

УДК 629.785

Проектирование тепловой защиты солнечного зонда с учетом параметров структуры теплозащитных материалов

М.О. Салосина, О.М. Алифанов, А.В. Ненарокомов

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия*

e-mail: salosina.m@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.06.2019

После доработки 23.07.2019

Принята к публикации 25.07.2019

Рассматривается задача оптимального проектирования многослойной тепловой защиты минимальной массы с учетом ограничений на допустимые температуры на границах слоев. Наряду с толщиной слоев теплозащитного покрытия в число проектных параметров включаются диаметр ячейки и пористость, характеризующие структуру высокопористого ячеистого материала. Алгоритм решения оптимизационной задачи основывается на методе штрафной функции, применяемого в качестве средства поиска хорошего начального приближения, и методе спроектированного лагранжиана, обладающего высокой скоростью локальной сходимости. В качестве примера использования разработанного алгоритма и соответствующего программного обеспечения рассматривается задача выбора оптимальной толщины слоев теплозащитного экрана солнечного зонда совместно с параметрами структуры высокопористого ячеистого материала. Приведены результаты расчета оптимальных параметров плоского трехслойного теплозащитного экрана, подвергающегося высокоинтенсивному радиационному тепловому воздействию.

Ключевые слова: солнечный зонд, тепловая защита, высокопористые ячеистые материалы, оптимальное проектирование.

Введение

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

В настоящее время в России разрабатывается проект «Интергелио-Зонд», в рамках которого должен быть создан космический аппарат для гелиофизических исследований в ближайшей окрестности Солнца. Исследование Солнца с гелиоцентрических орбит с низким перигелием

предполагается провести также в проекте NASA «Parker Solar Probe» (аппарат был запущен 12 августа 2018 г.) и европейском проекте «Solar Orbiter» (дата запуска – февраль 2020 г.), научные задачи которых аналогичны задачам российского проекта.

Стратегия обеспечения допустимого теплового режима данных космических аппаратов строится на применении специальных экранов, защищающих их 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 ее решения связан с применением легких теплозащитных и теплоизоляцион-

ных материалов. Большими потенциальными возможностями для изготовления высокотемпературной теплоизоляции обладают высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) на основе стеклоглуглерода с пористостью 82–98%. Материалы обладают высокой жесткостью, достаточной прочностью (0.3–4.0 МПа) в диапазоне рабочих температур, малой плотностью (50–400 кг/м³), невысокой теплопроводностью (0.06–0.60 Вт/(м К)) [1]. В основе технологии производства стеклоглуглеродных ВПЯМ лежит процесс пиролиза высокопористой открытоячеистой органической матрицы, например, пенополиуретана (ППУ), предварительно пропитанного фенолоформальдегидной смолой. Структура ВПЯМ представляет собой пространственный каркас, образованный стержнями, соединяющимися в узлах. Элементарная ячейка структуры материала имеет форму, близкую к пентагондодекаэдру, состоящему из двенадцати пятиугольных граней, в вершинах которого располагаются узлы, а ребра образованы соединяющими узлы стержнями [1]. Основными параметрами ВПЯМ, описывающими структуру материала, являются средний размер ячейки и пористость, характеризующая пространство внутри ячеек.

Теплофизические характеристики высокопористых ячеистых материалов существенно зависят от многих факторов: температуры, состава материала, геометрических параметров структуры, свойств исходного сырья, используемой технологии производства материала, условий эксплуатации. 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.

Целью работы является создание метода оптимального проектирования многослойного теплозащитного экрана солнечного зонда с учетом структуры высокопористых ячеистых материалов.

1. Математическая модель теплообмена

Рассматривается плоский теплозащитный экран (рис. 1), состоящий из трех слоев различных материалов толщиной d_l и плотностью ρ_l , $l = 1, 2, \dots, L$. Внешние слои экрана 1 и 3 изготовлены из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ), а промежуточный слой 2 – из высокопористого ячеистого углеродного материала (ВПЯМ). 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. Поле температуры $T_l(x, \tau)$ в слоях 1 и 3 описывается следующей системой уравнений:

$$C_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$x \in (X_{l-1}, X_l), \quad l = 1, 3, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}],$$

$$T_l(x, \tau_{\min}) = T_{0l}, \quad x \in [X_{l-1}, X_l], \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

На границах задаются условия, учитывающие тепловой поток, излучаемый нагретыми поверхностями экрана, на внешней границе условие теплообмена представляется в виде:

$$\begin{aligned} -\lambda_L(T_L(X_L, \tau)) \frac{\partial T_L(X_L, \tau)}{\partial x} &= \\ &= -q_R(\tau) + q_{\text{изл}}, \quad (3) \\ \tau &\in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], \end{aligned}$$

где $q_R(\tau) = \alpha_S q_S(\tau)$ – плотность радиационного теплового потока, $q_S = S_0 / D^2$ – плотность теплового потока солнечного излучения, $S_0 = 1398$ Вт/м² – солнечная постоянная для Земли, D – расстояние от КА до Солнца в

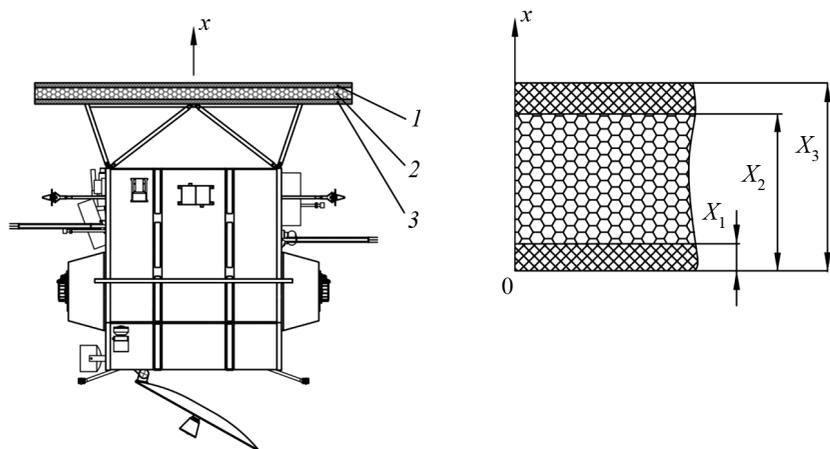


Рис. 1. Схема теплозащитного экрана солнечного зонда: 1 – УУКМ; 2 – ВПЯМ; 3 – УУКМ

а.е., определяемое формой и размером орбиты; $q_{\text{изл}} = \varepsilon \bar{\sigma} T^4$ – тепловой поток, излучаемый нагретой поверхностью экрана, ε – интегральная полусферическая степень черноты, $\bar{\sigma} = 5.6699 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Радиационно-кондуктивный теплообмен в слое теплозащитного покрытия, изготовленном из высокопористого ячеистого материала, описывается уравнением [2]:

$$C_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{c2} \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_R(x)}{\partial x}, \quad (4)$$

$$C_2 = (1 - \delta) \rho c_s.$$

Для оценки кондуктивной составляющей теплопроводности λ_{c2} используется соотношение [3]:

$$\lambda_{c2} = \frac{1}{3} (1 - \delta) \lambda_s. \quad (5)$$

Коэффициент $1/3$ в формуле (5) учитывает долю стержней, ориентированных в каждом из трех ортогональных направлений x, y, z .

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 уравнения переноса излучения, требующего, однако, 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 [2]. Данное приближение приводит к заметным ошибкам при описании процесса вблизи границ, так как в нем не учитывается излучение от граничных поверхностей [2]. Однако внутри оптически толстого слоя влияние граничных эффектов пренебрежимо мало, поскольку излучение от граничных поверхностей не достигает внутренних слоев [2]. 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 высокопористого ячеистого материала (~97%) [4].

Влияние поглощения и рассеяния среды на радиационный теплообмен учитывается только через средний по Росселанду коэффициент ослабления β_R , который может быть рассчитан с помощью функции излучения второго рода [5]:

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

Для учета анизотропии рассеяния излучения вводится транспортный коэффициент [5]:

$$\sigma_\lambda^* = \sigma_\lambda \cdot (1 - \langle \cos \theta \rangle_\lambda).$$

Средний косинус угла рассеяния равен

$$\langle \cos \theta \rangle_\lambda = \frac{1}{2} \int_0^\pi \Phi(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta.$$

Индикатриса рассеяния открыто-ячеистой структуры, полученная с помощью численных методов статистического моделирования, близка индикатрисе рассеяния больших выпуклых белых (диффузно отражающих) частиц, ориентированных случайным образом [5]. Диаграмма рассеяния, обусловленная отражением от таких частиц, тождественна диаграмме 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 [6]:

$$\Phi(\theta) = \frac{8}{3\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta). \quad (6)$$

Для функции (6) $\langle \cos \theta \rangle \approx -4/9$. 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 [7]:

$$\beta_\lambda^* = (1 - \rho_\lambda) \cdot \beta + \rho_\lambda \cdot \beta \cdot \left(1 + \frac{4}{9} \right),$$

$$\frac{1}{\beta_R} = \frac{1}{\beta} \int_0^\infty \frac{1}{(1 + 0.4444\rho_\lambda)} \frac{\partial I_{\lambda b}(T)}{\partial I_b(T)} d\lambda.$$

Полученные с помощью методов статистического моделирования теоретические результаты [8] показывают, что наибольшее влияние на радиационные свойства ВПЯМ оказывают пористость и средний диаметр ячейки. Таким образом, в основу разрабатываемого метода проектирования структуры высокопористого ячеистого материала целесообразно положить физико-математическую модель теплообмена, в соответствии с которой коэффициент ослабления материала β рассчитывается в зависимости от среднего диаметра ячейки и пористости [8]:

$$\beta = \frac{2.62\sqrt{1-\delta} [1+0.22(1-k)^2] [1-0.22(1-t)^2]}{a}, \quad (7)$$

где $t = b_{\min}/b_{\max}$ – отношение минимального и максимального диаметров стержня (рис. 2); k – параметр, учитывающий форму поперечного сечения стержня (рис. 3).

На границах слоя 2 выполняются условия:

$$\begin{aligned} & -\lambda_1(T_1(X_1, \tau)) \frac{\partial T_1(X_1, \tau)}{\partial x} = \\ & = -\lambda_{c2}(T_2(X_2, \tau)) \frac{\partial T_2(X_2, \tau)}{\partial x} + q_R(T_2(X_2, \tau)), \end{aligned} \quad (8)$$

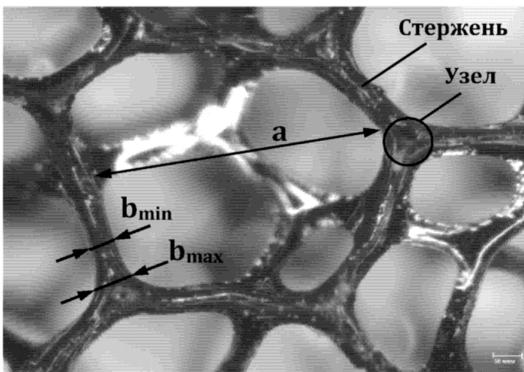


Рис. 2. Параметры структуры высокопористого ячеистого материала

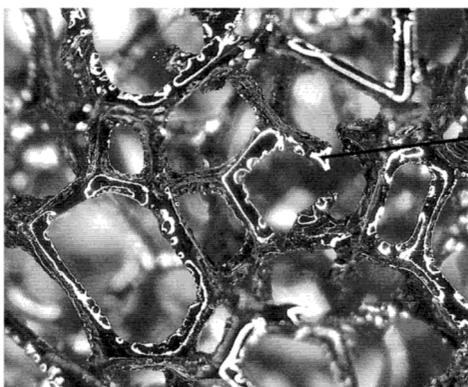


Рис. 3. Форма поперечного сечения стержня

$$T_1(X_1, \tau) = T_2(X_1, \tau), \quad (9)$$

$$-\lambda_{c2}(T_2(X_2, \tau)) \frac{\partial T_2(X_2, \tau)}{\partial x} + q_R(T_2(X_2, \tau)) = \quad (10)$$

$$= -\lambda_3(T_3(X_3, \tau)) \frac{\partial T_3(X_3, \tau)}{\partial x},$$

$$T_2(X_2, \tau) = T_3(X_2, \tau). \quad (11)$$

2. Постановка задачи

Постановка традиционной для теплового проектирования оптимизационной задачи подразумевает определение толщины слоев, обеспечивающих минимум удельной массы покрытия при соблюдении заданных ограничений на максимальные температуры в слоях [9–14]. В данной работе наряду с толщиной слоев многослойной изоляции d_l в число проектных параметров включаются диаметр ячейки a и пористость δ , характеризующие структуру высокопористого ячеистого материала.

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

$$J(\mathbf{p}) = \sum_{l=1}^3 \rho_l d_l, \quad \rho_2 = (1-\delta)\rho_s \quad (12)$$

при ограничениях

$$d_l > 0, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (13)$$

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max}, \quad (14)$$

$$0.85 < \delta \leq \delta_{\max}, \quad (15)$$

$$T(X_l, \tau) \leq T_{\text{lim}}^l, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], \quad (16)$$

где T_{lim}^l – значения предельно допустимых температур на границах слоев ($X_l, l = 1, 2, \dots, L$).

3. Метод решения оптимизационной задачи

Алгоритм решения оптимизационной задачи основывается на методе штрафной функции [15], применяемом в качестве средства поиска хорошего начального приближения, и методе спроектированного лагранжиана [16], обладающим отличными свойствами локальной сходимости.

Учитывая, что к ограничениям (13)–(15) неприменимы функции внешней точки, в качестве штрафной функции удобно использовать обратную барьерную функцию [16], обеспечивающую приближенное решение задачи (12)–(16) внутри допустимой области. При этом вспомогательная функция, минимизируемая при фиксированном значении параметра штрафа, имеет вид:

$$P(\mathbf{p}, r) = J(\mathbf{p}) + r \left(\sum_{k=1}^K \frac{1}{P_k} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{T_i(\mathbf{p})} \right), \quad (17)$$

где K – количество простых ограничений на переменные; T_i – ограничения на температуру границ слоев, которые в результате конечно-разностной аппроксимации краевой задачи (1)–(11) на сетке с N_τ узлами по времени представляются в виде:

$$T_i = T_{\text{lim}}^l - T(X_l, \tau_j), \\ l = 1, 2, \dots, L, j = 1, 2, \dots, N_\tau.$$

Локальный минимум вспомогательной функции (17) 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 $|(P_k - P_{k+1}) / P_k| < \varepsilon_0$ и $r_k P_k < \varepsilon_0$, где ε_0 – заранее 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; $\mathbf{T}(\mathbf{p})^T = \{T_{\text{lim}}^1 - T(X_1, \tau_1), \dots, T_{\text{lim}}^L - T(X_L, \tau_{N_\tau})\}$ – вектор ограничений) на множестве векторов, ортогональных градиентам активных в точке \mathbf{p}^* ограничений [16].

Искомое решение должно удовлетворять условиям [16]:

$$1) T_{\text{lim}}^l - T(X_l, \tau_{N_j}) \geq 0, l = 1, 2, \dots, L, \quad (18)$$

$$j = 1, 2, \dots, N_j; \text{ причем } \mathbf{T}(\mathbf{p}^*) = 0;$$

$$2) \text{grad} J(\mathbf{p}^*) = A(\mathbf{p}^*)^T \Psi^*; \quad (19)$$

$$3) \Psi_i^* \geq 0, i = 1, 2, \dots, t; \quad (20)$$

$$4) \text{ матрица } Z(\mathbf{p}^*)^T H(\mathbf{p}^*, \Psi^*) Z(\mathbf{p}^*) \quad (21)$$

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

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 \mathbf{T} [16]. Квадратичная подзадача формулируется следующим образом: найти минимум квадратичной аппроксимации функции Лагранжа

$$\Phi_L = \mathbf{g}^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T H \mathbf{s} \quad (22)$$

$$\text{при ограничениях } A(\mathbf{p}) \mathbf{s} \leq -\mathbf{T}, \quad (23)$$

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 (22), (23) 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. Ес-

ли 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 [16].

Затем оценивается вектор множителей Лагранжа Ψ :

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

Ограничения, соответствующие отрицательным компонентам вектора Ψ , выводятся из рабочего списка.

Длина шага γ^i определяется как приближенное решение задачи одномерной безусловной минимизации модифицированной функции Лагранжа [16] вида:

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

где r – параметр штрафа, обеспечивающий реализацию локального минимума в безусловно стационарной точке, найденной из достаточного условия оптимальности (18–21).

Найденная точка считается оптимальной, если выполнены следующие условия:

$$\frac{\gamma \|\mathbf{s}\|}{(1 + \|\mathbf{p}\|)} \leq \varepsilon_0, \quad (24)$$

$$\frac{\|Z^T \mathbf{g}\|}{(1 + \max(1 + |J(\mathbf{p})|, \|\mathbf{g}_F(\mathbf{p})\|))} \leq \varepsilon_0, \quad (25)$$

$$|T_j| \leq \varepsilon_c, \quad (26)$$

где ε_0 – заранее заданное значение погрешности решения задачи оптимизации; ε_c – заданное значение погрешности выполнения ограничений; $\mathbf{g}_F(\mathbf{p})$ – вектор, составленный из компонент градиента функции Лагранжа, соответствующих свободным переменным.

Описанный алгоритм реализован в программном комплексе, предназначенном для численного решения задачи оптимального выбора параметров структуры высокопористого ячеистого материала совместно с толщиной слоев многослойной теплоизоляции.

4. Проектирование теплозащитного экрана солнечного зонда

Для проверки работоспособности разработанного комплекса рассматривается задача выбора проектных параметров трехслойного теплозащитного экрана, схема которого аналогична схеме экрана солнечного зонда «Parker Solar Probe» (см. рис. 1). Предполагается, что КА ориентирован осью $+X$ в направлении на Солнце. Внешнее тепловое воздействие определяется минимальной высотой перигелия орбиты КА. Собственные тепловыделения КА пренебрежимо малы и в расчетах не учитываются.

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.

Теплофизические и оптические характеристики стеклоуглерода, составляющего основу ячеистой структуры высокопористого углеродного материала, теплофизические характеристики УУКМ, используемые в расчетах, представлены в табл. 1 и 2 [17–19].

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 высокопористого ячеистого материала слоя 2 (см. рис. 1). Тепловое состояние рассмат-

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при температуре, К			Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К), при температуре, К		
		300	500	700	300	500	700
УУКМ	1440	4.91	6.96	7.22	981	1771	2184
Стеклоуглерод	1800	3.5	5	7	1224	2091	2567

Таблица 2. Спектральная отражательная способность графита

Длина волны, мкм	0.5	1	3.5	10	12	35
Спектральная отражательная способность	0.325	0.425	0.55	0.75	0.77	0.85

риваемой системы в разной степени зависит от данных параметров. Согласно результатам расчетов наибольшее влияние на тепловое состояние экрана оказывают параметры, характеризующие слой, изготовленный из высокопористого ячеистого материала: 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 и 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 высокопористого ячеистого материала, 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 стеклоглиноуксера. По данным производителей [20] по-

ристость таких материалов может достигать значений 0.85–0.98, а средний размер ячеек может лежать в диапазоне от 0.36–5.08 мм, который соответствует материалам с количеством пор на линейный дюйм 100–10.

Оптимальные значения параметров, характеризующих слой высокопористого ячеистого материала (толщина слоя, пористость и диаметр ячейки материала) 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. Продолжительность процесса теплообмена для решения краевой задачи (1)–(11) ограничивалась значением 3000 с.

Количество шагов разностной сетки по времени составляло 5000; по пространственной переменной принималось равным 100 – в слоях 1 и 3 и 500 – в слое 2.

Погрешности решения краевой задачи (1)–(11), выполнения ограничений и решения задачи оптимизации (24)–(26) задавались равными 10^{-5} . 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 рис. 4. На рис. 5 показаны температуры нагреваемой и тыльной поверхнос-

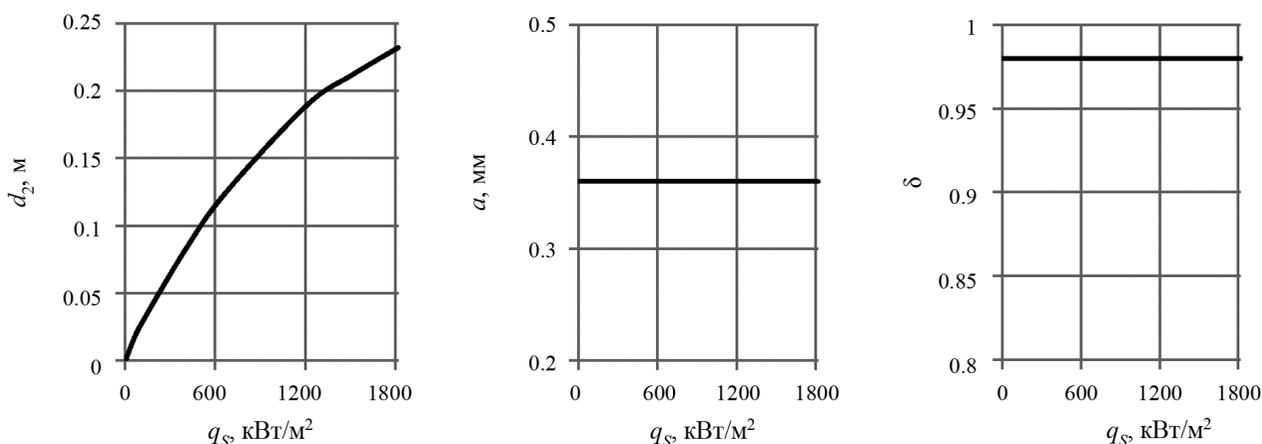


Рис. 4. Оптимальные значения параметров в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения q_s : d_2 – толщина слоя высокопористого ячеистого материала; a – диаметр ячейки; δ – пористость



Рис. 5. Температура нагреваемой и тыльной поверхности экрана в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения q_s

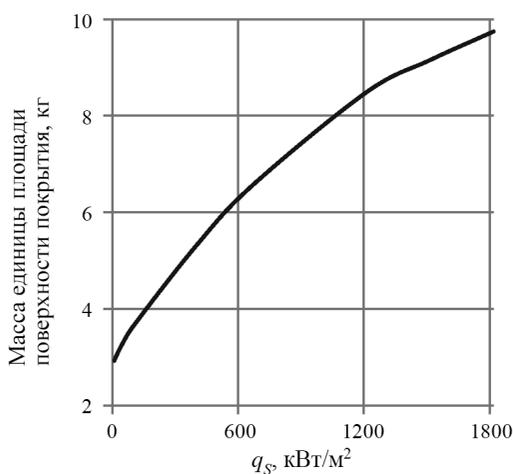


Рис. 6. Масса единицы площади поверхности покрытия в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения q_s

тей экрана в зависимости от плотности теплового потока солнечного излучения, воздействующего на КА в перигелии орбиты. На рис. 6 приведена зависимость массы единицы площади поверхности покрытия, являющейся в данной задаче целевой функцией, от плотности теплового потока солнечного излучения.

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.

Приведенная задача проектирования теплозащитного экрана солнечного зонда не исчер-

пывает возможностей разработанного алгоритма. С его помощью можно решать широкий круг задач, связанных с проектированием многослойной тепловой защиты, содержащей слой из высокопористых ячеистых материалов.

Заключение

Рассмотрена задача оптимального проектирования теплозащитного экрана, содержащего слой высокопористого ячеистого углеродного материала, с учетом заданных ограничений на допустимые температуры в слоях. Традиционные методы решения подобной задачи подразумевают определение толщины слоев, обеспечивающих минимум удельной массы покрытия, при условии, 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 высокопористого ячеистого материала совместно с толщиной слоев. Данный подход дает возможность расширить область поиска оптимальных параметров тепловой защиты, включающей слой из высокопористых ячеистых материалов, способствуя повышению эффективности решения задачи оптимального проектирования.

С помощью представленного метода решена задача выбора оптимальных параметров плоского трехслойного теплозащитного экрана солнечного зонда, подвергающегося высокоинтенсивному радиационному тепловому воздействию, с учетом зависимости теплофизических свойств материалов слоев от температуры и излучения с поверхностей экрана. Полученные результаты подтверждают работоспособность и эффективность представленного алгоритма оптимального проектирования многослойного теплозащитного покрытия с учетом структуры высокопористых ячеистых материалов. 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.

Условные обозначения

A – матрица градиентов активных ограничений;
 b_{\min} – минимальный диаметр стержня, м;
 b_{\max} – максимальный диаметр стержня, м;
 C – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К);
 c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
 d_i – толщина слоя, м;
 a – диаметр ячейки ВПЯМ, м;
 H – матрица Гессе функции Лагранжа;
 I – интегральная интенсивность излучения, Вт/(м² стерж);
 J – минимизируемая функция, кг/м²;
 L – количество слоев в системе;
 $N\tau$ – количество шагов конечно-разностной сетки по времени;
 \mathbf{p} – вектор проектных параметров;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 r – параметр штрафа;
 \mathbf{s} – направление поиска;
 T – температура, К;
 X – координата границы слоя, м;
 α – коэффициент поглощения, м⁻¹;
 β – коэффициент ослабления, м⁻¹;
 γ – длина шага;
 δ – пористость;
 ε – интегральная полусферическая степень черноты;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ρ – плотность, кг/м³;
 σ – коэффициент рассеяния, м⁻¹;
 $\bar{\sigma}$ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴);
 T – время, с;
 $\Phi(\theta)$ – индикатриса рассеяния;
 Ψ^T – вектор множителей Лагранжа;
 ω – альбеде.

Индексы

b – абсолютно черное тело;
 c – кондуктивный;
 R – радиационный;
 s – твердый каркас ВПЯМ (solid);
 S – солнечное излучение (Sun);
 λ – спектральный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щурик А.Г.** Искусственные углеродные материалы. Пермь: Типография ПГУ, 2009. 342 с.
2. **Оцисик М.Н.** Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 616 с.
3. **Öchsner A., Murch G.E., Lemos M.J.S.** (Eds). Cellular and Porous Materials: Thermal Properties Simulation and Prediction. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 422 p.
4. **Baillis D., Raynaud M., Sacadura J.F.** Determination of spectral radiative properties of open cell foam. Model validation // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2000. V. 14. N 2. P. 137–143. <https://doi.org/10.2514/2.6519>.
5. **Cunsolo S., Coquard R., Baillis D., Bianco N.** Radiative properties modeling of open cell solid foam: Review and new analytical law // International Journal of Thermal Sciences. 2016. V. 104. P. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.05.007>.
6. **Хюлст Г. ван де.** Рассеяние света малыми частицами. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 537 с.
7. **Coquard R., Rochais D., Baillis D.** Conductive and radiative heat transfer in ceramic and metal foams at fire temperatures // Fire Technology. 2012. V. 48. P. 699–732. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0167-8>.
8. **Cunsolo S., Coquard R., Baillis D., Chiu W.K.S., Bianco N.** Radiative properties of irregular open cell solid foams // International Journal of Thermal Sciences. 2017. V. 117. P. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.007>.
9. **Nenarokomov A.V.** Design of a system of multilayer heat insulation of minimum mass // High Temperature. 1997. V. 35. P. 453–457.
10. **Михайлов В.В.** Оптимизация многослойной теплоизоляции // Инженерно-физический журнал. 1980. Т. 39. № 2. С. 286–291.
11. **Maierova I.A., Prosuntsov P.V., Zuev A.V.** Optimal thermal design of a multishield thermal protection system of a reusable space vehicles // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. V. 89. P. 528–533. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1406-8>.
12. **Nosratollahi M., Mortazavi M., Adami A., Hosseini M.** Multidisciplinary design optimization of a reentry vehicle using genetic algorithm // Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal. 2010. V. 82. P. 194–203. <https://doi.org/10.1108/00022661011075928>.
13. **Riccio A., Raimondo F., Sellitto A., Carandente V., Scigliano R., Tescione D.** Optimum design of ablative thermal protection systems for atmospheric entry vehicles // Applied Thermal Engineering. 2010. V. 119. P. 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.053>.
14. **Xie C., Wang Q., Sunden B., Zwang W.** Thermomechanical optimization of lightweight thermal protection system under aerodynamic heating // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 59. P. 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.002>.
15. **Полак Э.** Численные методы оптимизации. Единый подход. М.: Мир, 1974. 374 с.
16. **Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.** Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985. 509 с.
17. **Ohlhorst C.W., Vaughn W.L., Ransone P.O., Hwa-Tsu Tsou.** Thermal Conductivity Database of Various Structural Carbon-Carbon Composite Materials // NASA TM-4787. Langley Research Center. Hampton, 1997. 96 p.
18. **Чеканова В.Д., Филков А.С.** Стеклоуглерод: получение, свойства, применение. // Успехи химии. 1971. Т. 40. № 5. С. 777–805.
19. **Papoular R.J., Papoular R.** Some optical properties of graphite from IR to millimetric wavelengths // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2014. V. 443. P. 2974–2982. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1348>.
20. **ULTRAMET Advanced Materials Solutions.** Ultramet. Рацима, 2018. Режим доступа: <http://ultramet.com/refractory-open-cell-foams-carbon-ceramic-and-metal-properties-of-foam-materials> (дата обращения 19.07.2019 г.)

Design of the solar probe thermal protection considering the parameters of heat-shielding materials' structure

M.O. Salosina, O.M. Alifanov, A.V. Nenarokomov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia
 e-mail: salosina.m@yandex.ru

The paper is devoted to the problem of optimal design of multilayer thermal protection, including a layer of highly porous cellular material. The desired vector of design parameters

should ensure a minimum of total mass of the system and required operation temperatures on the boundaries of layers. Traditional methods for solving such a problem implies the determination of layers thickness for multi-layer thermal protection and suggest, that thermal properties of all materials composed the layers are available in a wide range of temperatures. In present work, the design parameters vector includes porosity and cell diameter, which characterize the structure of a highly porous cellular material, in addition to the thicknesses of the layers. The optimization problem is solved using a computational scheme, which combines two well-known methods: the projected Lagrangian method with the quadratic subproblem and the penalty function method. The penalty function method is characterized by a large region of convergence and provides a good initial estimate of the optimal parameters' values for the projected Lagrangian method with excellent local convergence properties. To illustrate the capabilities of developed algorithm and corresponding software, the problem of choosing of optimal parameters for the flat three-layer heat shield of a solar probe exposed to extreme radiative heat loads was solved. The obtained results confirm the correctness and effectiveness of developed algorithm for optimal design of multilayer thermal protection, taking into account the structure of highly porous cellular materials. The method is applicable for solving a wide range of thermal design problems, including the design of advanced thermal protection systems for spacecraft operating under conditions of extreme thermal loads such as solar and planetary probes.

Keywords: solar probe, thermal protection, highly porous cellular materials, optimal design.

REFERENCES

1. **Shchurik A.G.** *Iskustvennyye uglerodnnye materialy* [Artificial carbon materials]. Perm': PGU publ., 2009. 342 p. In Russ.
2. **Ozisik M.N.** *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection*. New York: Wiley, 1973. (Russ. ed. Ozisik M.N. Slozhnyj teploobmen. Mocsow: Mir, 1976. 616 p.)
3. **Öchsner A., Murch G.E., Lemos M. J.S. (Eds).** *Cellular and Porous Materials: Thermal Properties Simulation and Prediction*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 422 p.
4. **Baillis D., Raynaud M., Sacadura J.F.** Determination of spectral radiative properties of open cell foam. Model validation. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, vol. 14, no. 2, pp. 137–143. <https://doi.org/10.2514/2.6519>.
5. **Cunsolo S., Coquard R., Baillis D., Bianco N.** Radiative properties modeling of open cell solid foam: Review and new analytical law. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, vol. 104, pp. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.05.007>.
6. **Hulst H.C. van de.** *Light Scattering by Small Particles*. New York: Wiley – Chapman, 1957. 470 p.
7. **Coquard R., Rochais D., Baillis D.** Conductive and radiative heat transfer in ceramic and metal foams at fire temperatures. *Fire Technology*, 2012, vol. 48, pp. 699–732. <https://doi.org/10.1007/s10694-010-0167-8>.
8. **Cunsolo S., Coquard R., Baillis D., Chiu W.K.S., Bianco N.** Radiative properties of irregular open cell solid foams. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, vol. 117, pp. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.007>.
9. **Nenarokomov A.V.** Design of a system of multilayer heat insulation of minimum mass // *High Temperature*, 1997, vol. 35, pp. 453–457.
10. **Mikhailov V.V.** Optimizatsiya mnogoslojnoj teploizolyatsii [Optimization of multilayer heat insulation]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal – Journal of Engineering Physics*, 1980, vol. 39, pp. 286–291. In Russ.
11. **Maierova I.A., Prosuntsov P.V., Zuev A.V.** Optimal thermal design of a multishield thermal protection system of a reusable space vehicles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, pp. 528–533. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1406-8>.
12. **Nosratollahi M., Mortazavi M., Adami A., Hosseini M.** Multidisciplinary design optimization of a reentry vehicle using genetic algorithm. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 2010, vol. 82, pp. 194–203. <https://doi.org/10.1108/00022661011075928>.
13. **Riccio A., Raimondo F., Sellitto A., Carandente V., Scigliano R., Tescione D.** Optimum design of ablative thermal protection systems for atmospheric entry vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 119, pp. 541–552. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.053>
14. **Xie C., Wang Q., Sunden B., Zwang W.** Thermomechanical optimization of lightweight thermal protection system under aerodynamic heating. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 59, pp. 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.002>.
15. **Polak E.** *Computational Methods in Optimization: A Unified Approach*. New York: Academic Press. 1971. (Russ. ed. Polak E. Chislennyye metody optimizatsii. Edinyj podkhod. Moscow: Mir, 1974. 374 p.)
16. **Gill P.E., Murray W., Wright M.H.** *Practical optimization*. London: Academic Press. 1981. 401 p. (Russ. ed. Gill P., Murray W., Wright M. Prakticheskaya optimizatsiya. Moscow: Mir, 1985. 509 p.)
17. **Ohlhorst C.W., Vaughn W.L., Ransone P. O., Hwa-TsuTsu.** *Thermal Conductivity Database of Various Structural Carbon-Carbon Composite Materials*. NASA TM-4787. Langley Research Center. Hampton, 1997. 96 p.
18. **Chekanova V.D., Fialkov A.S.** Vitreous Carbon (Preparation, Properties, and Applications). *Russian Chem. Reviews*, 1971, vol. 40, no. 5, pp. 413–428.
19. **Papoular R.J., Papoular R.** Some optical properties of graphite from IR to millimetric wavelengths. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, vol. 443, pp. 2974–2982. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1348>
20. **ULTRAMET** Advanced Materials Solutions. Ultramet. Pacoima, 2018. Available at: <http://ultramet.com/refractory-open-cell-foams-carbon-ceramic-and-metal/properties-of-foam-materials> (accessed 19.07.2019 г.)