

ТЕПЛООТДАЧА И СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЫСОКОПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

© 2012 Ю.А. Кирсанов¹, Р.А. Назипов¹, Е.И. Иванова¹, С.Ю. Жукова²¹ Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН² Научный центр порошкового материаловедения

ГОУВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Поступила в редакцию 29.05.2012

Даются уточненные математическая модель структуры высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ) и модели теплофизических свойств каркаса и теплоносителя в ВПЯМ. Произведена обработка результатов экспериментальных исследований гидродинамического сопротивления и внутренней теплоотдачи в ВПЯМ. Полученные результаты обобщены критерияльными уравнениями, которые учитывают влияние как числа Рейнольдса, так и относительных параметров, характеризующих индивидуальные особенности пористой структуры пористого материала. Ключевые слова: Пористое тело, каркас, геометрия, модель, теплофизические свойства, теплоотдача, гидродинамическое сопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

Пористые материалы хорошо зарекомендовали себя в системах охлаждения теплонапряженных узлов ракетных и газотурбинных двигателей, лазеров, атомных реакторов [1-3]. В системах, где существуют жесткие ограничения на гидравлические потери теплоносителей, как например в рекуперативных теплообменниках, более целесообразным является применение высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ), технология изготовления которых разработана в Научном центре порошкового материаловедения ПНИПУ (г. Пермь) [4, 5].

Теоретической базой применения ВПЯМ в теплообменных аппаратах служат:

- математическая модель геометрической структуры ВПЯМ (геометрическая модель);
- математические выражения для эффективных теплофизических свойств каркаса и теплоносителя в пористом материале (теплофизическая модель);
- математическое описание температурных полей в каркасе и потоке теплоносителя (модель тепловых процессов);
- данные о теплогидродинамических характеристиках пористого материала.

Геометрическая и теплофизическая модели ВПЯМ предложены в работе [6]. Модель тепло-

вых процессов в пористом цилиндре, охлаждаемом однофазным теплоносителем при неизменной по длине цилиндра температуре образующей поверхности рассмотрена в работе [7], а при изменяющейся в продольном направлении температуре образующей поверхности – в работе [8]. Методика исследования теплогидродинамических характеристик пористых материалов описана в работе [7].

Тщательный анализ геометрической модели структуры ВПЯМ [6] выявил неточность в принятых допущениях, негативно отразившуюся на теплофизической модели и определении температурных полей в каркасе и потоке теплоносителя. Целью данной работы является устранение указанной неточности и экспериментальное получение теплогидродинамических характеристик ВПЯМ.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВПЯМ

Основным структурным элементом ВПЯМ является ячейка, представляющая собой по форме вытянутый эллипсоид вращения. Укладка ячеек близка к плотной упаковке шаров с 12 соседними ячейками, т.е. каждая пора в среднем имеет 12 отверстий (рис. 1,а) [9].

Геометрическая модель ВПЯМ построена при следующих допущениях [6]:

- пористая структура однородна по всему объему;
- все поры сквозные, то есть глухих (непроходных) пор в пористом материале нет;
- пористая ячейка представляет собой комбинацию сферических пор диаметром $d_{сф}$ и соединительных каналов диаметром $d_{к}$;
- центры 4-х ближайших сферических пор

Кирсанов Юрий Анатольевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

E-mail: kirsanov-yury@mail.ru

Назипов Рустем Альбертович, кандидат технических наук, научный сотрудник. E-mail: nazi-pov_r@yahoo.com

Иванова Екатерина Ивановна, аспирант.

E-mail: kate_rina_pt_3_04@bk.ru

Жукова Светлана Юрьевна, техник.

E-mail: zvetik_22@mail.ru

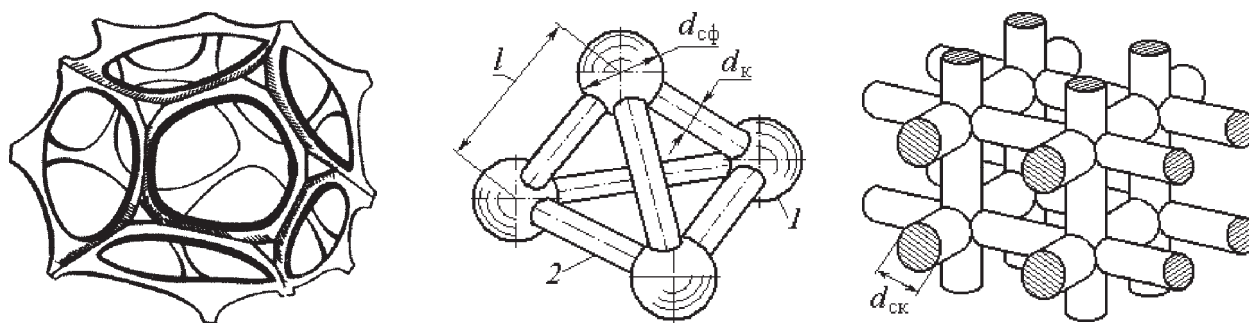


Рис. 1. Структура ВПЯМ:

а) – ячейка ВПЯМ; б) – внешний вид икосаэдра; в) – тетраэдрическая модель; 1 – сферическая пора; 2 – соединительный канал; в) – проволочная модель

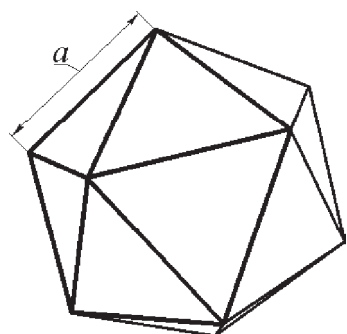


Рис. 2. Икосаэдр

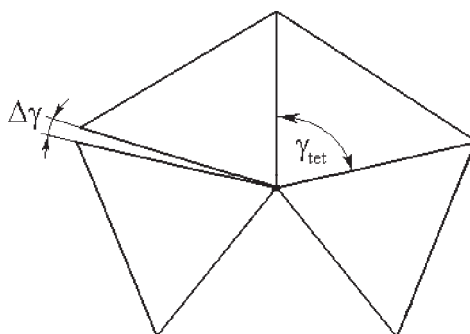


Рис. 3. Многогранник из 5 тетраэдров

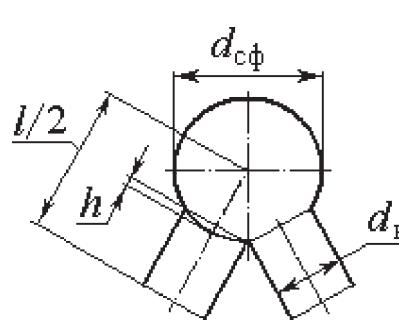


Рис. 4. Геометрия пор

располагаются в вершинах тетраэдра на одинаковом расстоянии l друг от друга, а радиальные ребра тетраэдра являются осевыми линиями соединительных каналов (рис. 1, б);

- 20 тетраэдров с общей центральной сферической порой образуют многогранник, имеющий 12 внешних вершин, каждая из которых является центром сферической поры.

Согласно этой модели, называемой тетраэдрической, центральная пора сообщается 12 каналами (отверстиями) с ближайшими 12-ю соседними порами, что соответствует реальной ячейке, показанной на рис. 1, а. Тетраэдрическая модель ВПЯМ позволила при заданных значениях диаметров сферы $d_{сф}$ и канала $d_{к}$ получить формулы для таких характеристик пористости, как объемная пористость ϵ_v , эквивалентный гидравлический диаметр пористости d_3 , удельная поверхность $f_{ск}$ и эквивалентная толщина скелета $\delta_{ск}$ (рис. 1, в), удельная площадь поперечного сечения каркаса $\epsilon_{ск}$ и др.

Полученные в работе [6] формулы для характеристик пористости являются приближенными. Неточность заключается в том, что многогранник из 20-ти тетраэдров имеет объем, меньший, чем икосаэдр (рис. 2), у которого радиус описанной сферы совпадает с длиной ребра тетраэдра l . Причиной тому является то обстоятельство, что икосаэдр представляет собой комбинацию не из тетраэдров, а из многогранников, образованных из 20 пирамид, основанием каждой из которых

является равносторонний треугольник со стороной a (рис. 2), а боковые или радиальные ребра, сходящиеся в центре икосаэдра, имеют длину [10]

$$l = a \sqrt{2(5 + \sqrt{5})} / 4 \approx 0,951 \cdot a.$$

Угол между боковыми гранями пирамид в икосаэдре равен $g = 2\pi/5 = 72^\circ$. У тетраэдра угол между боковыми гранями составляет $\gamma_{tet} = 69^\circ 5' 41''$, то есть $\gamma_{tet} < \gamma$, и поэтому при сложении 5 тетраэдров между гранями остается зазор $\Delta\gamma$ (рис. 3). Другими словами, в ранее рассмотренной тетраэдрической модели [6] занижен относительный объем каркаса в ВПЯМ.

Для уточнения формул, определяющих характеристики пористости ВПЯМ, рассматривается икосаэдр¹, состоящий из 20 одинаковых пирамид, основанием каждого из которых является равносторонний треугольник со стороной a , а боковые или радиальные ребра имеют длину l . Вершины пирамид находятся в центре центральной сферической поры.

В икосаэдре выделяется контрольный элемент в виде третьей части пирамиды с одним радиальным ребром длиной $l/2$. Контрольный элемент включает в себя $1/60$ часть центральной поры за вычетом сектора $\gamma = 2\pi/5$ сферического сегмента² высотой $h = (d_{сф} - \sqrt{d_{сф}^2 - d_{к}^2})/2$

¹ Рассматриваемую далее геометрическую модель ВПЯМ условно назовем икосаэдрической.

² В тетраэдрической модели [6] указанный сектор сферического сегмента ошибочно прибавлен, а не вычтен из объема поры.

(рис. 4), опирающегося на канал диаметром d_k , и такого же сектора соединительного канала диаметром d_k и длиной $(l - d_{\text{сф}})/2 + h$.

Объем икосаэдра с ребром основания a составляет [10]

$$V_{\text{ико}} = \frac{5(3 + \sqrt{5})}{12} a^3 = \frac{40(3 + \sqrt{5})}{3\sqrt{2}(5 + \sqrt{5})^{3/2}} l^3 \approx 2,536 \cdot l^3.$$

Объем контрольного элемента составляет 1/60 часть объема икосаэдра с длиной радиального ребра $l/2$:

$$V_{\text{к.эл}} = \frac{3 + \sqrt{5}}{36\sqrt{2}(5 + \sqrt{5})^{3/2}} l^3 \approx 5,284 \cdot 10^{-3} l^3,$$

что, примерно, в 1,076 раз превышает объем контрольного элемента тетраэдрической модели, рассмотренной в [6].

Объем пор, заключенных в контрольном элементе:

$$V_{\text{пор}} = \frac{1}{60} \frac{\pi d_{\text{сф}}^3}{6} + \frac{1}{5} \left[\frac{\pi d_k^2}{4} \left(\frac{l - d_{\text{сф}}}{2} + h \right) - \frac{\pi h^2}{3} \left(\frac{3}{2} d_{\text{сф}} - h \right) \right] = \frac{\pi d_{\text{сф}}^3}{360} F_1(\bar{d}_k, \bar{l}, \bar{h}),$$

где

$$F_1(\bar{d}_k, \bar{l}, \bar{h}) = 1 + 9\bar{d}_k^2(\bar{l} - 1 + 2\bar{h}) - 12\bar{h}^2(3 - 2\bar{h}) = (1 - \bar{d}_k^2) \left(6\sqrt{1 - \bar{d}_k^2} - 9\bar{l} \right) + 9\bar{l} - 5;$$

$$\bar{d}_k = d_k / d_{\text{сф}}; \quad \bar{l} = l / d_{\text{сф}}; \quad \bar{h} = h / d_{\text{сф}}.$$

Поверхность пор, заключенных в контрольном элементе:

$$S_{\text{пор}} = \frac{\pi d_{\text{сф}}^2}{60} + \frac{1}{5} \left[\pi d_k \left(\frac{l - d_{\text{сф}}}{2} + h \right) - \pi d_{\text{сф}} h \right] = \frac{\pi d_{\text{сф}}^2}{60} F_2(\bar{d}_k, \bar{l}),$$

$$\text{где } F_2(\bar{d}_k, \bar{l}) = 1 + 6\bar{d}_k(\bar{l} - 1 + 2\bar{h}) - 12\bar{h}^3.$$

Объемная пористость представляет собой отношение объема пор $V_{\text{пор}}$ к объему контрольного элемента $V_{\text{к.эл}}$:

$$\varepsilon_v = V_{\text{пор}} / V_{\text{к.эл}} = b_1 F_1(\bar{d}_k, \bar{l}, \bar{h}) / \bar{l}^3, \quad (1)$$

где

$$b_1 = \left[\frac{\pi\sqrt{2}(5 + \sqrt{5})^{3/2}}{10(3 + \sqrt{5})^3} \right] \approx 1,652.$$

Эквивалентный гидравлический диаметр пористости d_3 определяется как отношение учетверенного объема пор к их поверхности:

$$d_3 = 4 \frac{V_{\text{пор}}}{S_{\text{пор}}} = \frac{2}{3} \frac{F_1(\bar{d}_k, \bar{l}, \bar{h})}{F_2(\bar{d}_k, \bar{l})} d_{\text{сф}}. \quad (2)$$

Значения d_3 по формуле (2) меньше аналогичных значений по тетраэдрической модели [6]

³ В тетраэдрической модели [6] функция $F_2(\bar{d}_k, \bar{l})$ занижена из-за сокращения длины соединительного канала на высоту сферического сегмента h .

из-за расхождений функций $F_1(\bar{d}_k, \bar{l})$ и $F_2(\bar{d}_k, \bar{l})$. Расхождения составляют, примерно, 32 % при $\varepsilon_v = 0,8$ и 27 % при $\varepsilon_v = 0,966$.

Удельная поверхность пористой структуры равна отношению площади поверхности пор, заключенных в контрольном элементе, к объему этого элемента:

$$f_{\text{ск}} = \frac{S_{\text{пор}}}{V_{\text{к.эл}}} = \frac{3\sqrt{2}\pi(5 + \sqrt{5})^{3/2}}{5d_{\text{сф}}(3 + \sqrt{5})^3} F_2(\bar{d}_k, \bar{l}) \approx 9,91 \frac{F_2(\bar{d}_k, \bar{l})}{d_{\text{сф}} \bar{l}^3}, \quad (3)$$

что, примерно, в 1,86 раз больше значения этой величины по тетраэдрической модели [6].

Путем замены скелета эквивалентным ему по объему $V_{\text{ск}} = (1 - \varepsilon_v) V_{\text{к.эл}}$ и площади поверхности $S_{\text{пор}}$ проволочным каркасом (рис. 1, в) получается формула для эквивалентного диаметра скелета:

$$d_{\text{ск}} = \frac{4V_{\text{ск}}}{S_{\text{пор}}} = \frac{20}{3\pi\sqrt{2}} \frac{(3 + \sqrt{5})}{(5 + \sqrt{5})^{3/2}} \frac{(1 - \varepsilon_v) d_{\text{сф}} \bar{l}^3}{F_2(\bar{d}_k, \bar{l})} \approx 0,4036 \frac{(1 - \varepsilon_v) d_{\text{сф}} \bar{l}^3}{F_2(\bar{d}_k, \bar{l})}. \quad (4)$$

Относительная площадь поперечного сечения скелета $\varepsilon_{\text{ск}}$ есть отношение площади поперечного сечения проволочного каркаса (рис. 1, в), заключенного в кубе единичного объема, к площади одной из граней этого куба, то есть к 1 м^2 . Длина проволочного каркаса, заключенного в единичном кубе, составляет

$$l_{\text{пр}} = f_{\text{ск}} / (\pi d_{\text{ск}}), \text{ м/м}^3.$$

На одно измерение (координату) приходится 1/3 часть этой длины и поэтому количество проволок единичной длины, приходящееся на одно измерение, равно

$$N_{\text{пр}} = l_{\text{пр}} / 3 = f_{\text{ск}} / (3\pi d_{\text{ск}}), \text{ 1/м}^2.$$

Площадь поперечного сечения $N_{\text{пр}}$ проволоки равна относительной доле поперечного сечения каркаса

$$\varepsilon_{\text{ск}} = \frac{f_{\text{ск}}}{3\pi d_{\text{ск}}} \frac{\pi d_{\text{ск}}^2}{4} = \frac{f_{\text{ск}} d_{\text{ск}}}{12}.$$

После подстановки сюда формул (3) и (4) получается формула для $\varepsilon_{\text{ск}}$ при условии, что каркас не жесткий, то есть гибкий, так как он не содержит узлов, поскольку “проволоки” разных измерений не пересекаются друг с другом:

$$\varepsilon_{\text{ск}} = 4(1 - \varepsilon_v) / (5 + \sqrt{5})^{3/2} \approx (1 - \varepsilon_v) / 4,866. \quad (5)$$

В случае каркаса с жесткой структурой, образованной пересекающимися друг с другом проволоками разных измерений, в местах пересечения проволок будут расположены узлы, количество которых равняется общему количеству проволок единичной длины. Суммарная длина, а отсюда – и количество проволок в единичном кубе $N_{\text{пр}}$ в этом случае возрастет по сравнению

с предыдущим случаем в $3/(3 - 2\bar{d}_{ск})$ раза из-за того, что на образование одного узла придется длина, равная $1/3$ диаметра скелета $d_{ск}$ одного измерения, а $2/3$ длины узла покроются за счет длины проволок двух других измерений. В результате формула для относительной площади поперечного сечения жесткого скелета принимает вид:

$$\epsilon_{ск} = \frac{12}{(5 + \sqrt{5})^{3/2}} \frac{1 - \epsilon_v}{3 - 2\bar{d}_{ск}} \approx 0,616 \frac{1 - \epsilon_v}{3 - 2\bar{d}_{ск}}.$$

Уточнение относительного объема каркаса икосаэдрической моделью ВПЯМ привело к тому, что при фиксированных величинах ϵ_v и $d_{сф}$ значения $\bar{d}_э$ сократились, а диаметр перемычек $\bar{d}_{ск}$ и удельная поверхность $f_{ск}$ увеличились; значения $\epsilon_{ск}$ благодаря росту $\bar{d}_{ск}$ несколько возросли при малых значениях ϵ_v и остались теми же при больших значениях ϵ_v .

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВПЯМ

Формулы (1)-(6) включают в себя (помимо \bar{h} , которая выражается через $\bar{d}_к$) 7 величин: ϵ_v , \bar{l} , $\bar{d}_к$, $\bar{d}_э$, $\bar{d}_{ск}$, $f_{ск}$ и $\epsilon_{ск}$, две из которых должны быть заданными, т.е. независимыми. На практике независимыми могут быть объемная пористость ϵ_v , диаметр пор $d_{сф}$ и межцентровое расстояние l .

При фиксированном значении \bar{l} величина $\bar{d}_к$ определяется из уравнения, получаемого из формулы (1):

$$6x^3 - 9\bar{l}x^2 + 9\bar{l} - 5 - b_2 = 0, \quad (7)$$

где $x = \sqrt{1 - \bar{d}_к^2}$; $b_2 = \epsilon_v \bar{l}^3 / b_1$.

Уравнение (7) может иметь от одного до трех вещественных корней. Из них физический смысл имеет тот, который удовлетворяет условиям:

$$0 < \bar{d}_к, \bar{d}_э < 1; \quad f_{ск} > 0. \quad (8)$$

Найденная таким образом величина $\bar{d}_к$ вместе

с известными значениями ϵ_v и \bar{l} позволяет по формулам (2)-(4), (6) вычислить $\bar{d}_э$, $\bar{d}_{ск}$, $f_{ск}$ и $\epsilon_{ск}$.

Выполнение условий (8), как и возможность определения остальных параметров пористости, во многом зависит от точности измерения независимых параметров. При правильной геометрической форме пористого образца (цилиндра, призмы) наиболее точно определяется величина ϵ_v . При тщательных измерениях массы и размеров образца погрешность измерения ϵ_v не превосходит долей процента. Величина $d_{сф}$ вычисляется как среднестатистическое значение измеренных диаметров пор на поверхности образца. При $d_{сф} \sim 10^{-3}$ м погрешность измерения этой величины не превышает нескольких процентов. Наименьшей точностью измерения характеризуется величина l , так как положение центров пор приходится оценивать "на глазок".

Для оценки диапазона возможных значений \bar{l} по уравнению (7) были вычислены ее минимальные и максимальные значения (нижняя и верхняя границы) при разных значениях объемной пористости в диапазоне $0,78 \leq \epsilon_v \leq 0,98$. Вычисленные значения затем были аппроксимированы функциями:

$$\bar{l}_{мин} = 1,9216 - 1,0946 \cdot \epsilon_v + 0,3554 \cdot \epsilon_v^2;$$

$$\bar{l}_{макс} = 3,1721 - 2,5882 \cdot \epsilon_v + 0,8705 \cdot \epsilon_v^2.$$

В табл. 1 представлены граничные значения наиболее важных для расчета теплового состояния геометрических характеристик ВПЯМ, рассчитанные при

$$\bar{l}_{ниж} = 0,99 \cdot \bar{l}_{мин} + 0,01 \cdot \bar{l}_{макс}$$

$$\text{и } \bar{l}_{верх} = 0,01 \cdot \bar{l}_{мин} + 0,99 \cdot \bar{l}_{макс}.$$

Из табл. 1 видно, что границы изменения характеристик практически смыкаются при $\epsilon_v = 0,80$, а при $\epsilon_v \rightarrow 1$ разность между верхней и нижней границами возрастает. Наибольшая разность наблюдается у $\bar{d}_э$ и $f_{ск} d_{сф}$, достигая, примерно, $\pm 2,5\%$ от середины диапазона при $\epsilon_v = 0,98$. Отклонение $d_{ск}$ при $\epsilon_v = 0,98$ от его среднего значения составляет приблизительно

Таблица 1. Диапазоны изменения характеристик пористости ВПЯМ

ϵ_v	$\bar{l}_{ниж}$	$\bar{l}_{верх}$	$\bar{d}_э$ при		$f_{ск} d_{сф}$ при		$\bar{d}_{ск}$ при		$\epsilon_{ск}$ при	
			$\bar{l}_{ниж}$	$\bar{l}_{верх}$	$\bar{l}_{ниж}$	$\bar{l}_{верх}$	$\bar{l}_{ниж}$	$\bar{l}_{верх}$	$\bar{l}_{ниж}$	$\bar{l}_{верх}$
0,80	1,2772	1,6548	0,6172	0,6175	5,1846	5,1824	0,1543	0,1544	0,0458	0,0458
0,86	1,2465	1,5866	0,6222	0,6324	5,5289	5,4395	0,1013	0,1030	0,0309	0,0309
0,92	1,2184	1,5246	0,6275	0,6481	5,8645	5,6780	0,0546	0,0564	0,0171	0,0171
0,98	1,193	1,4688	0,6315	0,6648	6,2074	5,8964	0,0129	0,0136	0,0041	0,0041

$\pm 1,5\%$; на $\epsilon_{\text{ск}}$ величина \bar{l} практически не оказывает влияния.

Сравнительно небольшие диапазоны изменений наиболее важных геометрических характеристик пористости ВПЯМ дают возможность использовать их значения, соответствующие средней величине относительного межцентрового расстояния $\bar{l}_{\text{ср}} = (\bar{l}_{\text{min}} + \bar{l}_{\text{max}})/2$, аппроксимированные со средним квадратическим отклонением σ :

$$\begin{aligned} \bar{d}_{\text{э.ср}} &= 0,3573 + 0,2923 \cdot \epsilon_v, & \sigma &= 2,3 \cdot 10^{-4}; \\ (f_{\text{ск}} d_{\text{сф}})_{\text{ср}} &= 2,402 + 3,772 \cdot \epsilon_v, & \sigma &= 8 \cdot 10^{-3}; \\ \bar{d}_{\text{ск.ср}} &= 0,7481 - 0,7527 \cdot \epsilon_v, & \sigma &= 1,8 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения $\epsilon_{\text{ск}}$ рассчитываются по формуле (6).

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВПЯМ

Для расчета режимов теплопереноса в пористых структурах необходимы данные о геометрических и теплофизических свойствах этих структур. К теплофизическим свойствам относятся теплопроводность, плотность и теплоемкость пористой структуры и фильтрующегося сквозь нее теплоносителя.

Существуют различные подходы к оценке теплофизических свойств пористых материалов. В работах [11, 12] свойства каркаса (скелета) материала оцениваются совместно со средой, заполняющей поры. Такой подход оправдан тогда, когда заполняющая поры среда неподвижна и процесс переноса теплоты сводится только к теплопроводности материала, например, при оценке его теплоизолирующей способности. В случаях, когда через пористый материал течет теплоноситель, приходится учитывать его теплообмен с поверхностью пор в самом пористом материале, и тогда необходимы сведения о свойствах отдельных участников процесса переноса теплоты – каркаса и теплоносителя.

Плотность и объемная теплоемкость каркаса являются линейными функциями объемной пористости [11, 12]:

$$\bar{\rho}_{\text{ск}} = 1 - \epsilon_v, \quad (\bar{\rho}c)_{\text{ск}} = 1 - \epsilon_v. \quad (10)$$

где $\bar{\rho}_{\text{ск}} = \rho_{\text{ск}}/\rho_{\text{мат}}$; $\rho_{\text{ск}}$ – эффективная плотность каркаса, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{мат}}$ – теплопроводность материала каркаса, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρc – объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3\text{К})$; c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

По теплопроводности наибольшее число данных в литературе относится к низкопористым структурам. Так, относительную эффективную теплопроводность каркаса в случае щелевой и щеточной структур предлагается оценивать по формуле [3]

$$\bar{\lambda}_{\text{ск}} = 1 - \epsilon_v, \quad (11)$$

где $\bar{\lambda}_{\text{ск}} = \lambda_{\text{ск}}/\lambda_{\text{мат}}$; $\lambda_{\text{ск}}$ – эффективная теплопроводность каркаса, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $\lambda_{\text{мат}}$ – теплопроводность материала каркаса, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Для канальной пористости рекомендуется соотношение [3, 13]

$$\bar{\lambda}_{\text{ск}} = (1 - \epsilon_v)/(1 + \epsilon_v). \quad (12)$$

Для спеченных зернистых, волокнистых и сетчатых материалов, трубчатых структур наряду с соотношением (12) применяют формулу [3, 12]

$$\bar{\lambda}_{\text{ск}} = (1 - \epsilon_v)/(1 + \epsilon_v)^2. \quad (13)$$

Для ВПЯМ В.Н. Анциферов и сотр. [13] предложили зависимость

$$\bar{\lambda}_{\text{ск}} = (1 - \epsilon_v)/5. \quad (14)$$

В работе [6], исходя из физических соображений, предложено относительную эффективную теплопроводность каркаса принять пропорциональной относительной площади поперечного сечения каркаса, то есть $\bar{\lambda}_{\text{ск}} = \epsilon_{\text{ск}}$. Тогда согласно формулам (5) и (6) выражения для относительной эффективной теплопроводности каркаса ВПЯМ с гибкой и жесткой структурами:

$$\bar{\lambda}_{\text{ск}} = (1 - \epsilon_v)/4,866, \quad (15)$$

$$\bar{\lambda}_{\text{ск}} = 0,616 \frac{1 - \epsilon_v}{3 - 2\bar{d}_{\text{ск}}}. \quad (16)$$

Зависимости эффективной теплопроводности каркаса от объемной пористости по выражениям (11)-(16) с подстановкой в формулу (16) $\bar{d}_{\text{ск.ср}}$ из (9) показаны на рис. 5. Из рис. 5 видно, что в диапазоне $\epsilon_v \geq 0,8$ значения относительной эффективной теплопроводности каркаса ВПЯМ, вычисленные по формулам (14), (15) и (16) практически совпадают друг с другом. Близ-

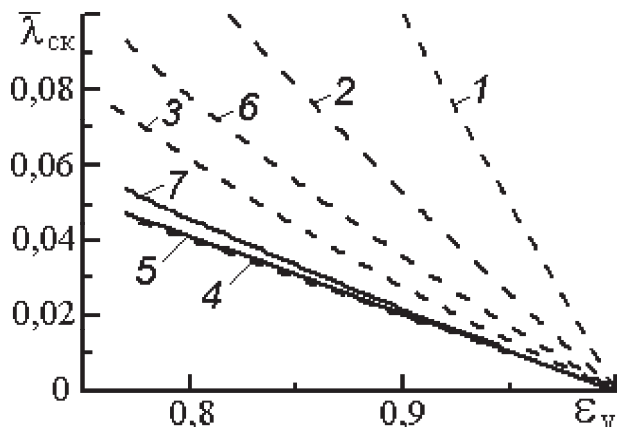


Рис. 5. Относительная эффективная теплопроводность каркаса по формулам: 1 – (11); 2 – (12); 3 – (13); 4 – (14); 5 – (15); 6 – тетраэдрическая модель [6]; 7 – (16)

ки к ним и значения $\bar{\lambda}_{ск}$, получаемые по формуле (13), чего нельзя сказать о значениях $\bar{\lambda}_{ск}$ по формулам (11) и (12). Значения $\bar{\lambda}_{ск}$ по тетраэдрической модели, рассмотренной в работе [6], при $\epsilon_v = 0,8$ превышают значения, получаемые по формуле (16), примерно на 80 %.

Относительные эффективные теплофизические свойства теплоносителя в пористом материале исходя из физических представлений логично определять по формулам:

$$\bar{\rho}_{f,эф} = \epsilon_v, \quad (\bar{\rho c})_{f,эф} = \epsilon_v, \\ \bar{\lambda}_{f,эф} = 1 - \epsilon_{ск}, \quad (17)$$

где $\bar{\rho}_{f,эф} = \rho_{f,эф} / \rho_f$; $(\bar{\rho c})_{f,эф} = (\rho c)_{f,эф} / (\rho c)_f$; $\bar{\lambda}_{f,эф} = \lambda_{f,эф} / \lambda_f$; ρ_f , $(\rho c)_f$ и λ_f – свойства теплоносителя вне пористого материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВПЯМ

Методика исследования гидродинамического сопротивления и внутренней теплоотдачи пористого цилиндра диаметром $D_{ц}$ и длиной l_T описана в работе [7]. Геометрические характеристики исследованных 11 цилиндрических образцов ВПЯМ диаметром $D_{ц}$ и длиной l_T рассчитаны по формулам (9) и (6) и представлены в табл. 2.

Коэффициент сопротивления пористых тел рассчитан по формуле

$$\zeta_{d_3} = \frac{2\Delta p}{\rho_f w_f^2} \frac{d_3}{l_T}, \quad (18)$$

где Δp – разность давлений теплоносителя до и после пористого тела, Па; $w_f = w_{f0} / (1 - \epsilon_{ск})$ – скорость фильтрации теплоносителя сквозь по-

ристое тело, м/с; w_{f0} – средняя скорость теплоносителя в канале без пористого тела, м/с; ν_f – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с; l_T – длина пористого тела, м.

Результаты расчетов ζ_{d_3} для исследованных образцов показаны на рис. 6,а.

Обобщение результатов обычно производят с помощью модифицированного уравнения Дарси

$$-\frac{dp}{dz} = \alpha_r \eta_f w_f + \beta_r \rho_f w_f^2, \quad (19)$$

или линейным уравнением регрессии

$$\zeta_{d_3} = A_r + B_r / \text{Re}_{d_3}. \quad (20)$$

Здесь α_r и β_r – вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления пористого материала; $\eta_f = \rho_f \nu_f$ – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с; A_r и B_r – коэффициенты регрессии; $\text{Re}_{d_3} = w_f d_3 / \nu_f$ – число Рейнольдса.

Между коэффициентами α_r и β_r , с одной стороны, и A_r и B_r , с другой, существует связь:

$$A_r = 2d_3 \beta_r, \quad B_r = 2d_r^2 \alpha_r. \quad (21)$$

Путем аппроксимации точек, показанных на рис. 6,а, уравнением (20) для каждого образца были найдены коэффициенты A_r и B_r , а по формулам (21) затем рассчитаны коэффициенты α_r и β_r , значения которых даны в табл. 3. Аппроксимация полученных значений α_r и β_r методом Гаусса, показанная на рис. 6,б и рис. 6,в, позволила получить следующие критериальные уравнения:

$$\alpha_r d_{сф}^2 = C_\alpha \epsilon_v^{-75,6} (1 - \epsilon_v)^{-5,0} \bar{d}_{сф}^{7,9} (l_T / d_{сф})^{5,6}, \quad (22)$$

$$\beta_r d_{сф} = C_\beta \epsilon_v^{-31,7} (1 - \epsilon_v)^{-0,99} \bar{d}_{сф}^{6,7} (l_T / d_{сф})^{6,9}, \quad (23)$$

где $C_\alpha = 5,82 \cdot 10^{-17}$, $C_\beta = 2,54 \cdot 10^{-13}$; $\bar{d}_{сф}$ – диаметр

Таблица 2. Характеристики образцов ВПЯМ

Образец	Материал	$D_{ц} \cdot 10^3$, м	$l_T \cdot 10^3$, м	ϵ_v	$d_{сф} \cdot 10^3$, м	$d_3 \cdot 10^3$, м	$d_{ск} \cdot 10^3$, м	$\epsilon_{ск}$	$f_{ск}$, м ⁻¹
1	Медь	50,2	39,8	0,965	3,05	1,950	0,131	0,0119	1979
2	Нихром	49,9	33,7	0,954	3,49	2,220	0,200	0,0160	1719
3	Нихром	50,1	34,2	0,804	0,80	0,474	0,214	0,0794	6787
4	Нихром	49,9	34,2	0,871	3,93	2,402	0,659	0,0483	1451
5	Нихром	50,0	34,1	0,844	2,16	1,304	0,448	0,0603	2588
6	Медь	49,7	39,2	0,966	5,27	3,371	0,221	0,0117	1146
7	Нихром	50,0	41,3	0,867	1,98	1,206	0,34	0,0502	2876
8	Нихром	50,1	34,0	0,867	3,00	1,829	0,520	0,0500	1897
9	Медь	49,7	39,0	0,965	3,79	2,424	0,162	0,0119	1593
10	Медь	49,8	38,6	0,959	5,24	3,337	0,267	0,0143	1149
11	Нихром	49,6	33,7	0,800	0,80	0,473	0,220	0,0816	6764

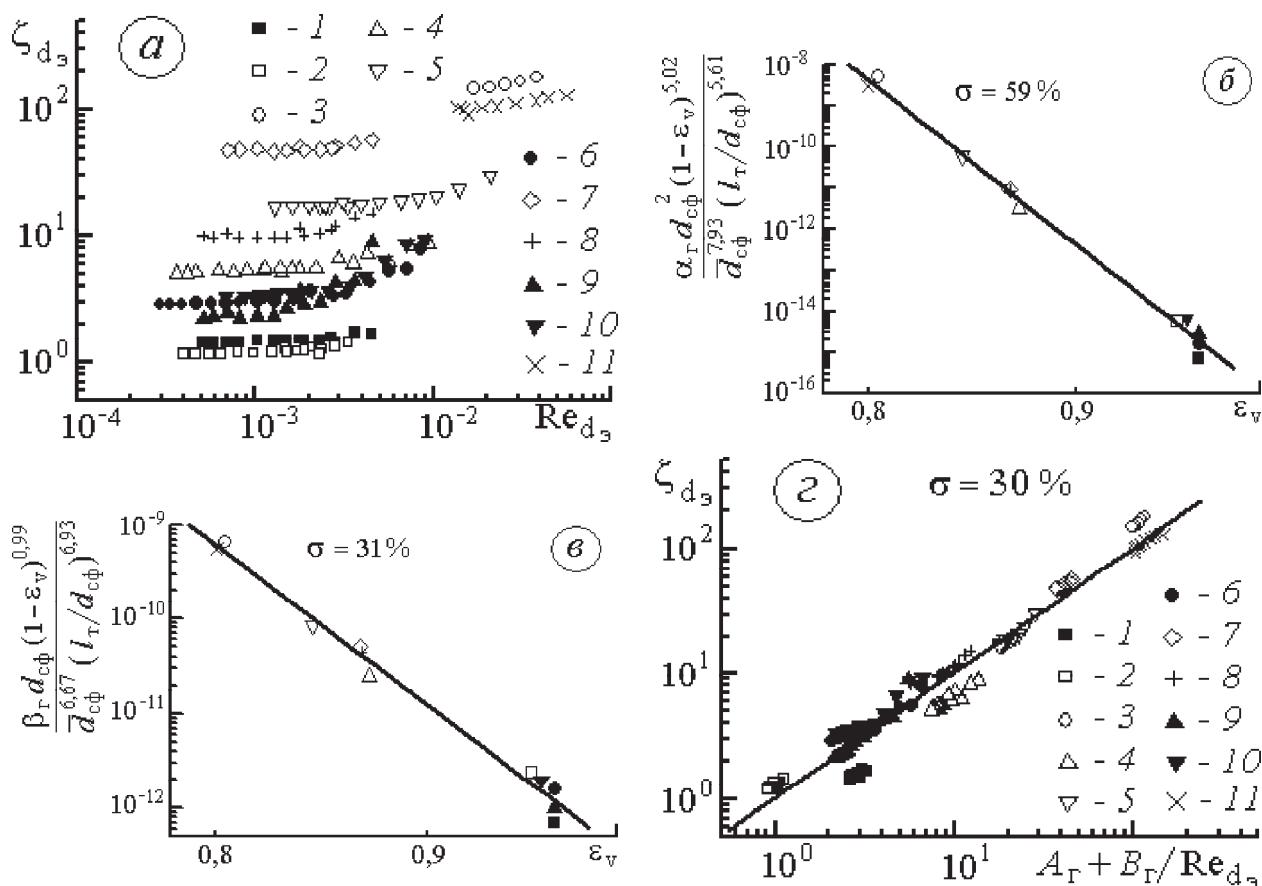


Рис. 6. Гидродинамическое сопротивление образцов ВПЯМ

а – индивидуальные характеристики; б – обобщение вязкостного коэффициента сопротивления; в – то же инерционного коэффициента; з – обобщенная характеристика; 1-11 – номера образцов

Таблица 3. Значения коэффициентов уравнений (19), (20) и (24)

Параметры	Образцы										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A_T	1,442	1,097	103,5	4,075	13,030	2,562	37,02	7,304	1,687	2,353	76,68
B_T	61,78	64,56	1054	256,2	398,6	520,5	354,5	288,3	384,0	730,6	517,2
$\alpha_T \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2$	8,122	6,550	2346	22,19	117,1	22,90	121,8	43,05	32,69	32,80	1156
$\beta_T \cdot 10^{-2}, \text{ м}^1$	3,698	2,471	1092	8,481	49,95	3,801	153,5	19,95	3,481	3,525	810,7
$(\beta_T/\alpha_T) \cdot 10^5, \text{ м}$	4,553	3,773	4,653	3,821	4,266	1,660	12,60	4,636	1,065	1,075	7,012
$A_T \cdot 10^3$	4,26	3,65	2,82	5,15	4,24	5,49	3,82	2,85	8,16	8,35	1,49
n_T	1,11	1,11	0,88	1,15	1,01	1,10	0,99	1,15	1,06	1,10	0,98

сферической поры, отнесенный к 1 мм.

Опытные значения ζ_{d_s} затем были обобщены уравнением (20), в котором коэффициенты A_T и B_T рассчитаны по формулам (21)-(23). Результаты обобщения показаны на рис. 6,з.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ТЕПЛОТДАЧИ ВПЯМ

Опытные значения внутренней теплоотдачи для отдельных образцов обобщались критерияльным уравнением вида:

$$Nu_{l^*} = A_T Re_{l^*}^{n_T} Pr_f^{0,4} C_t, \quad (24)$$

где $Nu_{l^*} = \alpha l^* / \lambda_f$; $Nu_{v,l^*} = \alpha_v (l^*)^2 / \lambda_f$; α – поверхностный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); $\alpha_v = \alpha f_{ck}$ – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³К); l^* – определяющий размер, м; $C_t = (\eta_f / \eta_w)^{0,14}$ – для газов; $C_t = (Pr_f / Pr_w)^{0,25}$ – для жидкостей.

Среди исследователей существуют разные мнения по вопросу выбора l^* . Так, В.М. Поляев и сотр. [1, 2], Ю.А. Зейгарник, Ф.П. Иванов [14]

и др. полагают, что в качестве такового следует брать отношение β_r/α_r . Ю.Ф. Гортышов и сотр. за определяющий размер брали средний диаметр пор d_{cf} [15] и диаметр трубы D [16]. Японские исследователи Fukuda К. и сотр. [17] предложили $l^* \equiv 1/\sqrt{\alpha_r}$ и $l^* \equiv 1/\beta_r$. Авторы данной работы считают целесообразным по аналогии с обычными каналами использовать в качестве определяющего размера эквивалентный диаметр d_3 .

На рис. 7 показаны результаты исследования теплоотдачи 11 образцов ВПЯМ, обобщенные уравнением (24) при $l^* \equiv \beta_r/\alpha_r$ (рис. 7,а), при $l^* \equiv d_{cf}$ (рис. 7,б) и $l^* \equiv d_3$ (рис. 7,в). Значения множителя A_1 и показателя степени n_T при $l^* \equiv d_3$ даны в табл. 3.

Анализ графиков на рис. 7 показывает, что, во-первых, полученные результаты по внутренней теплоотдаче удовлетворительно согласуются с критериальным уравнением Ю.Ф. Гортышова и сотр. [15]

$$Nu_{v,d_{cf}} = 0,606 Re_{d_{cf}} Pr_f \epsilon_v^{-5,2} \quad (25)$$

и лежат ниже критериального уравнения В.М. Поляева [1, 14]

$$Nu_{v,\beta/\alpha} = 0,004 Re_{\beta/\alpha} Pr_f, \quad (26)$$

полученному по результатам исследований низкопористых материалов.

Во-вторых, примерно одинаковые значения

среднего квадратического отклонения σ точек на рис. 7,а-в относительно критериального уравнения (24) свидетельствует, что ни один из определяющих размеров l^* не имеет заметных преимуществ перед остальными. Поэтому напрашивается вывод: для обобщения данных по внутренней теплоотдаче в пористых телах необходимо привлекать индивидуальные характеристики пористой структуры.

На рис. 7,г показано обобщение опытных данных по внутренней теплоотдаче ВПЯМ, полученных с использованием икосаэдрической модели ВПЯМ, критериальным уравнением

$$Nu_{d_3} = 2,32 \cdot 10^{-3} Re_{d_3}^{1,09} d_{cf}^{-1,15} \epsilon_v^{2,48} (d_{cf}/d_{ck})^{0,19} (f_{ck} d_{cf})^{-0,83} Pr_f^{0,4} C_t \quad (27)$$

Уравнение (27) построено методом Гаусса с выбором главного элемента в столбце. Среднеквадратическое отклонение точек от уравнения (27) составляет 23 %, что вдвое меньше отклонения точек от критериального уравнения (24).

Уравнения (20) и (27), обобщающие полученные результаты по гидродинамическому сопротивлению и внутренней теплоотдаче ВПЯМ, пригодны в диапазоне $14 < Re_{d_3} < 3414$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена икосаэдрическая модель ВПЯМ, позволяющая уточнить наиболее важ-

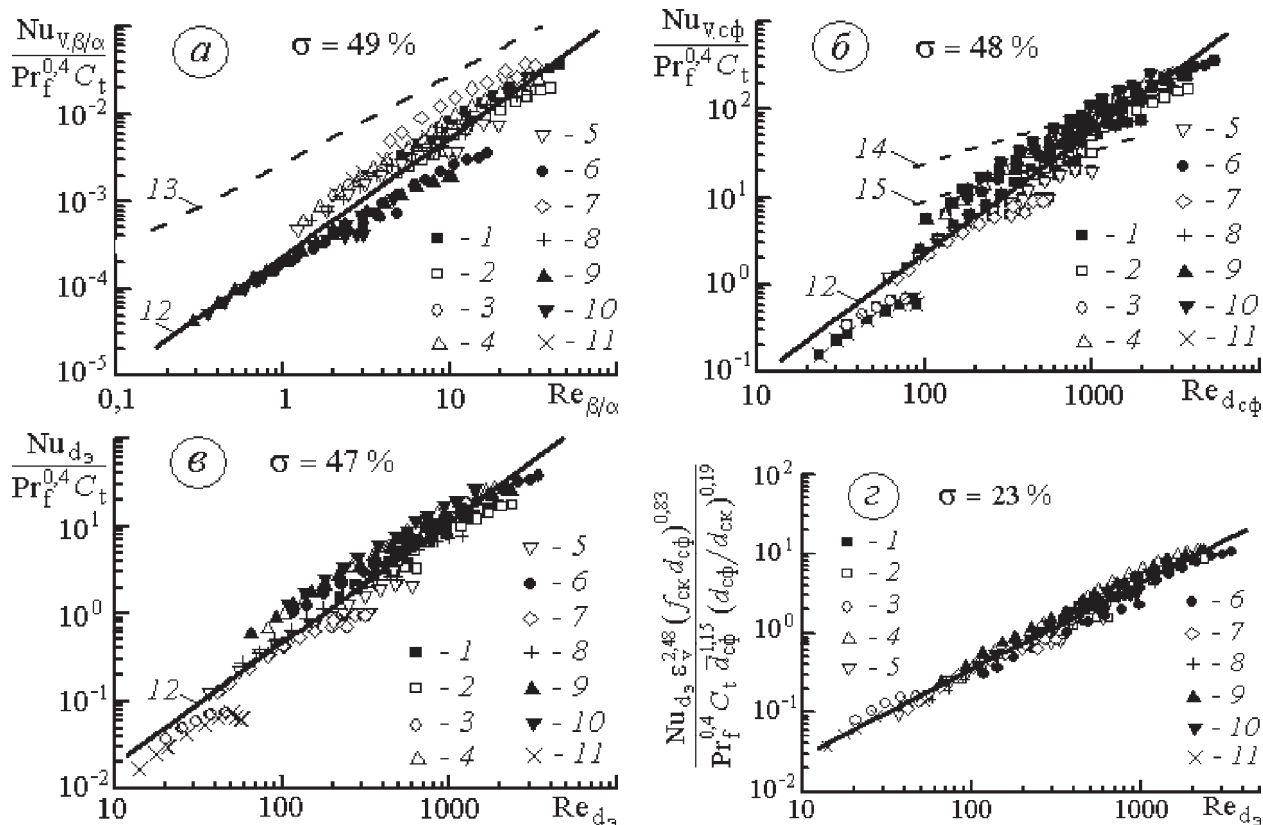


Рис. 7. Теплоотдающие характеристики ВПЯМ:

1-11 – номера образцов; 12 – 12 – линии регрессии опытных данных с использованием икосаэдрической модели ВПЯМ; 13 – уравнение (25); 14 – уравнение (26) при $\epsilon_v = 0,8$; 15 – то же при $\epsilon_v = 0,97$

ные для теплового и гидродинамического расчета геометрические и теплофизические характеристики ВПЯМ.

2. При обобщении результатов исследований внутренней теплоотдачи и сопротивления необходимо помимо влияния режима течения, определяемого числом Рейнольдса, влияния теплофизических свойств теплоносителя, определяемого числом Прандтля, учитывать также влияние характеристик пористости пористой структуры.

3. Полученные теплогидродинамические характеристики ВПЯМ применимы в диапазоне $14 < Re_d < 3414$; $0,8 \leq \epsilon_v \leq 0,966$; $0,8 \leq d_{сф} \leq 5,27$ мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1988. 168 с.
2. Научные основы технологий XXI века. М.: УНПЦ "Энергомаш". 2000. 136 с.
3. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий. 2007. 240 с.
4. А.с. СССР № 577095. Способ получения пористого металла / В.Н. Анциферов, Ю.А. Белых, В.Д. Храпцов, В.М. Четкин. Б.И. 1977. № 39.
5. Анциферов В.Н., Храпцов В.Д. Высокопористые проницаемые ячеистые металлы и сплавы. Области применения. // Перспективные материалы. 2002. №2. С. 23-28.
6. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А. Геометрические и теплофизические характеристики высокопористой структуры // Известия вузов. Авиационная техника. 2010. № 2. С. 49-52.
7. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А., Башкирцев Г.В. Математическая модель тепловых процессов и методика исследования теплоотдачи в пористом цилиндре // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 4. С. 90-96.
8. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А., Иванова Е.И. Теплопроводность охлаждаемого пористого цилиндра // Известия РАН. Энергетика. 2011. №4. С. 124-132.
9. Пористые проницаемые материалы: Справ. изд. [под ред. Белова С.В.]. М.: Металлургия. 1987. 335 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
11. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматлит. 1962. С. 456.
12. Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника. 1971. С. 268.
13. Анциферов В.Н., Куневич А.П., Басанов В.А., Медведев А.П. Электросопротивление и теплопроводность высокопористых проницаемых ячеистых материалов // Порошковая металлургия. 1988. № 8. С. 87-92.
14. Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение опытных данных по внутреннему теплообмену в пористых структурах // ТВТ.2010.Т.48, №3. С.402-408.
15. Горьшинов Ю.Ф., Муравьев Г.Б., Надыров И.Н. Экспериментальное исследование течения и теплообмена в высокопористых структурах // Инженерно-физический журнал. 1987. Т.53. №3. С. 357-361.
16. Горьшинов Ю.Ф., Надыров И.Н., Ашихмин С.Р., Куневич А.П. Теплообмен при течении однофазного и вскипающего охладителя в канале с пористой вставкой // Инженерно-физический журнал. 1991. Т.60. № 2. С. 252-258.
17. Fukuda K., Kondoh T., Hasegawa S. Relationship between Heat Transfer and Pressure Drop of Porous Materials // Engineering Sciences Reports, Kyushu University. 1992. Vol. 14, No 2. Pp. 213-223.

HEAT EXCHANGE AND RESISTANCE OF HIGHLY POROUS MATERIAL

© 2012 Yu.A. Kirsanov¹, R.A. Nazipov¹, E.I. Ivanova¹, S.Yu. Zhukova²

¹ Research Center for Power Engineering Problems of Kazan Scientific Center of RAS

² Research Center of Powder Materials of the Perm National Research Polytechnic University

Highly porous cellular material (HCPM) structure mathematical model and thermal physical properties of carcass and heat-carrier in HPCM models are improved and given. Hydrodynamic resistance and internal heat transfer in HPCM experimental researches results are processed. Received results are generalised by criterial equations, that allow influence of Reynolds's numbers and relative parametres, characterising specific features of the porous material structure.

Keywords: Porous body, skeleton, model, thermophysical properties, heat exchange, hydrodynamic resistance.

Yury Kirsanov, Doctor of Technics, Associate Professor, Leading Research Fellow. E-mail: kirsanov-yury@mail.ru

Rustem Nazipov, Candidate of Technics, Research Fellow. E-mail: 4mail8@mail.ru

Ekaterina Ivanova, Postgraduate Student.

E-mail: katerina_pt_3_04@bk.ru

Svetlana Zhukova, Techniques. E-mail: zvetik_22@mail.ru