01

Модель теплообменных процессов, происходящих в пористом материале „металлорезина“ при движении сквозь него рабочей среды

© М.А. Субарев, А.В. Копалкин, С.А. Кунин, Д.С. Тимаев, Е.А. Кудряшов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская обл., Россия
e-mail: MASubarev@vniief.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2025 г.
В окончательной редакции 11 ноября 2025 г.
Принято к публикации 16 января 2026 г.

Представлена двухтемпературная расчетная модель, описывающая теплообменные процессы, происходящие в пористом материале „металлорезина“ при движении газовой среды. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности нагрева газа при прохождении через металлорезину, изготовленную из проволоки диаметром 0.42 mm пористостью в диапазоне от 70 % до 85 %. Из сопоставления экспериментальных данных с расчетными сделан вывод о том, что предложенная расчетная модель позволяет выполнять оценку температуры газа на выходе из пористого материала металлорезина в диапазоне чисел Рэйнольдса от 1 200 до 13 500 с ошибкой не более 11 %.

Ключевые слова: пористые металлически материалы, теплообмен, эффективный коэффициент теплопроводности, металлорезина.

DOI: 10.61011/JTF.2026.06.62990.131-25

Введение

Стремительное развитие современной техники и технологических процессов характеризуется постоянным ростом мощности тепловыделения, что диктует необходимость интенсификации теплообменных процессов. Одним из способов улучшения характеристик теплоотвода является использование в качестве интенсификатора теплообменных процессов пористых металлических материалов (ПММ), что обусловлено увеличением коэффициента теплоотдачи и повышением площади теплопередающей поверхности. Теплообменные устройства на основе пористых материалов нашли широкое применение в ракетных двигателях [1], в области решения задач охлаждения лопаток газовых турбин [2,3], охлаждения элементов электронной аппаратуры и других теплонагруженных устройств [4–6]. Перспективным ПММ, пористость которого можно задавать и контролировать в процессе изготовления, является „металлорезина“ (МР). МР представляет собой пористую проницаемую структуру, формируемую спиралями проволоки, спрессованными в элемент требуемой геометрии. Особый интерес вызывает МР, изготавливаемая из проволоки со специальным покрытием, которое после прессования в процессе термообработки плавится и формирует в узловых точках неразъемные паянные соединения [7,8]. Данная технология позволяет изготавливать прочную высокопористую МР пористостью до 90 %, обладающую хорошим тепловым контактом между витками спиралей и стенками элемента конструкции.

Для разработки элементов систем охлаждения на основе МР необходимо создание расчетных моделей, описывающих процессы теплообмена при движении теплоносителя через пористую структуру. В рамках решения инженерных прикладных задач разрабатываемые модели, как минимум, должны позволять выполнять оценку температуры рабочей среды на выходе из МР при заданном расходе и температуре стенки канала, в который установлен пористый материал. Описание теплофизических процессов при движении теплоносителя через пористые структуры в основном заключается в решении задачи конвективного теплообмена между каркасом пористого материала и теплоносителем.

Традиционным подходом к моделированию теплообмена в пористом теле является представление пористой среды, состоящей из порового каркаса и заполняющего поры теплоносителя, в виде единого материала, эффективные теплофизические свойства которого вычисляются исходя из свойств теплоносителя и материала каркаса. Однако модели, основанные на данной гипотезе, не дают удовлетворительного результата [9–13]. Для повышения точности и информативности расчетов приходится отказаться от гипотезы локального теплового равновесия и положить, что температуры теплоносителя и каркаса пористого материала могут отличаться, что приводит к необходимости решать уравнения теплопереноса относительно двух температур: температуры теплоносителя и температуры каркаса пористого материала. Такие модели теплопереноса называются двухтемпературными или неравновесными [14,15].

Построение расчетных моделей невозможно без знания теплофизических характеристик пористой структуры, таких как объемный коэффициент теплоотдачи, эффективный коэффициент теплопроводности пористого каркаса и эффективный коэффициент теплопроводности теплоносителя. Определение данных теплофизических свойств является сложной задачей, и на сегодняшний день не существует единой методики их определения. На практике с целью определения теплофизических свойств пористых материалов применяют методы экспериментального исследования и математического моделирования. Так, в работе [16] предлагается методика расчетного определения эффективных коэффициентов теплопроводности на основе использования фракталоподобных структур. Данная методика позволяет проводить моделирование теплообменных процессов без проведения физического эксперимента. В работе [17] на основе разработанной модели высокопористой ячеистой структуры получены теплофизические коэффициенты пористой среды и построена математическая модель тепловых процессов в охлаждаемом пористом цилиндре при изменяющейся вдоль боковой оси температуре каркаса. В работе [18] показано, что эффективная теплопроводность каркаса прямо пропорциональна теплопроводности материала, из которого он изготовлен. Также в указанной работе определена эмпирическая связь эффективного коэффициента теплопроводности рабочей среды с гидравлическими характеристиками пористого материала — вязкостным и инерционным коэффициентами сопротивления. Для МР в работе [19] авторами получены эмпирические зависимости данных коэффициентов сопротивления от пористости и диаметра проволоки.

Целью настоящей работы являлось создание и экспериментальная апробация двухтемпературной расчетной модели, описывающей теплофизические процессы в пористом материале МР при движении сквозь него рабочей среды.

1. Модель теплообменных процессов в пористом материале МР

Описание теплофизических процессов в пористом материале МР в рамках созданной модели заключается в решении задачи конвективного теплообмена с целью нахождения поля температуры каркаса и теплоносителя в однородном пористом слое. Так как теплопроводность каркаса много больше теплопроводности теплоносителя, градиенты средней температуры в каркасе и потоке рабочей среды много меньше градиента температуры в пограничных слоях теплоносителя, обтекающего каркас. В этом случае пористую среду можно рассматривать как гомогенную „смесь“ двух сплошных сред — твердого каркаса и движущегося теплоносителя, которые обмениваются теплом и характеризуются собственными значениями теплофизических свойств — теплопроводностью, теплоемкостью, плотностью.

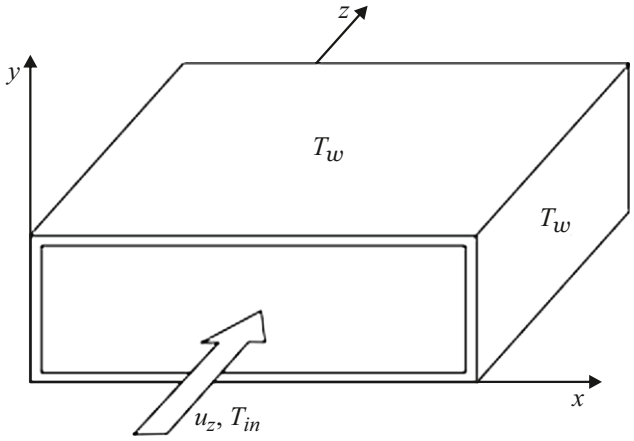


Рис. 1. Схема постановки задачи конвективного теплообмена в пористом материале.

Решение тепловой задачи заключается в определении поля температуры каркаса МР и теплоносителя в однородном пористом материале, через который в направлении оси z движется теплоноситель с температурой T_{in}, [°C], и характерной скоростью u_Z, [m/s]. Схема постановки задачи приведена на рис. 1. Внешняя поверхность стенки поддерживается при постоянной температуре T_w, [°C]. Теплообмен между теплоносителем и пористой средой осуществляется благодаря теплопроводности каркаса и рабочей среды, причем эффективная теплопроводность теплоносителя может значительно превышать молекулярную теплопроводность за счет эффекта перемешивания в сообщающихся порах. В первом приближении предполагается, что распределение скорости теплоносителя не зависит от координат x и y, и теплофизические свойства движущегося теплоносителя и материала каркаса не зависят от температуры.

Перенос тепла по каркасу пористого материала МР и теплоносителю описывается системой уравнений [20–22]:

$$\begin{cases} \rho_s^{\text{eff}} \cdot C_s^{\text{eff}} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s^{\text{eff}} \cdot \Delta(T_s) + \frac{\alpha_v}{1-\text{P}} \cdot (T_s - T_f), \\ \rho_f^{\text{eff}} \cdot C_f^{\text{eff}} \cdot \left(u_z \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z} + \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) = \lambda_f^{\text{eff}} \cdot \Delta(T_f) - \frac{\alpha_v}{P} \cdot (T_s - T_f). \end{cases} \tag{1}$$

В системе (1) первое уравнение описывает теплоперенос в каркасе пористой среды, второе — в теплоносителе. Последние слагаемые в правых частях обоих уравнений характеризуют нагрев каркаса и потери тепла теплоносителем соответственно за счет теплообмена между ними. Слагаемое в левой части уравнений описывает конвективный перенос тепла теплоносителем, движущимся относительно каркаса с характерной скоростью u, [m/s], вдоль оси z, [m]. Переменные T_f и T_s определяют температуру теплоносителя и каркаса пористого материала соответственно, [°C]; ρ_f^{eff} и ρ_s^{eff} — эффективная плотность теплоносителя и каркаса пористого материала соответственно, [kg/m^3]; C_f^{eff} и C_s^{eff} —

эффективная теплоемкость теплоносителя и каркаса пористого материала соответственно, [J/(kg·K)]; P — пористость каркаса; λ_f^{eff} и λ_s^{eff} — эффективные коэффициенты теплопроводности теплоносителя и каркаса пористого материала соответственно, [W/(m·K)]; α_V — объемный коэффициент теплоотдачи, [W/(m^3·K)].

За характерную скорость принимается значение скорости движения теплоносителя в порах:

$$u_Z = u_F \cdot P, \tag{2}$$

где u_F — среднерасходная скорость на входе в пористый материал (скорость фильтрации), [m/s].

Эффективная плотность теплоносителя и каркаса пористого материала рассчитывается как [18]:

$$\rho_f^{\text{eff}} = \rho_f \cdot P, \tag{3}$$

$$\rho_s^{\text{eff}} = \rho_s \cdot (1 - P), \tag{4}$$

где ρ_f и ρ_s — табличное значение плотности теплоносителя и пористого материала, [kg/m^3].

Эффективная теплоемкость теплоносителя и каркаса пористого материала определяется как [18]:

$$C_f^{\text{eff}} = C_f \cdot P, \tag{5}$$

$$C_s^{\text{eff}} = C_s \cdot (1 - P), \tag{6}$$

где C_f и C_s — табличное значение теплоемкости теплоносителя и пористого материала, [J/(kg·K)].

Интенсивность теплообмена между каркасом и теплоносителем, согласно закону Ньютона–Рихмана, в приближении пористого тела характеризуется коэффициентом объемной теплоотдачи [18]:

$$\alpha_V = \alpha \cdot F_V, \tag{7}$$

где F_V — удельная смоченная поверхность пор в расчете на единицу объема пористой среды, [m^2/m^3]; α — средний коэффициент теплоотдачи каркаса в порах в расчете на единицу смоченной поверхности, [W/(m^2·K)].

Удельная смоченная поверхность пор определяется выражением [23]:

$$F_V = \frac{3 \cdot \pi \cdot \delta \cdot (1 - \exp[-(1 - P)/0.04])}{(0.59 \cdot d_p)^2}, \tag{8}$$

где δ — диаметр проволоки, из которой изготовлена металлорезина, [m]; d_p — диаметр пор МР, [m].

Диаметр пор находится по эмпирической зависимости от диаметра проволоки МР [24]:

$$d_p = \frac{\delta \cdot (1 - \exp[-(1 - P)/0.04])}{1.18} \sqrt{\frac{3 \cdot \pi}{1 - P}}. \tag{9}$$

Средний коэффициент теплоотдачи каркаса в порах в расчете на единицу смоченной поверхности находится по эмпирическим выражениям [25]:

$$\alpha = \begin{cases} 0.76 \cdot \text{Re}^{0.4} \cdot Pr^{0.37} \cdot \frac{\lambda_f}{\delta}, & 1 \le \text{Re} \le 40, \\ 0.52 \cdot \text{Re}^{0.5} \cdot Pr^{0.37} \cdot \frac{\lambda_f}{\delta}, & 40 \le \text{Re} \le 10^3, \\ 0.26 \cdot \text{Re}^{0.6} \cdot Pr^{0.37} \cdot \frac{\lambda_f}{\delta}, & 10^3 \le \text{Re} \le 2 \cdot 10^5, \end{cases} \tag{10}$$

где $\text{Re} = \rho_f \cdot u_Z \cdot \delta / \mu_f$ — число Рэйнольдса, $Pr = \mu_f \cdot C_f / \lambda_f$ — число Прандтля, μ_f — динамическая вязкость теплоносителя, [Pa·s].

Эффективная теплопроводность каркаса пористого материала λ_s^{eff} прямо пропорциональна теплопроводности его материала λ_s и при известной пористости каркаса определяется по эмпирической зависимости [18]:

$$\lambda_s^{\text{eff}} = \lambda_s \cdot \frac{1 - P}{1 + P}, \tag{11}$$

где λ_s — коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен каркас пористого материала, [W/(m·K)].

Для определения эффективной теплопроводности теплоносителя используется эмпирическая взаимосвязь с гидравлическим сопротивлением пористого материала, которая может быть представлена в виде [18]:

$$\lambda_f^{\text{eff}} = \lambda_f + E \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot \rho_f \cdot u_Z \cdot C_p^f, \tag{12}$$

где $E = (10 \pm 2)$ — безразмерный коэффициент, λ_f — теплопроводность покоящегося теплоносителя, α — вязкостный коэффициент сопротивления, [m^{-2}]; β — инерционный коэффициент сопротивления, [m^{-1}].

С целью определения значения эффективного коэффициента теплопроводности теплоносителя в МР в модели используются эмпирические зависимости вязкостного и инерционного коэффициентов сопротивления от диаметра проволоки и пористости [19]:

$$\alpha = \delta^{-2} \cdot P^{-8} \cdot C, \tag{13}$$

$$\beta = 0.031 \cdot \delta^{-1} \cdot P^{-8}, \tag{14}$$

где C — коэффициент, подобранный опытным путем (для проволоки 0.1 mm $C = 0.5$, для проволоки 0.21 mm $C = 1.25$; для проволоки 0.42 mm $C = 1.5$; для проволоки 0.8 mm $C = 1$).

Итоговое выражение для определения эффективного коэффициента теплопроводности теплоносителя имеет вид

$$\lambda_f^{\text{eff}} = \lambda_f + 0.31 \cdot \frac{\delta}{C} \cdot \rho_f \cdot u_Z \cdot C_f. \tag{15}$$

Итоговая система уравнений разработанной модели имеет вид

$$\begin{cases} \rho_s \cdot C_s \cdot (1-P)^2 \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \cdot \frac{1-\Pi}{1+\Pi} \cdot \Delta(T_s) + \frac{\alpha_v}{1-P} \cdot (T_s - T_f), \\ \rho_f \cdot C_f \cdot P^2 \cdot \left(u_Z \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z} + \frac{\partial T_f}{\partial t} \right) = \\ (\lambda_f + 0.31 \cdot \frac{\delta}{C} \cdot \rho_f \cdot u_Z \cdot C_f) \cdot \Delta(T_f) - \frac{\alpha_v}{P} \cdot (T_s - T_f). \end{cases} \tag{16}$$

Предложенная модель представляет большую практическую значимость при разработке высокоэффективных теплообменных аппаратов на основе МР, так как позволяет описывать теплообменные процессы, происходящие в пористом материале при движении через него теплоносителя.

2. Экспериментальные исследования эффективности нагрева воздушного потока при прохождении через МР

Объектом экспериментальных исследований являлись цилиндрические образцы с МР. Образцы представляли собой медные трубки с внешним диаметром $d_{tb} = 54\,\text{mm}$, с толщиной стенки $h_{wl} = 2\,\text{mm}$ и длиной $L_{tb} = 150\,\text{mm}$. Толщина МР, впаянной в центре трубки, составляла $L_{MR} = 40\,\text{mm}$. Элементы МР были изготовлены из медной проволоки диаметром $\delta = 0.42\,\text{mm}$ с пористостями 70 %, 75 %, 80 % и 85 %. Внешний вид одного из исследуемых образцов представлен на рис. 2.

Исследования выполнялись на экспериментальном стенде, предназначенном для измерения динамической составляющей давления и температуры воздуха до и после МР при его движении через исследуемый образец. На рис. 3 приведена схема экспериментального стенда с сечением центральной части.

Исследуемый образец устанавливался в измерительный участок стенда через конусные проставки с герметичным вводом. На внешней поверхности исследуемого элемента размещалась рубашка нагрева *4*, подключенная к термостату. Рабочей средой контура нагрева являлась вода. Исследования проводились на воздухе при атмосферном давлении. В рубашке нагрева поддерживалась температура теплоносителя на уровне $(60 \pm 0.5)\,^{\circ}\text{C}$. Расход воздуха через исследуемый образец варьировался изменением оборотов двигателя нагнетателя *1*. Измерения температуры газа на входе $T_{air_{in}}$, [°C], и выходе $T_{air_{out}}$, [°C], образца, а также динамической составляющей давления осуществлялись с помощью установленных на линейном трансляторе термопар *2, 5* и трубки Пито–Прандтля, подключенной к микроманометру *3*. Регистрация измеряемых параметров выполнялась перемещением каретки транслятора в сечениях, расположенных на расстоянии 55 mm от входной поверхности МР и на расстоянии 55 mm от выходной поверхности МР. Приборная погрешность измерения температуры воздуха ΔT_{air} составляла $\pm 1.1\,^{\circ}\text{C}$, приборная погрешность измерения динамической составляющей давления $\Delta P_{Dmeasured}$ составляла $\pm(0.1 + 0.05 \cdot P_{Dmeasured})$, [Pa]. Из измеренных в десяти точках поперечного сечения подводного канала значений динамической составляющей давления воздуха P_{Di} определялась скорость рабочей среды в соответствии с выражением

$$V_{med} = \frac{\Sigma_i \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{Di}}{\rho(T_i)}}}{n}, \qquad (17)$$

где ΔP_{Di} — измеренное значение динамической составляющей давления воздуха в i-й точке поперечного сечения трубы, [Pa]; $\rho(T_i)$ — функция плотности воздуха от температуры, [kg/m^3]; n — общее количество измерений в исследуемых точках.

Экспериментальные зависимости установившихся значений перепада температуры газа при прохождении через МР от средней по сечению канала скорости приведены на рис. 4.

Из представленного рисунка видно, что с увеличением пористости МР при фиксированном диаметре проволоки и фиксированной скорости движения воздушного потока, установившееся значение перепада температуры газа при прохождении через МР снижается. Данный факт

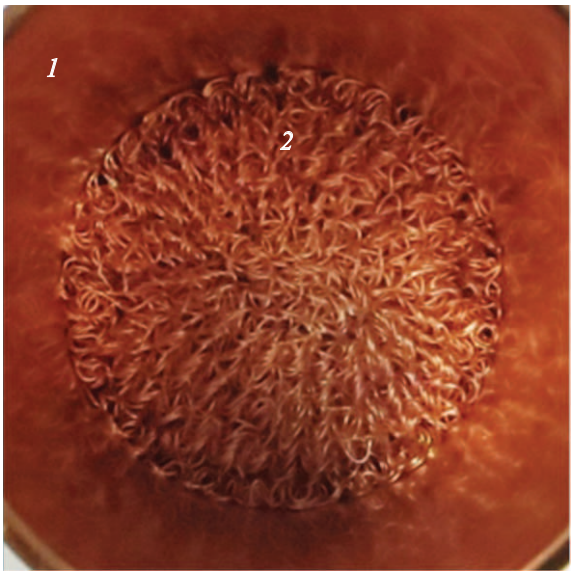


Рис. 2. Исследуемый образец со вставкой из МР: *1* — медная трубка; *2* — МР. $P = 85\,\%$, $\delta = 0.42\,\text{mm}$.

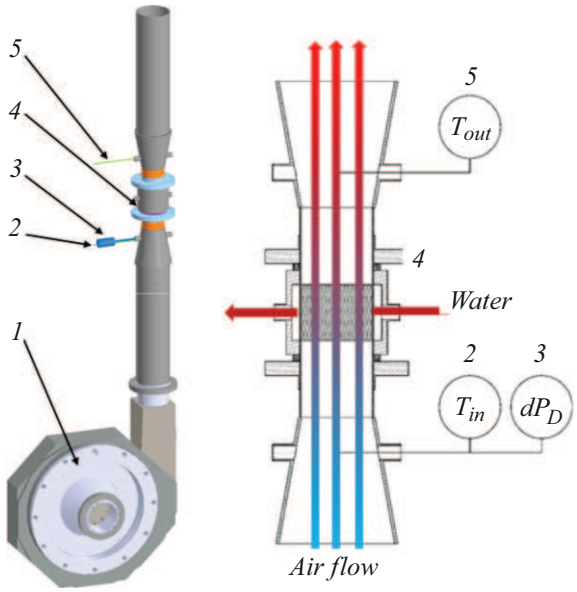


Рис. 3. Схема экспериментального стенда: *1* — центробежный нагнетатель; *2, 5* — термопары КТХА 02.01-062-К1-И-Е310-1,5-100/2000 для измерения температуры газа на входе и выходе из образца соответственно; *3* — прибор КПДМ-1 (трубка Пито–Прандтля, подключенная к микроманометру); *4* — исследуемый пористый элемент с рубашкой охлаждения.

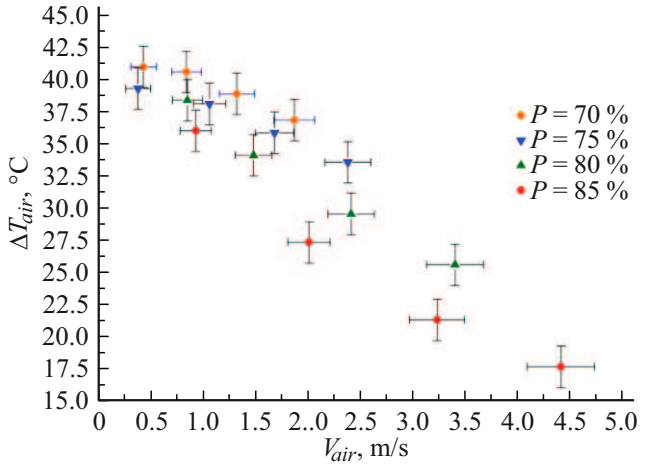


Рис. 4. Экспериментальные зависимости установившихся значений перепада температуры газа при прохождении через МР от среднего по сечению канала значения скорости.

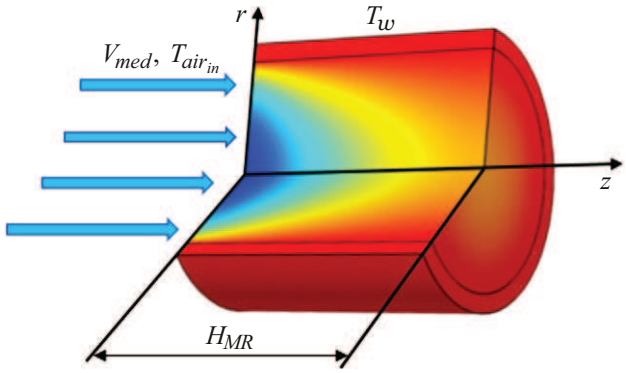


Рис. 5. Схема постановки двумерной задачи конвективного теплообмена в МР.

может быть обусловлен тем, что значение пористости определяет эффективный коэффициент теплопроводности каркаса МР λ_s^{eff}.

Экспериментальные значения перепада температуры воздушного потока для образцов пористостью 70 % были определены в диапазоне чисел Рэйнольдса $\text{Re}_{70\,\%} = 1200-5400$, для образцов с пористостью 75 % — $\text{Re}_{75\,\%} = 1100-6900$, для образцов с пористостью 80 % — $\text{Re}_{80\,\%} = 2400-110\,100$ и для образцов с пористостью 85 % — $\text{Re}_{85\,\%} = 2700-13\,500$. При оценках числа Рэйнольдса использовалась скорость воздушного потока на входе в МР V_{med}, в качестве определяющего размера — гидравлический диаметр цилиндрического образца $d_r = 0.05$ m, а в качестве температуры, определяющей значение кинематической вязкости, принималась средняя температура газа в пористом материале $T_{med} = (T_{air_{in}} + T_{air_{out}})/2$, [°C]. Число Прандтля в серии экспериментов составляло значение $Pr = 0.735$. В качестве температуры, определяющей теплофизические свойства воздушного потока для нахождения числа Прандтля, использовалось среднее значение температуры в МР T_{med}.

Используя представленную двухтемпературную модель (с режимными параметрами из эксперимента), мы выполнили серию двумерных модельных расчетов эффективности нагрева воздушного потока, движущегося через МР, с целью определения средней температуры газа на выходе из пористого материала. Постановка задачи схематично представлена на рис. 5.

Через МР толщиной H_{MR}, [mm], в направлении оси z движется воздушный поток со средней по сечению канала скоростью V_{med} и температурой на входе в МР $T_{air_{in}}$. Температура внешней стенки газового канала T_w принималась равной температуре теплоносителя в рубашке охлаждения. Распределение скорости воздушного потока принималось независимым от координаты r, [mm]. Теплофизические свойства воздушного потока ρ_f, C_f, λ_f определялись по экспериментальным значениям средней температуры газа в пористом материале T_{med}. Свойства материала каркаса МР и стенки газового канала ρ_s, C_s, λ_s в первом приближении принимались независимыми от температуры T_s. Значения теплофизических свойств материала (меди), из которого изготовлены исследованные образцы, принимались при температуре 20 °C и давлении 1 atm: плотность $\rho_s = 8920\,\text{kg/m}^3$, теплопроводность $\lambda_s = 400\,\text{W/(m·K)}$, теплоемкость $C_s = 385\,\text{J/(kg·K)}$.

С целью апробации представленной модели на экспериментально полученных данных уравнения (16) в цилиндрической системе координат записывались в виде:

$$\begin{cases} \rho_s \cdot C_s \cdot (1-P)^2 \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \left(\lambda_s \cdot \frac{1-P}{1+P} \cdot \frac{1}{r}\right) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r}\right)\right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z}\left(r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial z}\right)\right) + \frac{\alpha_v}{1-P} \cdot (T_s - T_f) \\ \rho_f \cdot C_f \cdot P^2 \cdot \left(\frac{V_{med}}{P} \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z} + \frac{\partial T_f}{\partial t}\right) \\ = \left(\lambda_f + 0.31 \cdot \frac{\delta}{C} \cdot \rho_f \cdot \frac{V_{med}}{P} \cdot C_f\right) \cdot \frac{1}{r} \\ \times \left(\frac{\partial}{\partial r}\left(r \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(r \cdot \frac{\partial T_f}{\partial z}\right)\right) - \frac{\alpha_v}{P} \cdot (T_s - T_f). \end{cases} \tag{18}$$

В таблице представлено сравнение экспериментальных значений перепада температуры газа на МР с результатами модельных расчетов с указанием значений отклонений результатов расчетов от экспериментальных данных $\varepsilon = ((|\Delta T_{air_{out}} - \Delta T_{air_{in}}|)/\Delta T_{air_{out}}) \cdot 100\,\%$. На рис. 6 представлено сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей перепада температуры воздушного потока на МР от значения средней по сечению канала на входе в пористый элемент скорости. В расчетных исследованиях были заложены отклонения в значениях пористости МР в $\pm 1\,\%$, обусловленные технологией изготовления.

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что в рамках исследованного диапазона чисел Рэйнольдса представленная двухтемпе-

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными значениями

P,%	V_{med}, m/s	T_w, °C	$T^{e}_{air_{in}}xp$, °C	$T^{\exp}_{air_{out}}$, °C	$T^{calc}_{air_{out}}$, °C	$\Delta T^{\exp}_{air}$, °C	ΔT^{calc}_{air}, °C	ε, %
0.7	0.43 ± 0.12	60 ± 1.1	18.7 ± 1.1	59.6 ± 1.1	59.7	40.9 ± 1.6	41.0	0.2
0.7	0.84 ± 0.14	60.1 ± 1.1	18.3 ± 1.1	58.9 ± 1.1	59.5	40.6 ± 1.6	41.2	2
0.7	1.32 ± 0.17	60.3 ± 1.1	19.2 ± 1.1	58.1 ± 1.1	59.1	38.9 ± 1.6	39.9	3
0.7	1.87 ± 0.19	60 ± 1.1	19.9 ± 1.1	56.8 ± 1.1	58.1	36.8 ± 1.6	38.2	4
0.75	0.38 ± 0.12	60.5 ± 1.1	20.5 ± 1.1	59.7 ± 1.1	60.1	39.3 ± 1.6	39.6	1
0.75	1.06 ± 0.15	60.7 ± 1.1	20.4 ± 1.1	58.5 ± 1.1	59.1	38.1 ± 1.6	38.7	2
0.75	1.68 ± 0.18	60.2 ± 1.1	20.6 ± 1.1	56.4 ± 1.1	57.1	35.8 ± 1.6	36.5	2
0.75	2.4 ± 0.2	60.5 ± 1.1	21.1 ± 1.1	54.7 ± 1.1	55.7	33.6 ± 1.6	34.6	3
0.8	0.85 ± 0.14	60.7 ± 1.1	20.0 ± 1.1	58.4 ± 1.1	58.1	38.4 ± 1.6	38.1	1
0.8	1.48 ± 0.17	60.3 ± 1.1	19.9 ± 1.1	54.1 ± 1.1	54.9	34.1 ± 1.6	35.0	3
0.8	2.4 ± 0.2	60.1 ± 1.1	20.3 ± 1.1	49.8 ± 1.1	51.2	29.6 ± 1.6	30.9	5
0.8	3.4 ± 0.3	60.2 ± 1.1	20.8 ± 1.1	46.4 ± 1.1	48.2	25.6 ± 1.6	27.4	7
0.85	0.93 ± 0.15	60.3 ± 1.1	18.0 ± 1.1	54.0 ± 1.1	53.2	36.0 ± 1.6	35.2	2
0.85	2.0 ± 0.2	60.4 ± 1.1	18.1 ± 1.1	45.4 ± 1.1	46.1	27.3 ± 1.6	28.0	3
0.85	3.2 ± 0.3	60.6 ± 1.1	18.4 ± 1.1	39.7 ± 1.1	41.6	21.3 ± 1.6	23.2	9
0.85	4.4 ± 0.3	60.4 ± 1.1	19.4 ± 1.1	37.1 ± 1.1	39.1	17.7 ± 1.6	19.7	11

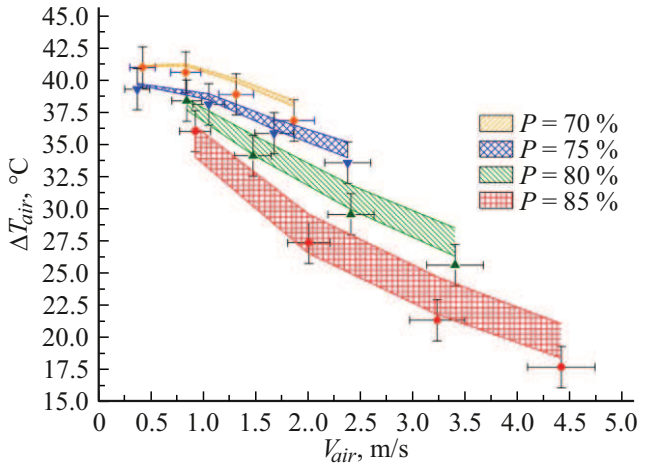


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные зависимости перепада температуры воздуха от скорости движения.

ратурная модель позволяет выполнять оценочные расчеты среднего значения температуры воздушного потока на выходе из пористого материала МР, изготовленного из проволоки диаметром $\delta = 0.42$ mm, в диапазоне пористости $0.7 \leq P \leq 0.85$ с ошибкой не более 11 %. Причина расхождения расчетных и экспериментальных данных может заключаться в некорректно определенном значение эффективного коэффициента теплопроводности МР, что обусловлено отсутствием работ по экспериментальному уточнению данного коэффициента для спекаемой МР. Кроме того, в представленной модели никак не решается уравнение движения теплоносителя, что также может оказывать влияние на отклонение расчетных данных от экспериментальных.

Заключение

В работе представлена двухтемпературная модель, описывающая процессы теплообмена, происходящие в пористом материале МР при движении сквозь нее рабочей среды. На основе результатов экспериментальных исследований эффективности нагрева воздушного потока, проходящего через элементы МР, изготовленные из проволоки диаметром 0.42 mm с пористостью 70 %, 75 %, 80 % и 85 %, в диапазоне чисел Рэйнольдса от 1 200 до 13 500 выполнена апробация созданной модели. На основе сравнения результатов модельных расчетов с экспериментальными данными показано, что ошибка определения средней температуры газа на выходе из МР в рамках исследованных диапазонов не превышает 11 %.

Созданная и экспериментально апробированная модель представляет практический интерес, так как позволяет на этапе инженерных тепловых расчетов при проектировании теплообменных каналов на основе МР выполнять оценку выходных параметров рабочей среды при заданных входных условиях, а именно температуры

рабочей среды на входе в пористый материал, скорости движения рабочей среды и температуры внешней стенки теплопередающего канал.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Ф.В. Пелевин, А.В. Пономарев, П.Ю. Семенов. Известия вуз. Машиностроение, **6**, 74 (2015). [F.V. Palevin, A.V. Ponomarev, P.Y. Semenov. Proceedings of Higher Educational Institutions Machine Building, **6**, 74 (2015). DOI: 10.18698/0536-1044-2015-6-74-81

[2] В.И. Трушляков, В.Ю. Куденцов, И.Ю. Лесняк, К.А. Рожаева, С.А. Лаврук, М.М. Дронь, К.И. Жариков. Динамика систем, механизмов и машин, **1** (2), 10 (2016).

[3] А.С. Губкин, Д.Е. Игошин, Д.В. Трапезников. Вестник Тюменского гос. ун-та, **2** (4), 54 (2016).

[4] A. Hamadouche, A. Azzi, S. Abboudi, R. Neballi. Experimental Thermal Fluid Sci., **92**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.035

[5] S. Soleimanikutanaei, C-X Lin, D. Wang. Intern. Commun. Heat and Mass Transfer, **95** (9), 92 (2018). DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.04.002

[6] С.П. Родионов, А.Ю. Боталов, Д.Ю. Легостаев. Вестник Тюменского гос. ун-та, **2** (2), 73 (2016). DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-73-83

[7] С.Н. Шошин, М.В. Кременчугский, Р.А. Казаков, Д.А. Линяев. *Способ получения неразъемного соединения пайкой детали из медного проволочного материала с деталью из меди* (Патент на изобретение RU 2707113C1, 2019)

[8] С.Н. Шошин, М.В. Кременчугский, Р.А. Казаков, Д.А. Линяев. *Способ изготовления пористой детали из проволочного материала* (Патент на изобретение RU 2663389C1, 2018)

[9] N. Wakao, S. Kaguei. *Heat and Mass Transfer in Packed Beds* (Gordon and Breach Science Publishers, 1982)

[10] S.S. Feng, J.J. Kuang, T. Wen, T.J. Lu, K. Ichimiya. Intern. J. Heat Mass Transfer, **77**, 1063 (2014). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.05.053

[11] Pradeep. M. Kamath, C. Balaji, S.P. Venkateshan. Intern. J. Heat and Mass Transfer, **54** (25), 5231 (2011). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.08.020

[12] P.-X. Jiang, M. Li, T.-J. Lu, L. Yu, Z.-P. Ren. Intern. J. Heat Mass Transfer, **47** (10–11), 2085 (2004). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.12.004

[13] P.H.S. Carvalho, M.J.S. de Lemos. Intern. J. Heat Mass Transfer, **79**, 105 (2014). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.07.093

[14] И.А. Попов. *Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах* (Центр инновационных технологий, Казань, 2007)

[15] В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. *Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов* (Машиностроение, М., 1988)

[16] В.А. Данилов. Автореф. *Моделирование тепловых процессов в пористых материалах и исследования их теплогидродинамических характеристик* (Казанский гос. энергетический ун-т, 2012)

[17] В.А. Горубнов, Г.А. Перевезенцев, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева. Вестник ИГЭУ, **1**, 5 (2022). DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.005-011

[18] В.В. Харитонов. *Теплофизика лазерных зеркал* (МИФИ, М., 1993)

[19] М.А. Субарев, А.В. Копалкин, С.А. Кунин, В.С. Булычев, Д.С. Тимаев, А.Е. Кудряшов, Р.А. Казаков. ЖТФ, **94** (4), 575 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57527.178-23 [M.A. Subarev, A.V. Kopalkin, S.A. Kunin, V.S. Bulychev, D.S. Timaev, A.E. Kudryashov, R.A. Kazakov. Tech. Phys., **69** (4), 542 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.04.57527.178-23]

[20] А.А. Плаксеев, В.В. Харитонов. *Максимальные тепловые нагрузки пористых лазерных отражателей* (Научн. труды МЛТИ, М., 1981), в. 138, с. 137–146.

[21] В.В. Харитонов, А.А. Плаксеев. ТВТ, **20** (4),712 (1982).

[22] Коллектив авторов. *Теплообмен и термические деформации в охлаждаемых многослойных системах* (Сборник) (ИВТ АН, М., 1982)

[23] T.J. Lu, H.A. Stone, M.F. Ashby. Acta Mater, **46** (1), 3619 (1998). DOI: 10.1016/s1359-6454(98)00031-7

[24] V.V. Calmidi. *Transport phenomena in high porosity fibrous metal foams* Ph.D. Dissertation (Boulder, University of Colorado, 1998)

[25] W. Lu, C.Y. Zhao, S.A. Tassou. Int. J. Heat Mass Transfer, **49** (15–16), 2751 (2006). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.12.012