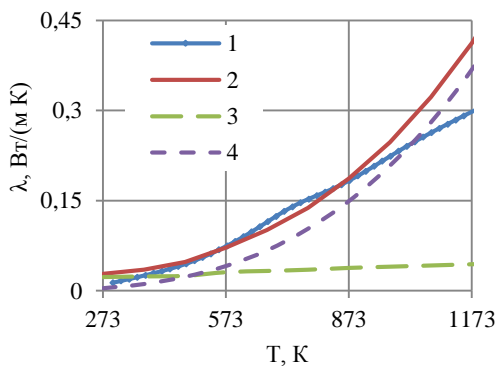
На рисунке 12 показаны результаты численного моделирования теплопроводности и объемной теплоемкости ВПЯМ RVC foam в сравнении с характеристиками, полученными путем решения коэффициентной ОЗТ.



1, 2 – испытания датчиков, соответствующие режиму нагрева №1;
3 – испытание датчиков, соответствующее режиму нагрева №2;
4 – результат решения ОЗТ

Рис. 10 – Плотность теплового потока на нагреваемой поверхности датчика, соответствующая режиму нагрева №1

Рис. 11 – Плотность теплового потока на нагреваемой поверхности датчика, соответствующая режиму нагрева №2



1 – результат решения коэффициентной ОЗТ; 2 – теоретическое значение характеристики; 3 – кондуктивная составляющая теплопроводности; 4 – радиационная составляющая теплопроводности

Рис. 12 – Теплопроводность и объемная теплоемкость материала RVC foam

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод о том, рассмотренный метод расчета радиационно-кондуктивного теплообмена в слое ВПЯМ адекватно отражает процессы кондуктивной теплопроводности через твердый каркас и

излучения в пористой структуре материала и позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными в диапазоне температур от 273 до 1073 К.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований образцов ВПЯМ с разной структурой. Тепловые испытания проводились с целью определения характеристик теплового состояния (нестационарного одномерного поля температур) трехслойного пакета, имитирующего работу теплозащитного покрытия, в условиях нестационарного радиационно-кондуктивного нагрева при давлении $\sim 0,01$ Па, в диапазоне температур от комнатной до 1273 К, а также оценки влияния геометрических параметров структуры ВПЯМ на теплоизоляционные свойства данных материалов. В испытаниях реализовывалась симметричная схема нагрева двух модельных сэндвич-панелей, образованных двумя пластинами из высокотемпературного керамического материала ОТМ-931 на основе реакционно-связанного нитрида кремния, между которыми располагалось ядро из ВПЯМ. В качестве ядра в сэндвич-панели использовались образцы углеродных ВПЯМ производства компании ERG Aerospace Corporation (США) RVC-20, RVC-60 и RVC-80 с разной структурой, определяемой числом пор на линейный размер – 8, 24 и 32 поры на 1 см. Пористость материалов составляет 0,97. Средние значения параметров структуры образцов ВПЯМ представлены в таблице 1.

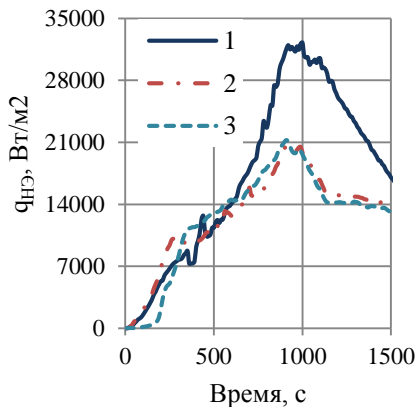
Таблица 1 – Средние значения параметров структуры образцов ВПЯМ

Параметр структуры	RVC-20	RVC-60	RVC-80
Средний диаметр ячейки, мкм	2861,99	929,71	656,93
Отношение минимального и максимального диаметров стержня	0,549	0,638	0,546

Все испытания проводились при одинаковых условиях (режимах нагрева и давлении в вакуумной камере стенда) с использованием образцов ВПЯМ с близкими значениями толщины, одинаковых образцов керамического материала ОТМ-931 и элементов теплоизолирующих оправок. Таким образом, результаты проведенных тепловых испытаний позволяют сравнить теплоизоляционные свойства образцов ВПЯМ с разной структурой и оценить влияние параметров структуры данных материалов на их свойства.

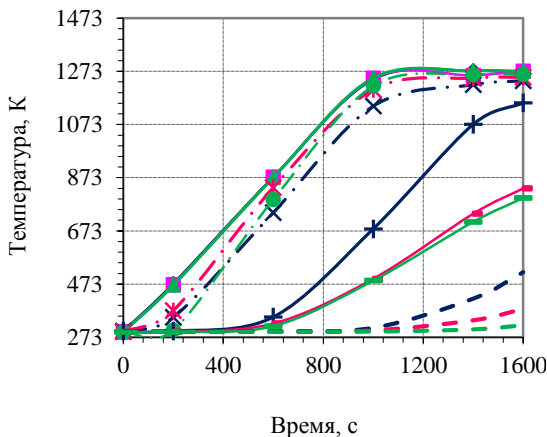
Зависимости температуры нагревательного элемента $T_{нз}(t)$ от времени совпадают во всех трех испытаниях экспериментальныхборок с образцами ВПЯМ RVC-20, RVC-60 и RVC-80 (рисунок 14). На нагреваемой поверхности образца RVC-20 реализуются меньшие значения температуры T_2 , однако данный образец прогревается значительно быстрее остальных (особенно при высоких температурах), о чем свидетельствует характер изменения температуры T_3 на обратной поверхности образца. Таким образом, материал RVC-20 с наибольшим диаметром ячеек демонстрирует наихудшие теплоизоляционные свойства. Температура T_2 нагреваемой поверхности образца ВПЯМ возрастает с увеличением

числа пор на 1 см (уменьшением диаметра ячеек) материала при температурах, превышающих ~1073 К. Температура обратной поверхности образца ВПЯМ Т₃ при высоких температурах существенно падает с увеличением числа пор на 1 см. Таким образом, наилучшими теплоизоляционными свойствами при высоких температурах, когда доминирующим механизмом переноса тепла является излучение, обладают ВПЯМ с наименьшим размером ячеек. Плотность теплового потока в испытаниях экспериментальных сборок с образцами ВПЯМ RVC-20 значительно выше, чем в испытаниях с образцами ВПЯМ RVC-60 и RVC-80 (рисунок 13).



- 1 – RVC-20
- 2 – RVC-60
- 3 – RVC-80

Рис. 13 – Плотность теплового потока на нагревательном элементе



- ◆— Тнэ (RVC-20)
- ▲— Тнэ (RVC-80)
- ◆— Тнэ (RVC-60)
- Т2 (RVC-20)
- Т2 (RVC-80)
- Т2 (RVC-60)
- +— Т3 (RVC-20)
- +— Т3 (RVC-60)
- +— Т3 (RVC-80)
- x— Т5 (RVC-20)
- x— Т5 (RVC-60)
- x— Т5 (RVC-80)

Рис. 14 – Результаты прогрева экспериментальных сборок

Результаты проведенных испытаний являются исходными данными для решения задачи выбора оптимальной толщины слоя высокопористого ячеистого материала совместно с диаметром ячейки ВПЯМ, обеспечивающих минимум удельной массы модельной сэндвич-панели при соблюдении заданного ограничения на максимальную температуру на обратной поверхности панели. Максимальная температура обратной поверхности сэндвич-панели ограничивалась значением 766 К, реализованным в штатных испытаниях образца ВПЯМ RVC-80. Минимальный диаметр ячейки ограничивался значением 0,656 мм, соответствующим образцу материала RVC-80. В качестве граничного условия на нагреваемой поверхности сэндвич-панели задавалась температура, полученная в

результате испытаний. Обратная поверхность панели предполагалась теплоизолированной.

Результаты математического моделирования представлены на рисунках 15 - 17. В данной задаче получены следующие оптимальные параметры слоя ВПЯМ: толщина 13,2 мм и диаметр ячейки 0,656 мм. Результаты близко соответствуют параметрам образцов ВПЯМ RVC-80, использованных в эксперименте.

Полученные оптимальные параметры слоя ВПЯМ хорошо согласуются с экспериментальными данными, в соответствии с которыми материал с наименьшим диаметром ячейки обладает наилучшими теплоизоляционными свойствами.

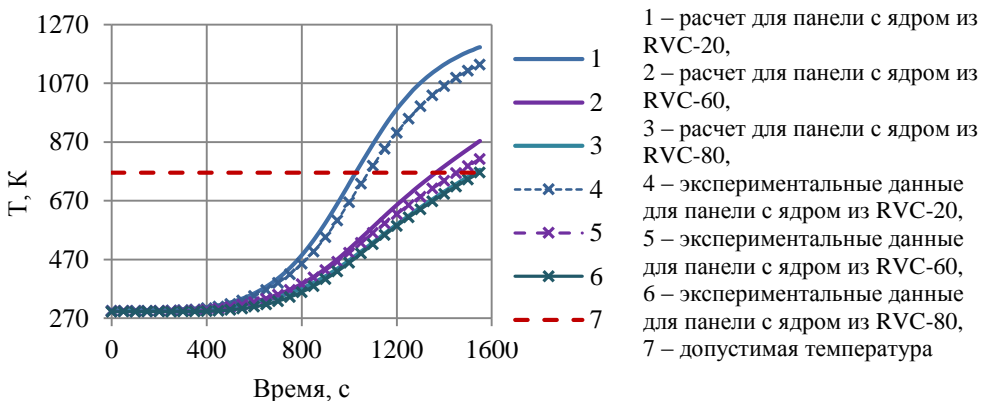


Рис. 15 – Температура на обратной поверхности сэндвич-панели

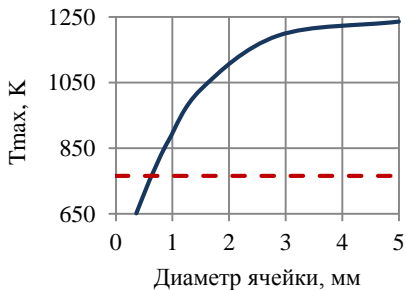


Рис. 16 – Зависимость максимальной температуры на обратной поверхности сэндвич-панели от диаметра ячейки ВПЯМ

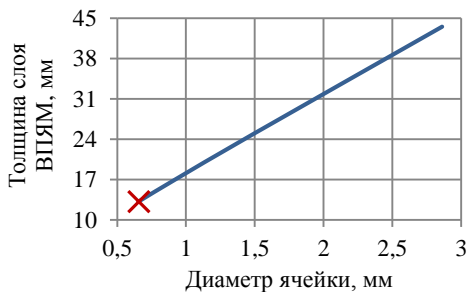


Рис. 17 – Зависимость оптимальной толщины слоя ВПЯМ от диаметра ячейки ВПЯМ

Согласованность результатов математического моделирования с экспериментальными данными позволяет сделать заключение о работоспособности и надежности разработанного алгоритма.

Заключение

Основным итогом диссертационной работы является решение научной задачи, заключающейся в разработке методов и алгоритмов оптимального проектирования многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.

Конкретные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработан новый метод оптимального проектирования многослойной тепловой защиты с учетом возможности выбора параметров структуры высокопористых ячеистых материалов.

2. Разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм оптимального выбора параметров структуры высокопористого ячеистого материала совместно с толщинами слоев многослойной теплоизоляции.

3. Для демонстрации работоспособности и возможностей программного комплекса проведены расчеты по выбору оптимальных параметров тепловой защиты, включающей слои высокопористых ячеистых материалов.

4. Достоверность разработанных методов проверена путем сравнения результатов математического моделирования с экспериментальными данными, полученными для образцов высокопористых ячеистых материалов с разной структурой.

5. Результаты экспериментальных исследований образцов высокопористого ячеистого углеродного материала показали, что метод математического моделирования радиационно-кондуктивного теплообмена адекватно отражает процессы кондуктивной теплопроводности через твердый каркас и излучения в пористой структуре рассматриваемых материалов.

6. Представленный метод 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.

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Салосина М.О. Тепловой режим солнечного зонда с учетом ударного воздействия высокоскоростных частиц пыли // Труды МАИ, 2016. – № 86. – 22 с. <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67808>
2. Салосина М.О. Оптимизация многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда // Космическая техника и технологии, 2018. – Т. 22, № 3. – С. 32-41.
3. Салосина М.О., Алифанов О.М., Ненарокомов А.В. Проектирование тепловой защиты солнечного зонда с учетом структуры теплозащитных материалов // Тепловые процессы в технике, 2019. – Т. 11, № 8. – С. 345 – 354.
4. Nenarokomov A.V., Salosina M.O., Alifanov O.M. Optimal design of multi-layer thermal protection of variable thickness // International Journal of Numerical Methods

for Heat & Fluid Flow, 2017. – Vol. 27, Issue 5. – P. 1040 – 1055. doi: 10.1108/HFF-03-2016-0112.

- Alifanov O.M., Nenarokomov A.V., Salosina M.O. Optimal design of thermal protection considering the carbon foam morphology // Proceedings of 69th International Astronautical Congress: Involving Everyone (IAC 2018) (Bremen, Germany, 1 – 5 October 2018). – IAF, International Astronautical Federation, 2018, – Vol. 13. – P. 9099 – 9106.

Другие публикации:

- Салосина М.О. Тепловой режим солнечного зонда с учетом столкновений с высокоскоростными частицами пыли // XL Академические чтения по космонавтике: сборник тезисов докладов конференции (Москва, 26 – 29 января 2016). – Москва: ООО «Манускрипт», 2016. – С. 31 – 32 (504 с.).
- Салосина М.О. Проектирование тепловой защиты солнечного зонда с учетом ударного воздействия высокоскоростных частиц пыли // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сб. аннотаций конкурсных работ 8-го Всероссийского молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов (Москва, 14 – 18 ноября 2016). – Москва: Типография «Люксор», 2016. – С. 243 – 245 (360 с.).
- Алифанов О. М., Константинов М. С., Крайнова И. В., Ненарокомов А. В., Салосина М. О., Мин Тейн. Проектирование тепловой защиты перспективного солнечного зонда // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: сборник тезисов докладов (Минск, 23 – 26 мая 2016). – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – Т. 2. – С. 312-316 (473 с.).
- Салосина М.О. Оптимизация многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда // XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов РКК «Энергия» им. С.П.Королева: сборник тезисов докладов (Королев, 30 октября – 3 ноября 2017). – Королев: РКК «Энергия» им. С.П.Королева, 2017. – Т.1. – С. 233-234 (320 с.).
- Салосина М.О. Проектирование тепловой защиты солнечного зонда // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: сб. тезисов докладов XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева (Санкт-Петербург, 22 – 26 мая 2017). – Москва: Изд. дом МЭИ, 2017. – Т.2. – С. 51 – 52 (306 с.).
- Салосина М.О. Оптимальное проектирование многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сб. аннотаций конкурсных работ 9-го Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов (Москва, 20 – 24 ноября 2017). – Москва: Типография «Люксор», 2017. – С. 166 – 167 (290 с.).
- Салосина М.О. Оптимальное проектирование тепловой защиты космического аппарата с учетом структуры материала // Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7): сборник тезисов докладов (Москва, 22 – 26 октября 2018). – Москва: Изд. дом МЭИ, 2018. – Т.3. – С. 447 – 450 (492 с.).

13. Салосина М.О. Проектирование тепловой защиты космического аппарата с учетом структуры высокопористого ячеистого материала // Авиация и космонавтика: сб. тезисов докладов 17-ой Международной конференции (Москва, 19 – 23 ноября 2018). – Москва: Типография «Люксор», 2018. – С. 343 – 344 (740 с.).
14. Салосина М.О. Проектирование тепловой защиты солнечного зонда с учетом структуры высокопористого ячеистого углеродного материала // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики: сб. аннотаций конкурсных работ 10-го Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов (Москва, 19 – 23 ноября 2018). – Москва: Типография «Люксор», 2018. – С. 188 – 189 (352 с.).