

УДК 536.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

© 2023 г. О. М. Алифанов, С. А. Будник, А. В. Ненарокомов, М. О. Салосина*

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

*E-mail: salosina.m@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 19.03.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Данная работа посвящена исследованию теплофизических свойств перспективных высокопористых ячеистых материалов методами обратных задач теплообмена. Представлены результаты тепловых испытаний образцов данных материалов с разной структурой, определяемой диаметром ячеек. Получены теплофизические характеристики образцов, которые могут быть использованы для построения и верификации математических моделей теплообмена в высокопористых ячеистых материалах.

DOI: 10.31857/S0040364423040014

ВВЕДЕНИЕ

Изучение Солнца, планет и малых тел Солнечной системы с помощью автоматических межпланетных станций и спускаемых аппаратов — одно из приоритетных направлений фундаментальных космических исследований, целью которых является развитие теоретических основ ключевых научных дисциплин о космосе. Тепловая защита космических аппаратов функционирует при значительных тепловых нагрузках [1–6], поэтому необходима ее оптимальная сборка как по конструкторско-технологическим, так и по массовым характеристикам. Одно из перспективных направлений повышения весовой эффективности многослойных теплозащитных покрытий космических аппаратов связано с включением в их состав ультралегких теплоизоляционных материалов [7–9]. Большими возможностями здесь обладают высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) благодаря малой плотности (50–400 кг/м³), высокой жесткости, достаточной прочности при сжатии (0.3–4.0 МПа), невысокой теплопроводности (0.06–0.60 Вт/(м К)) [10].

Теплофизические характеристики ВПЯМ существенно зависят от многих факторов: температуры, состава материала, геометрических параметров структуры, свойств исходного сырья, используемой технологии производства материала. С одной стороны, это позволяет в процессе производства управлять свойствами получаемых ВПЯМ в достаточно широком диапазоне, создавая материалы с заранее заданными свойствами, имеющие оптимальную для конкретных условий эксплуатации структуру [11, 12]. С другой стороны, такая многофакторность затрудняет определение, моделирова-

ние и прогнозирование свойств материалов и увеличивает разброс их значений.

Внедрение перспективных высокопористых ячеистых материалов в практику проектирования эффективных теплозащитных конструкций требует разработки адекватных математических моделей теплообмена, позволяющих с достаточной точностью прогнозировать изменение теплофизических свойств материалов при изменении параметров макро- и микроструктуры [13–19]. Высококачественные математические модели теплофизических свойств ВПЯМ необходимы для определения проектных параметров элементов конструкций и получения максимального количества информации о характеристиках исследуемых объектов с использованием экспериментальных данных. Разработка подобных моделей представляет большой теоретический и практический интерес, так как позволяет существенно сократить объемы экспериментальных исследований при создании новых образцов авиационной и космической техники за счет широкого применения методов математического моделирования [20–24].

Большими потенциальными возможностями для разработки математических моделей теплопереноса в ВПЯМ обладает методология обратных задач теплообмена (ОЗТ). Данный подход является универсальным для идентификации и верификации математических моделей по результатам экспериментальных исследований в условиях, максимально приближенных к натурным, или непосредственно при эксплуатации объектов, обладает высокой информативностью, позволяет проводить исследования образцов материала в

условиях нестационарности температурного поля, в широких диапазонах температур, реализовать схему испытаний, не нарушающую целостность образца [25–30].

Данная работа посвящена исследованию теплофизических свойств высокопористых ячеистых материалов методами обратных задач теплообмена. Представлены результаты тепловых испытаний образцов ВПЯМ с разной структурой, определяемой диаметром ячеек. Получены теплофизические характеристики образцов, которые могут быть использованы для построения и верификации математических моделей теплообмена в ВПЯМ с учетом параметров их структуры.

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ВПЯМ С РАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ

Для оценки влияния геометрических параметров структуры на теплофизические свойства высокопористых ячеистых материалов проведены тепловые испытания образцов ВПЯМ с разной структурой. В испытаниях определялись характеристики теплового состояния (нестационарное одномерное поле температур) трехслойного пакета, имитирующего работу теплозащитного покрытия, в условиях нестационарного радиационно-кондуктивного нагрева. Модельная сэндвич-панель (рис. 1) состояла из двух пластин из высокотемпературной керамики ($d_1 = 2.95$, $d_3 = 7.15$ мм), между которыми располагалось ядро из высокопористого материала толщиной d_2 (табл. 1). В качестве теплоизоляционного материала в сэндвич-панели использовались образцы углеродных ВПЯМ производства компании ERG Aerospace Corpora-

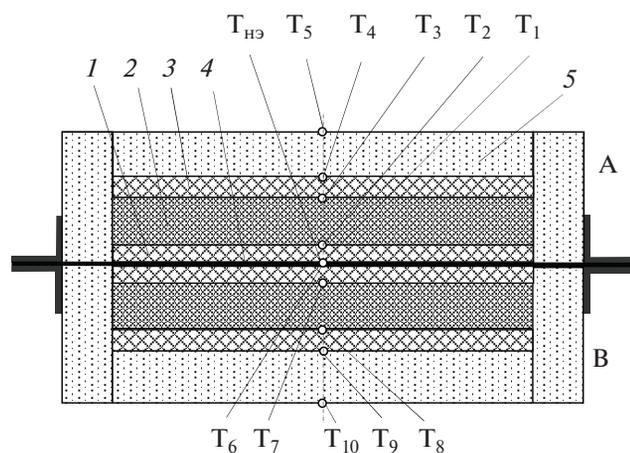


Рис. 1. Схема испытаний с симметричным нагревом двух экспериментальныхборок: 1 – пластина из высокотемпературной керамики d_1 ; 2 – образец ВПЯМ d_2 ; 3 – пластина из высокотемпературной керамики d_3 ; 4 – нагревательный элемент (НЭ); 5 – прижимная теплоизолирующая пластина; $T_{НЭ}$, T_1 – T_{10} – термопары.

Таблица 1. Геометрические и массовые характеристики экспериментальных образцов

Образец	d_2 , мм	Плотность (после испытаний), кг/м ³
RVC-20 A	12.83	48.28
RVC-20 B	12.47	43.44
RVC-60 A	12.75	45.36
RVC-60 B	12.90	45.37
RVC-80 A	13.00	44.58
RVC-80 B	12.70	47.42

tion (США) RVC-20, RVC-60 и RVC-80 с разной структурой, определяемой числом пор на единицу линейного размера: 8, 24 и 32 пор/см. Пластины изготавливались из высокотемпературного керамического материала на основе реакционно-связанного нитрида кремния с известными теплофизическими свойствами [31, 32].

В процессе тепловых испытаний реализуется симметричная схема (рис. 1) с кондуктивно-радиационным нагревом двух одинаковых экспериментальныхборок А и В, каждая из которых включает образец ВПЯМ, расположенный между двумя пластинами из высокотемпературного керамического материала. Симметричная схема тепловых испытаний позволяет одновременно испытывать два одинаковых образца ВПЯМ (А и В). На нагреваемых и обратных поверхностях керамических пластин устанавливались микротермопары типа ХА диаметром 100 мкм, сваренные способом встык. Экспериментальная сборка А с образцом ВПЯМ А и термопарами T_1 – T_4 и экспериментальная сборка В с образцом ВПЯМ В и термопарами T_6 – T_9 располагались на верхней и нижней поверхностях нагревательного элемента (НЭ) в специальных теплоизолирующих оправках из материала ТЗМК-10. Обратные поверхности экспериментальныхборок закрывались теплоизолирующими прижимными пластинами, на обратных поверхностях которых установлены термопары T_5 и T_{10} . Термопарные проволоки выводятся из экспериментальныхборок через стыки элементов теплоизолирующих оправок. Экспериментальные сборки плотно прижимаются к поверхностям нагревательного элемента с помощью специальных пружин с регулируемым усилием, установленных в узлах подвеса экспериментального модуля ЭМ-2В. Собранный модуль ЭМ-2В устанавливается на водоохлаждаемый рабочий стол вакуумной камеры тепловакуумного стенда ТВС-1М. Выбранная схема испытаний позволяет проанализировать тепловые режимы (нестационарное поле температур и прогрев) модельной сэндвич-панели и получить данные, необходимые для определения теплофизических характеристик образцов ВПЯМ.

Процесс теплообмена в трехслойной экспериментальной сборке описывается следующей системой уравнений:

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

$$x \in (X_{l-1}, X_l), \quad l = 1, 2, 3, \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}];$$

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

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(X_0, \tau)}{\partial x} = q_{\text{нэ}}(\tau), \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}]; \quad (3)$$

$$T(X_3, \tau) = T_b(\tau), \quad \tau \in (\tau_{\min}, \tau_{\max}], \quad (4)$$

где $C(T)$ – объемная теплоемкость; $T(x, \tau)$ – температура, x – координата по пространству; $\lambda(T)$ – теплопроводность; l – номер слоя экспериментальной сборки; X – координата границы слоя, отсчитываемая от поверхности НЭ; $q_{\text{нэ}}$ – плотность теплового потока от НЭ, b – номер термопары ($b = 4$ – для сборки А, $b = 9$ – для сборки В).

Начальное распределение температуры $T_l(x, \tau_{\min}) = T_{0l}(x)$ соответствует значениям температуры в точках измерений в начальный момент времени $\tau = 0$. Плотность теплового потока $q_{\text{нэ}}(\tau)$, $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ определяется по электрическим параметрам нагревательного элемента:

$$q_{\text{нэ}}(\tau) = \frac{I(\tau)U(\tau)}{2S} - \left(\frac{\rho_{\text{нэ}} \delta_{\text{нэ}} c_{\text{нэ}}}{2} \frac{\partial T_{\text{нэ}}(\tau)}{\partial \tau} \right), \quad (5)$$

$$\tau \in (0, \tau_e],$$

где $I(\tau)$ – действующая сила тока в цепи НЭ; $U(\tau)$ – действующее напряжение на границах рабочей зоны НЭ; $S = 0.005 \text{ м}^2$ – площадь рабочей зоны НЭ; $\delta_{\text{нэ}} = 0.0001 \text{ м}$ – толщина НЭ; $T_{\text{нэ}}(\tau)$ – температура НЭ; τ_e – время окончания измерений (испытаний) $\rho_{\text{нэ}}$, $c_{\text{нэ}}$ – плотность и теплоемкость материала НЭ: $\rho_{\text{нэ}} = (7902 - 0.0584 T_{\text{нэ}}) \text{ кг/м}^3$, $c_{\text{нэ}}(T) = (500 + 0.1744 T_{\text{нэ}}) \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$.

Результаты температурных измерений в трехслойной панели являются исходными данными для определения теплофизических характеристик (ТФХ) ВПЯМ из решения коэффициентной ОЗТ. Тип граничных условий и число точек измерения температуры должны обеспечивать единственность решения анализируемой обратной задачи [27]. Механические и электрические свойства исследуемых образцов ВПЯМ, а также их структура, не позволяют надежно установить термопары во внутренних точках образцов, поэтому все тепловые измерения должны проводиться на поверхностях образцов. Керамический материал имеет значительную твердость и поддается обработке только

алмазным инструментом, поэтому термопары устанавливаются только на нагреваемых и обратных поверхностях пластин из керамики в специально прорезанные канавки глубиной 170 мкм. Канавки с термопарами заделываются (шпаклюются) заподлицо с поверхностью специально приготовленного состава на основе порошка керамического материала (90%) и огнеупорного клея (10%) с рабочей температурой 1300°C. Таким же образом устанавливаются провода управляющей термопары $T_{\text{нэ}}$, измеряющей температуру в центре нагревательного элемента. Вне пластин термопарные проволоки электроизолируются.

Тепловые испытания экспериментальных образков с образцами ВПЯМ RVC-20, RVC-60, RVC-80 проводились при одинаковых условиях (режим нагрева в вакууме при давлении 0.005–0.06 Па до максимальной температуры 1000°C с темпом нагрева $\sim 1^\circ\text{C/c}$). Кроме того, в испытаниях использовались образцы ВПЯМ с близкими значениями толщины, одинаковые образцы керамического материала и элементы 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.

В процессе тепловых испытаний температуры T_1 и T_6 , T_2 и T_7 в симметричных точках экспериментальных образков А и В имели близкие значения, что свидетельствует о хорошей реализации симметричной схемы нагрева модельных трехслойных панелей. В то же время в испытаниях экспериментальных образков с образцами ВПЯМ RVC-20 показания симметрично расположенных термопар T_3 и T_8 , T_4 и T_9 имели значительное (до 100 К) расхождение, которое увеличивалось с ростом температуры. Данное несоответствие объясняется существенной разницей (до 10%) в плотностях ВПЯМ образцов RVC-20 А и В. При высоких температурах доминирующим механизмом теплопереноса в высокопористом материале становится излучение, и более плотный материал образца А прогревается медленнее.

Зависимости температуры нагревательного элемента $T_{\text{нэ}}(\tau)$ от времени совпадают во всех трех испытаниях экспериментальных образков с образцами ВПЯМ RVC-20, RVC-60 и RVC-80 (рис. 2). 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.

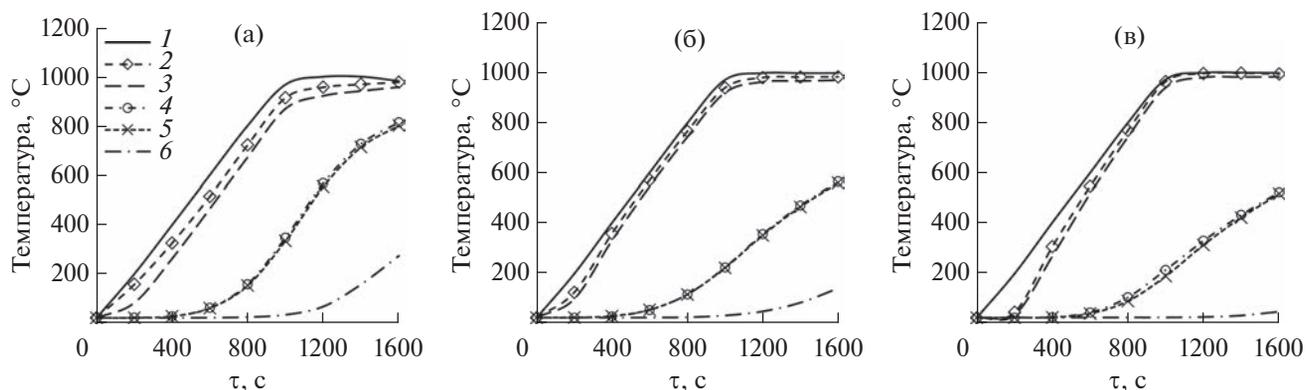


Рис. 2. Результаты прогрева экспериментальной сборки А с образцами ВПЯМ RVC-20 (а), RVC-60 (б), RVC-80 (в): 1 – данные термопары $T_{нэ}$, 2 – T_1 , 3 – T_2 , 4 – T_3 , 5 – T_4 , 6 – T_5 .

Температура T_2 нагреваемой поверхности образца ВПЯМ возрастает с увеличением числа пор/см (уменьшением диаметра ячеек) материала при температурах, превышающих $\sim 800^\circ\text{C}$. Температура обратной поверхности образца ВПЯМ T_3 при высоких температурах существенно падает с увеличением числа пор/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 сборок с образцами RVC-20 значительно выше, чем в испытаниях с образцами RVC-60, RVC-80 (рис. 3). Это объясняется тем, что для реализации заданной программы нагрева при испытании экспериментальной сборки с материалом RVC-20, обладающим самыми низкими теплоизоляционными свойствами, к НЭ необходимо подвести большее количества тепла.

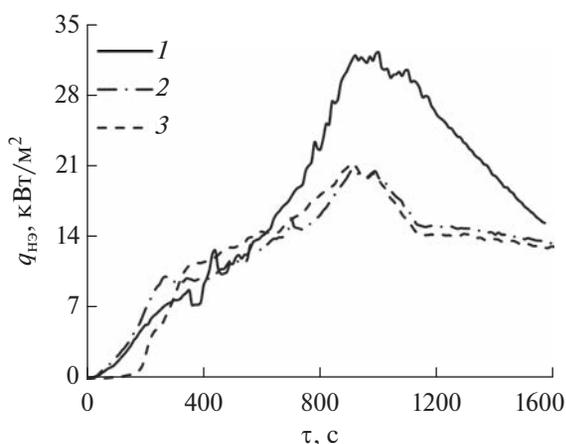


Рис. 3. Зависимости плотности теплового потока на нагревательном элементе: 1 – RVC-20, 2 – RVC-60, 3 – RVC-80.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВПЯМ

Постановка рассматриваемой ОЗТ подразумевает определение теплофизических характеристик ВПЯМ $C(T)$ и $\lambda(T)$ в диапазоне температур от комнатной до 1000°C .

В качестве дополнительной информации, необходимой для решения ОЗТ, используются показания установленных на нагреваемой и обратной поверхностях образцов ВПЯМ датчиков температуры: $T_2(\tau)$ и $T_3(\tau)$, $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ для образца А, $T_7(\tau)$ и $T_8(\tau)$, $\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max}$ для образца В.

Неизвестные функции $C(T)$ и $\lambda(T)$ представляются в виде линейной комбинации кубических В-сплайнов [29]

$$C(T) = \sum_{k=1}^{N_1} C_k \phi_k^1(T), \quad \lambda(T) = \sum_{k=1}^{N_2} \lambda_k \phi_k^2(T)$$

на заданных в интервале $[T_{\min}, T_{\max}]$ однородных сетках

$$\omega_i = \{T_k = T_{\min} + (k-1)\Delta T, k = 1, \dots, N_i\}, \quad i = 1, 2$$

с различным числом узлов N_i . C_k , λ_k – неизвестные параметры, $\phi_k(T)$ – заданная система базисных функций аппроксимирующего кубического В-сплайна.

В результате исходная функциональная обратная задача сводится к менее трудоемкой параметрической, заключающейся в нахождении вектора неизвестных параметров $\mathbf{p} = \{p_k\}$, $k = 1, N_p$, имеющего размерность $N_p = N_1 + N_2$ и состоящего из коэффициентов C_k ($k = 1, N_1$) и λ_k ($k = 1, N_2$). При выборе числа параметров аппроксимации учитывается имеющаяся предварительная информация об искомых функциях (гладкости, монотонности, темпе роста). В расчетах N_1 и N_2 принимались равными трем.

Искомый вектор определяется в результате минимизации положительно определенного функционала среднеквадратической невязки рассчитанных и экспериментальных значений температуры в точках установки термодатчиков [29]:

$$J(C(T), \lambda(T)) = \sum_{m=1}^2 \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} (T^{\text{расч}}(x_m, \tau) - T^{\text{эксп}}(x_m, \tau))^2 d\tau, \quad (6)$$

где $T^{\text{расч}}(x_m, \tau)$ – зависимости температуры от времени в точках установки термодатчиков, найденные из решения краевой задачи (1)–(4); $T^{\text{эксп}}(x_m, \tau)$ – экспериментальные значения температуры.

Для поиска минимума функционала (6) используется метод сопряженных градиентов, в соответствии с которым очередное приближение вектора \mathbf{p} вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^{s+1} &= \mathbf{p}^s + \gamma^s \mathbf{g}^s, \\ \mathbf{g}^s &= -\mathbf{J}'_p(s) + \beta^s \mathbf{g}^{s-1}, \\ \beta^0 &= 0, \quad \beta^s = \frac{\langle (\mathbf{J}'_p(s) - \mathbf{J}'_p(s-1)), \mathbf{J}'_p(s) \rangle_{R^{N_p}}}{\|\mathbf{J}'_p(s)\|_{R^{N_p}}}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{J}'_p(s)$ – градиент функционала на текущей итерации $s, s = 0, 1, \dots, s^*$, \mathbf{g} – направление поиска, γ – длина шага, определяемая в результате приближенного решения задачи одномерной безусловной минимизации функции J^{s+1} .

Компоненты градиента функционала имеют вид [29]

$$\begin{aligned} J'_{Ck}(s) &= - \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \int_{x_0}^{x_1} \psi(x, \tau) \phi_k^1(T) \frac{\partial T}{\partial x} dx d\tau; \\ J'_{\lambda k}(s) &= - \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \int_{x_0}^{x_1} \psi(x, \tau) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \phi_k^2(T) + \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial \phi_k^2}{\partial T} \right) dx d\tau - \\ &\quad - \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \psi(X_0, \tau) \frac{\partial T}{\partial x}(X_0, \tau) \phi_k^2(T(X_0, \tau)) d\tau + \\ &\quad + \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \psi(X_1, \tau) \frac{\partial T}{\partial x}(X_1, \tau) \phi_k^2(T(X_1, \tau)) d\tau, \\ k &= 1, \dots, N_p, \quad i = 1, 2, \end{aligned}$$

где $\psi(x, \tau)$ – решение краевой задачи, сопряженной к линеаризованной форме задачи (1)–(4).

Регуляризирующим параметром останова итерационного процесса является номер последней итерации s^* , выбранной в соответствии с условием

$$s^*: J(\mathbf{p}^{s^*}) \leq \delta_f,$$

где $\delta_f = \sum_{m=1}^2 \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \sigma_m(\tau) d\tau$ – интегральная ошибка температурных измерений, σ_m – дисперсия погрешности измерений температуры датчиками.

Полученные в результате решения ОЗТ ТФХ образцов А и В материала RVC-20 заметно различаются (рис. 4). Это связано с тем, что образец А имеет большую кажущуюся плотность (меньшую пористость), чем образец В, благодаря чему материал образца А демонстрирует лучшие теплоизоляционные свойства по сравнению с материалом образца В при высоких температурах, когда доминирующим механизмом переноса тепла является излучение. Значения кажущейся плотности образцов А и В материала RVC-60 практически совпадают, поэтому и теплофизические характеристики образцов близки. Образец А материала RVC-80 имеет меньшую плотность (большую пористость), чем образец В, в результате чего теплопроводность образца А при высоких температурах превышает теплопроводность образца В. Размер ячеек ВПЯМ оказывает сильное влияние на радиационную составляющую теплопроводности материала. Наилучшими теплоизоляционными свойствами обладает материал RVC-80 с минимальным диаметром ячейки (рис. 4б).

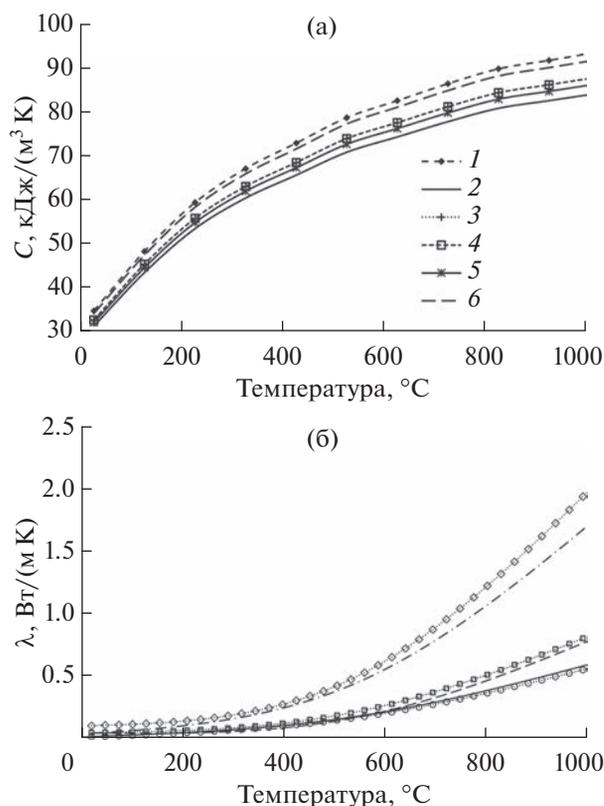


Рис. 4. Объемная теплоемкость (а) и теплопроводность (б) материалов RVC-20 (1, 2), RVC-60 (3, 4), RVC-80 (5, 6): 1, 3, 5 – сборка А; 2, 4, 6 – сборка В.

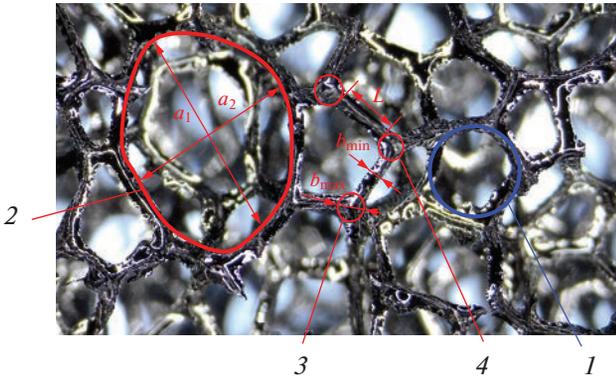


Рис. 5. Элементы структуры ВПЯМ: 1 – пора, 2 – ячейка, 3 – узел, 4 – стержень (тяж).

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАДИАЦИОННО- КОНДУКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ВПЯМ

Исследуемые материалы RVC-20, RVC-60, RVC-80 имеют трехмерную пространственную структуру с открытыми порами (рис. 5). 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 [33]. В одном узле, как правило, соединяются четыре стержня, но встречаются узлы, объединяющие и большее количество стержней (до шести). Толщина стержня переменна по длине и увеличивается в окрестности узла. Форма сечения стержней близка к равностороннему треугольнику с вогнутыми сторонами. Элементы ячеистой структуры (ячейки, поры, стержни и узлы) имеют различные размеры и ориентированы в пространстве произвольным образом. В структуре материала присутствуют различ-

ные дефекты, в результате чего структура реального ВПЯМ может значительно отличаться от ее математической модели.

Размеры элементов структуры исследуемых образцов ВПЯМ уменьшаются с увеличением числа пор/см (табл. 2). В большей степени от числа пор на единицу линейного размера зависят размеры ячеек ВПЯМ и в меньшей степени – размеры стержней и узлов. Влияние числа пор/см на размеры элементов структуры материала уменьшается с ростом числа пор на единицу линейного размера.

Полученные в результате статистической обработки параметры, характеризующие структуру материалов, учитываются при расчете кондуктивной λ_c и радиационной λ_R составляющих теплопроводности в соответствии с разработанной в [11, 12] математической моделью радиационно-кондуктивного теплообмена в ВПЯМ:

$$\lambda_c = \frac{1}{3}(1 - \delta)\lambda_s, \quad (7)$$

$$\lambda_R = \frac{16n^2\bar{\sigma}T^3}{3\beta_R}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\beta_R} = \frac{1}{\beta_0} \int_0^\infty \frac{1}{(1 + 0.4444\rho_\lambda)} \frac{\partial I_{\lambda b}(T)}{\partial I_b(T)} d\lambda, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{1}{a} (2.62\sqrt{1 - \delta} [1 + 0.22(1 - k)^2] \times [1 - 0.22(1 - t)^2]). \quad (10)$$

Здесь δ – пористость ВПЯМ; λ_s – теплопроводность материала, образующего структуру ВПЯМ; n – осредненный показатель преломления среды; $\bar{\sigma}$ – постоянная Стефана–Больцмана; ρ_λ – спектральная отражательная способность материала; $I_b(T)$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела; k – параметр, учитывающий форму поперечного сечения стержня – отношение радиуса окружности, описанной вокруг

Таблица 2. Средние значения параметров структуры образцов ВПЯМ с разным количеством пор/см

Параметр структуры	RVC-20	RVC-60	RVC-80
Число пор/см	7.82	22.68	31.40
a_1 , мкм	3063.59	975.42	689.32
a_2 , мкм	2660.38	884.00	624.53
b_{\max} , мкм	394.52	124.76	90.02
L , мкм	578.51	181.37	129.55
b_{\min} , мкм	216.69	79.53	49.12
a , мкм	2861.99	929.71	656.93
t	0.549	0.638	0.546
Количество измерений	307.00	302.00	307.00

Примечание. a_1 – больший диаметр ячейки, a_2 – меньший диаметр ячейки, L – длина стержня.

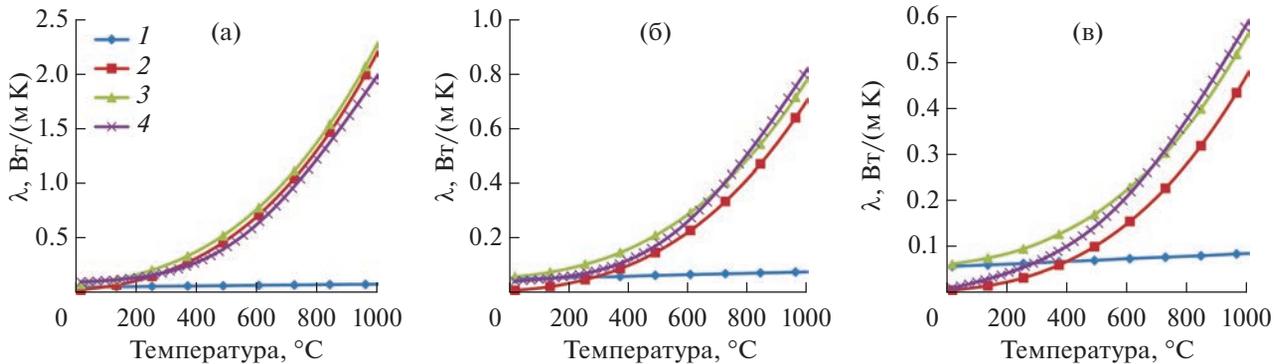


Рис. 6. Теплопроводность материалов RVC-20 (а), RVC-60 (б), RVC-80 (в): 1 – λ_c , расчет по (7)–(10); 2 – λ_R , расчет по (7)–(10); 3 – λ_Σ ; 4 – λ_{eff} .

равностороннего треугольника, моделирующего поперечное сечение стержня, и радиуса кривизны вогнутой боковой поверхности стержня; a – средний диаметр ячейки; $t = b_{\text{min}}/b_{\text{max}}$ – отношение условного диаметра стержня к диаметру узла.

Результаты численного моделирования теплопроводности образцов RVC-60, RVC-80 близки теплопроводности, определенной путем решения обратной задачи теплообмена, исходные данные для которой получены в процессе тепловых испытаний (рис. 6). Относительная погрешность определения коэффициента теплопроводности расчетно-экспериментальным путем λ_{eff} (решением ОЗТ) и теоретически по формулам (7)–(10) $\lambda_\Sigma = \lambda_c + \lambda_R$ рассчитывается с помощью соотношения

$$\Delta_r = \frac{|\lambda_\Sigma - \lambda_{\text{eff}}|}{\lambda_\Sigma}.$$

В диапазоне температур 500–1000°C эта величина не превышает 0.06 для материалов RVC-60, RVC-80 и 0.13 для RVC-20. Существенное расхождение теоретической и экспериментальной зависимостей теплопроводности от температуры образца RVC-20 при температуре выше 800°C связано с тем, что данный образец не является оптически толстой средой [34], поэтому диффузионное приближение, использованное для расчета радиационной составляющей теплопроводности, приводит к значительным погрешностям. Для материала RVC-80 расчетно-экспериментальный метод дает заниженную оценку теплопроводности в диапазоне температур от 20°C до 500°C по сравнению с теоретическим значением, полученным по формулам (7)–(10).

Таким образом, математическая модель радиационно-кондуктивного теплообмена в ВПЯМ (7)–(10) в целом адекватно отражает процессы кондуктивной теплопроводности через твердый каркас и излучения в пористой структуре рассматриваемых материалов и позволяет получать результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования теплофизических свойств высокопористых ячеистых материалов с разной структурой показывают, что наилучшими теплоизоляционными свойствами при высоких температурах, когда доминирующим механизмом переноса тепла является излучение, обладают ВПЯМ с наименьшим размером ячеек. Теплопроводность экспериментальных образцов ВПЯМ, рассчитанная путем численного моделирования, близка теплопроводности, определенной путем решения обратной задачи теплообмена, исходные данные для которой получены в процессе тепловых испытаний. Проведенные исследования подтвердили перспективность использования методологии обратных задач теплообмена для построения математических моделей теплообмена, позволяющих с достаточной точностью прогнозировать изменение теплофизических свойств ВПЯМ при изменении параметров макро- и микроструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Аксенова И.В., Иванова Е.К., Харитоновна Е.В., Лохов А.А. К вопросу создания конструкции защитного теплового экрана космического аппарата “Интергелио-Зонд” // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. Т. 35. № 1. С. 64.
2. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Кузнецова Е.Л. Теплоперенос на боковых поверхностях затупленных носовых частей гиперзвуковых летательных аппаратов // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 797.
3. Горский В.В. Расчетно-теоретическая модель уноса массы углеродных теплозащитных материалов в окислительных газовых потоках // ТВТ. 2020. Т. 58. № 2. С. 249.
4. Голомазов М.М., Иванков А.А. Программный комплекс для разработки систем тепловой защиты космических аппаратов, спускаемых в атмосферах планет // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 3 (37). С. 41.
5. Иванков А.А. О численном решении задачи прогресса многослойной теплозащиты спускаемого аппарата

- та с учетом уноса массы внешних и внутренних слоев покрытия // ЖВМиМФ. 2005. Т. 45. № 7. С. 1279.
6. Колесников А.В., Палешкин А.В., Пронина П.Ф., Шеметова Е.В. Моделирование тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата в имитаторе с сетчатыми модулями // ТВТ. 2022. Т. 60. № 2. С. 242.
 7. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Методы исследования и прогнозирования свойств высокопористых теплозащитных материалов. М.: МАИ, 2014. 263 с.
 8. Резник С.В., Просунцов П.В., Михайловский К.В. Прогнозирование теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов тепловой защиты аэрокосмических летательных аппаратов // ИФЖ. 2015. Т. 88. № 3. С. 577.
 9. Venkataraman S., Hafika R.T., Sankar B.V., Zhu M., Blosser M.L. Optimal Functionally Graded Metallic Foam Thermal Insulation // AIAA J. 2004. V. 42. № 11. P. 2355.
 10. Шурик А.Г. Искусственные углеродные материалы. Пермь: Тип. Пермск. гос. ун-та, 2009. 342 с.
 11. Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Salosina M.O. Design of Thermal Protection Based on Open Cell Carbon Foam Structure Optimization // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 173. 115252.
 12. 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.
 13. Doermann D., Sacadura J.F. Heat Transfer in Open Cell Foam Insulation // J. Heat Transfer. 1996. V. 118. P. 88.
 14. Cellular and Porous Materials: Thermal Properties Simulation and Prediction / Eds. Ochsner A., Murch G.E., de Lemos M.J.S. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 422 p.
 15. Coquard R., Rochais D., Ballis D. Conductive and Radiative Heat Transfer in Ceramic and Metal Foams at Fire Temperatures // Fire Technology. 2012. V. 48. P. 699.
 16. Baillis D., Raynaud M., Sacadura J.F. Determination of Spectral Radiative Properties of Open Cell Foam. Model Validation // J. Thermophys. Heat Transfer. 2000. V. 14. № 2. P. 137.
 17. Cunsolo S., Coquard R., Baillis D., Bianco N. Radiative Properties Modeling of Open Cell Solid Foam: Review and New Analytical Law // Int. J. Thermal Sci. 2016. V. 104. P. 122.
 18. Loretz M., Coquard R., Baillis D., Maire E. Metallic Foams: Radiative Properties/Comparison between Different Models // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2008. V. 109. P. 16.
 19. Cunsolo S., Coquard R., Baillis D., Wilson K.S. Ch., Bianco N. Radiative Properties of Irregular Open Cell Solid Foams // Int. J. Thermal Sci. 2017. V. 117. P. 77.
 20. Samudre P., Kailas S.V. Thermal Performance Enhancement in Open-pore Metal Foam and Foam-fin Heat Sinks for Electronics Cooling // Appl. Thermal Eng. 2022. V. 205. 117885.
 21. Corasaniti S., Luca E. De, Gori F. Effect of Structure, Porosity, Saturating Fluid and Solid Material on the Effective Thermal Conductivity of Open-cells Foams // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 138. P. 41.
 22. Marri G.K., Balaji C. Experimental and Numerical Investigations on the Effect of Porosity and PPI Gradients of Metal Foams on the Thermal Performance of a Composite Phase Change Material Heat Sink // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. V. 164. 120454.
 23. Liu H., Zhao X. Thermal Conductivity Analysis of High Porosity Structures with Open and Closed Pores // Int. J. Heat Mass Transfer. 2022. V. 183. 122089.
 24. Wang M., Pan N. Modeling and Prediction of the Effective Thermal Conductivity of Random Open-cell Porous Foams // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. № 5–6. P. 1325.
 25. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
 26. Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 279 с.
 27. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. М.: Наука, 1988. 285 с.
 28. Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов // Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 2. С. 49.
 29. Алифанов О.М., Вабищевич П.Н., Михайлов В.В. и др. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем. М.: Логос, 2001. 400 с.
 30. Alifanov O.M. Inverse Problems in Identification and Modeling of Thermal Processes: Russian Contributions // Int. J. Numer. Meth. Heat Fluid Flow. 2017. V. 27. № 3. P. 711.
 31. Пелецкий В.Э. Исследование теплопроводности нитрида кремния // ТВТ. 1993. Т. 31. № 5. С. 727.
 32. Смотрицкий А.В., Зиновьев В.Е., Старостин А.А., Коршунов И.Г., Петровский В.Я. Теплофизические свойства керамики на основе нитрида кремния при высоких температурах // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 546.
 33. Будник С.А., Нетелев А.В., Салосина М.О., Самарин В.В. Исследование свойств высокопористых ячеистых теплозащитных материалов // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 12. С. 546.
 34. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 616 с.