

УДК 536.24.08

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_53

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕПЛООБМЕННЫХ КАНАЛАХ

М.В. ЛехнерORCID: 0000-0002-4037-861X e-mail: maksim.lehner@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Добров**ORCID: 0000-0001-7363-8791 e-mail: dobrov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены проблемы определения теплообменных характеристик пористых материалов, имеющих большой потенциал использования в качестве интенсификаторов теплообменных процессов в элементах ядерных энергетических установок. Физическая основа интенсификации при помощи пористых материалов заключается в чрезвычайно высокой интенсивности теплообмена между проницаемой пористой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем вследствие развитой поверхности теплообмена между ними. Для реализации подобного способа интенсификации необходимо определить теплообменные характеристики пористого материала, которые сводятся к определению объемного коэффициента теплоотдачи. Для его определения в пористых материалах предложен расчетно-экспериментальный способ, основанный на измерении теплофизических параметров рабочей среды и расчетно-экспериментальном определении температуры каркаса пористого тела. Для измерения температуры внешней видимой поверхности каркаса пористого материала был предложен метод с использованием тепловизора с предварительным нанесением на поверхность пористого материала покрытия с измеренным коэффициентом излучения. Предложенный способ может быть использован для оценки эффективности применения широкого класса пористых структур в качестве интенсификаторов теплообмена.

Ключевые слова: теплообмен, пористые материалы, объемный коэффициент теплоотдачи, тепловизионный метод измерения температуры.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лехнер, М.В. Способ определения объемного коэффициента теплоотдачи пористых материалов в теплообменных каналах / М.В. Лехнер, А.А. Добров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 1. С. 53-59. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_53

METHOD FOR DETERMINATION OF VOLUMETRIC HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN POROUS MATERIALS OF HEAT-EXCHANGE CHANNELS

M.V. LehnerORCID: 0000-0002-4037-861X e-mail: maksim.lehner@gmail.comNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***A.A. Dobrov**ORCID: 0000-0001-7363-8791 e-mail: dobrov@nntu.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper studies the problems of determination of heat exchange characteristics of porous materials having large potential of application as intensifiers for heat exchange processes in components of nuclear power plants. Physical background of intensification using porous materials involves highly intensive heat exchange between permeable porous matrix and heat carrying agent flowing through it due to the extended surface of heat exchange between them. To implement such a method of intensification, heat exchange characteristics of porous material must be measured, which is confined to determination of volumetric heat transfer coefficient. To determine volumetric heat transfer coefficient in porous materials, a computational-experimental method is proposed, which is based on measuring of thermo-physical properties of operation environment and computational-experimental determination of porous body scaffold temperature. To measure the temperature of the apparent surface of porous material scaffold, the method using thermal camera is proposed, with coating of measured emissivity preliminary applied to porous material surface. The proposed method can be used to evaluate the effectiveness of application of wide range of porous structures as heat exchange intensifiers.

Key words: heat exchange, porous materials, volumetric heat transfer coefficient, temperature measuring method using thermal camera.

FOR CITATION: M.V. Lehner, A.A. Dobrov. Method for determination of volumetric heat transfer coefficient in porous materials of heat-exchange channels. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 1. Pp. 53-59. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_1_53

Введение

Развитие ряда отраслей техники – ядерной, лазерной, авиационной, ракетно-космической – характеризуется непрерывным ростом энергонапряженности элементов их конструкции. В связи с этим, актуальным является создание высокоэффективных теплообменных аппаратов различного назначения [1]. Успешное решение сопутствующих задач невозможно без интенсификации теплообменных процессов. Одним из перспективных и эффективных ее способов является использование в теплообменных устройствах пористых материалов [2]. Например, изготовление элементов тепловой защиты ядерных реакторов из пористого материала позволяет значительно снизить температуру конструкционных материалов по сравнению с обычным конвективным охлаждением сплошных элементов [2, с. 11].

Постановка проблемы и способы решения

При создании теплообменных аппаратов для ядерных энергетических установок с использованием пористых материалов необходимо иметь представление о происходящих в них тепломассообменных процессах, описание которых проблематично. Одной из основных является проблема определения коэффициента теплоотдачи пористого каркаса. Трудность заключается в нахождении с достаточной степенью точности истинной площади поверхности каркаса пористого материала, участвующей в теплообмене. В общем случае коэффициент теплоотдачи является функцией параметров теплоносителя, зависит от характера его течения, а также от формы и размеров каналов в пористом теле. В связи с этим, при проектировании теплообменных аппаратов на основе пористых элементов удобнее перейти к макромасштабному описанию процесса теплообмена, которое заключается в использовании объемного коэффициента теплоотдачи a_v [3].

$$a_v = \frac{q_v}{t_{nm} - t_{жс}}, \quad (1)$$

где q_v – плотность объемного тепловыделения, $Вт / м^3 \cdot К$;

t_{nm} – температура пористого тела, $К$;

$t_{жс}$ – температура жидкости (газа), $К$.

При таком подходе основная сложность состоит в определении разности температур пористого тела и теплоносителя. В условиях проведения реального эксперимента она достаточно мала, даже в случае использования газового теплоносителя [3]. Измерение температу-

ры каркаса в глубине пористой структуры трудноосуществимо с технической точки зрения, так как контактные методы измерения температуры вносят искажения в геометрию пористой структуры, что оказывает влияние на измерение локальной температуры теплоносителя. В связи с этим, при определении среднего для исследуемого образца значения α_v ограничиваются измерениями температуры внешних поверхностей каркаса и теплоносителя на входе и выходе в образец, принимая, что размеры чувствительных элементов термопар соизмеримы с размерами пористой структуры, и на их показания влияют входные и выходные течения.

Необходимо отметить, что на распределение температуры поверхности каркаса и теплоносителя, следовательно, и на разность их температур влияют перетечки тепла по каркасу. Они обуславливаются теплопроводностью материала, из которого изготовлено пористое тело. Этот факт вызвал появление ряда работ по определению α_v путем решения обратной задачи теплообмена в пористом теле [4]. При таком подходе объемный коэффициент теплоотдачи определяется с помощью критериальных уравнений, получаемых экспериментальным путем. Данный метод использовался многими авторами при описании процессов теплообмена в пористых телах. Накопленные ими данные были обстоятельно проанализированы и обобщены в работах [2, 5-7]. В общем случае критериальные уравнения имеют вид:

$$Nu = c \cdot (Re \cdot Pr)^n, \quad (2)$$

где Nu – критерий Нуссельта;

c – численный коэффициент;

Re – критерий Рейнольдса;

Pr – критерий Прандтля;

n – численный показатель степени.

Следовательно, проблема достоверного определения температуры каркаса является определяющей при нахождении закономерностей поведения α_v . Авторами данной работы предлагается метод определения температуры каркаса пористого тела. Метод основан на тепловизионном измерении температуры внешней видимой поверхности каркаса и расчете температуры поверхности стенки элемента, находящейся в хорошем тепловом контакте с каркасом пористого тела.

Расчетно-экспериментальный метод определения объемного коэффициента теплоотдачи

На основе анализа предоставленных данных, для определения объемного коэффициента теплоотдачи предлагается использовать расчетно-экспериментальный метод. Он опирается на измерение теплофизических параметров газа и пористого материала в сочетании с расчетом температуры поверхности стенки элемента, находящейся в хорошем тепловом контакте с каркасом пористого тела. Принципиальная схема предложенного расчетно-экспериментального способа определения объемного коэффициента теплоотдачи пористого материала на примере цилиндрического элемента с установленным внутри пористым телом приведена на рис. 1. Измерения предлагается проводить на образцах, представляющих из себя цилиндрическую металлическую трубку 2 с запрессованным внутрь пористым телом 4 с хорошим тепловым контактом между внутренней стенкой трубки и поверхностью пористого тела соприкасающегося с ней. В качестве рабочей среды рекомендуется использовать газ. С помощью термопар 3,6 производится измерение температур газа в нескольких точках сечения трубки на входе в образец и на выходе из него, что позволяет рассчитать средние значения температуры газа на входе и выходе из образца соответственно. Расход газа определяется с помощью трубки Пито-Прандтля (позиция 7 на рис. 1) путем измерения динамической составляющей перепада давления в нескольких точках сечения трубки с дальнейшим пересчетом в расход рабочей среды. Тепловой поток подводится равномерно к внешней поверхности трубки в пределах пористого тела.

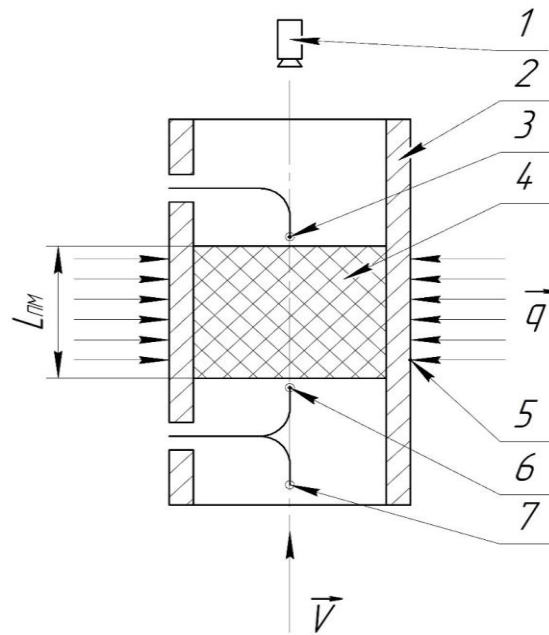


Рис. 1. Принципиальная схема расчетно-экспериментального способа измерения объемного коэффициента теплоотдачи пористого тела

1 – тепловизор для измерения температуры видимой поверхности каркаса пористого материала, 2 – цилиндрическая трубка, 3 – термопара для измерения температуры газа на выходе из пористого тела, 4 – пористое тело, 5 – термопара для измерения температуры внешней поверхности трубки; 6 – термопара для измерения температуры газа на входе в пористое тело, 7 – трубка Пито-Прандтля

Fig. 1. Road map for computational-experimental method for measuring volumetric heat transfer coefficient in porous body

1 – thermal camera to measure the temperature of the apparent surface of porous material scaffold, 2 – cylinder tube, 3 – thermocouple sensor to measure gas temperature at the exit from the porous body, 4 – porous body, 5 – thermocouple sensor to measure the temperature of the tube outside surface; 6 – thermocouple sensor to measure gas temperature at the entry into the porous body, 7 – Pitot-Prandtl tube

Выражение (1) для определения объемного коэффициента теплоотдачи можно записать в следующем виде:

$$\alpha_v = \frac{q_v}{\overline{T_{nm}} - \overline{T_{газ}}}, \quad (3)$$

где $\overline{T_{nm}}$ – среднее значение температуры каркаса пористого тела, K ;

$\overline{T_{газ}}$ – среднее значение температуры газа в объеме пористого тела, K .

Объемный тепловой поток, подводимый к пористому материалу можно определить, как:

$$q_v = \frac{Q}{V \cdot \tau}, \quad (4)$$

где Q – количество теплоты подводимое к пористому материалу, $Дж$;

V – объем пористого материала, $м^3$;

τ – время, за которое было передано количество теплоты равное Q , $с$.

Объем пористого материала V определяется как:

$$V = S_{mp} \cdot L_{nm}, \quad (5)$$

где S_{mp} – площадь поперечного сечения трубки, $м^2$;

L_{nm} – высота вставки из пористого материала, m .

Примем, что все тепло подведенное пористому материалу отводится рабочей средой. Тогда количество теплоты Q переданной в газ определяется как:

$$Q = G \cdot C_p \cdot \rho \cdot (\overline{T}_{вых} - \overline{T}_{вх}) \cdot \tau, \quad (6)$$

где G – объемный расход газа в циркуляционном контуре, m^3 / c ;

C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении, $Дж / кг \cdot K$;

ρ – плотность газа, $кг / м^3$;

$\overline{T}_{вых}$ – средняя температура газа на выходе из образца, K ;

$\overline{T}_{вх}$ – средняя температура газа на входе в образец, K .

Таким образом, выражение для определения объемного коэффициента теплоотдачи примет вид:

$$\alpha_v = \frac{G \cdot C_p \cdot \rho \cdot (\overline{T}_{вых} - \overline{T}_{вх})}{S_{mp} \cdot L_{nm} \cdot \left(\overline{T}_{nm} - \left(\frac{\overline{T}_{вых} + \overline{T}_{вх}}{2} \right) \right)}, \quad (7)$$

Температура газа на входе и выходе из образца определяется как среднее значение:

$$\begin{aligned} \overline{T}_{вых} &= \frac{\sum T_{вых i}}{i}; \\ \overline{T}_{вх} &= \frac{\sum T_{вх i}}{i}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $T_{вых i}$ – значение температуры на выходе из пористого тела измеренное в i -ой точке сечения трубки, K ; $T_{вх i}$ – значение температуры на входе в пористое тело измеренное в i -ой точке сечения трубки, K ; i – количество измерений.

В свою очередь, объемный расход газа в циркуляционном контуре G определяется:

$$G = \overline{V}_\phi \cdot S_{mp}, \quad (9)$$

где \overline{V}_ϕ – среднее по сечению трубки значение скорости фильтрации, m / c .

Среднее значение скорости фильтрации рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\overline{V}_\phi = \sqrt{\frac{\rho \cdot \sum P_{\phi i}}{2i}}, \quad (10)$$

где $P_{\phi i}$ – измеренное трубкой Пито-Прандтля значение динамической составляющей давления в i -ой точке сечения, $Па$.

В выражении (3) температура каркаса пористого тела определяется как среднее между измеренной тепловизором температурой внешней видимой поверхности пористого материала $T_{nm}^{изм}$ и температурой внутренней поверхности стенки цилиндрической трубки $T_{nm}^{расч}$:

$$T_{nm} = \frac{T_{nm}^{расч} + T_{nm}^{изм}}{2}, \quad (11)$$

При измерении температуры внешней видимой поверхности каркаса пористого материала с помощью тепловизора необходимо знать коэффициент излучения, который в большинстве случаев неизвестен. В связи с этим, на поверхность каркаса пористого тела, температуру которой требуется измерить, рекомендуется тонким слоем нанести покрытие с измеренным коэффициентом излучения, не вносящим значительных искажений в теплопередающие свойства пористого материала.

Для определения температуры внутренней поверхности стенки цилиндрической трубки $T_{nm}^{расч}$ решается задача теплопроводности однородной цилиндрической стенки. Рассмотрим трубку длиной L_{nm} с внутренним диаметром d_1 и внешним диаметром d_2 . Коэффициент теплопроводности материала трубки постоянен и равен λ . Тепловой поток q подводится равномерно с внешней стороны трубки в пределах высоты L_{nm} . Температура внешней и внутренней поверхности трубки T_2 и T_1 соответственно поддерживается постоянной. Температура цилиндрической стенки изменяется только в радиальном направлении. Следовательно, имеем одномерное температурное поле. Схематичное изображение для решения данной задачи приведено на рис. 2.

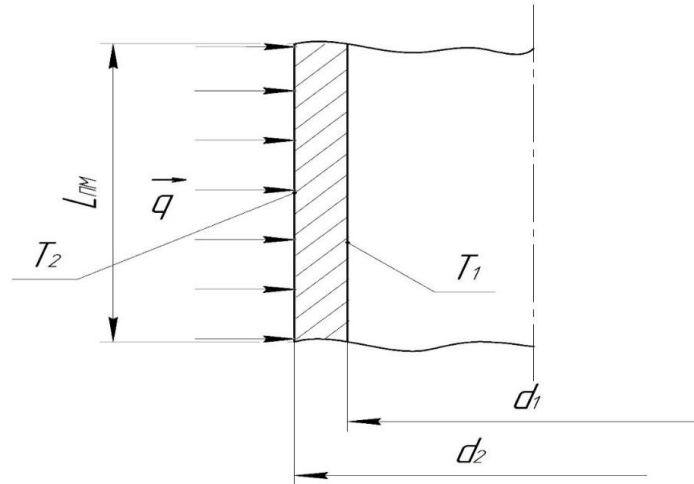


Рис. 2. Схема задачи теплопроводности для однородной цилиндрической стенки

Fig. 2. Heat conduction problem scheme for homogeneous cylinder wall

Решая рассматриваемую задачу получим выражение для расчета температуры внутренней поверхности цилиндрической трубки:

$$T_{nm}^{расч} = T_1 = T_2 - \frac{d_2 \cdot q \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\lambda} \quad (12)$$

С учетом всех вышеизложенных преобразований выражение для определения объемного коэффициента теплоотдачи предложенным расчетно-экспериментальным методом примет вид:

$$\alpha_v = \frac{\sqrt{\frac{\rho \cdot \sum P_{q_i}}{2 \cdot i} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{(\sum T_{вых i} - \sum T_{ex i})}{i}}}{L_{nm} \cdot \left(\left(\frac{2 \cdot T_2 \cdot \lambda - d_2 \cdot q \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + 2 \cdot T_{nm}^{изм} \cdot \lambda}{4 \cdot \lambda} \right) - \left(\frac{\sum T_{вых i} + \sum T_{ex i}}{2 \cdot i} \right) \right)}, \quad (13)$$

Необходимо заметить, что в представленном методе не измеряется температура поверхности каркаса пористого тела на входе рабочей среды. Это приводит к завышению средней температуры каркаса пористого тела, и, следовательно, к занижению объемного коэффициента теплоотдачи. Таким образом, предложенный способ может быть использован для нахождения минимального значения коэффициента теплоотдачи пористых материалов.

Заключение

Представлен расчетно-экспериментальный способ определения объемного коэффициента теплоотдачи пористых материалов, заключающийся в экспериментальном измерении теплофизических параметров рабочей среды и расчетно-экспериментальном определении значения температуры каркаса пористого тела. Она определяется как среднее между температурой внешней видимой поверхности пористого материала, измеренной тепловизором, и температурой внутренней поверхности стенки цилиндрической трубки, находящейся в хорошем тепловом контакте с исследуемым пористым телом. Получено выражение для определения минимального значения коэффициента теплоотдачи пористых материалов.

Предложенный метод является универсальным, поскольку позволяет измерить объемный коэффициент теплоотдачи для широкого класса пористых структур, а также провести оценку эффективности применения в теплообменных аппаратах ядерных энергетических установок.

Работа выполнена в рамках государственного заказа в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Библиографический список

1. **Попов, И.А.** Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / И.А. Попов. – Казань: Центр инновационных технологий, 2007. – 240 с.
2. **Поляев, В.М.** Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов / В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 168 с.
3. **Зейгарник, Ю.А.** Теплообмен в пористых структурах: современное состояние и основные направления исследования / Ю.А. Зейгарник, А.М. Поляев // Теплоэнергетика. 1996. № 1. С. 62-70.
4. **Алифанов, О. М.** Экспериментальное исследование метода определения коэффициента внутреннего теплообмена в пористом теле из решения обратной задачи [Текст] / О.М. Алифанов, А.П. Трянин, А.Л. Ложкин // Инженерно-физический журнал. Т. 52, № 3. С. 461.
5. **Аэров, М.Э.** Аппараты со стационарным зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Годес, Н.Д. Наринский. – Л.: Химия, 1979. С. 9.
6. **Ерошенко, В.М.** Теплообмен при вынужденном течении жидкости внутри пористых спеченных материалов [Текст] / В.М. Ерошенко, Л.А. Яскин // ИФЖ. 1979 Т.30. С. 5-13.
7. **Жижкин, А.М.** Распределение пор по размерам в тонкостенных изделиях из материала МР / Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Труды международной научно-технической конференции. Ч. 1. – Самара, Изд-во СНИУ им. акад. С.Н. Королева. 2003. С. 185-190.
8. **Карпович, Э. В.** Подтверждение обобщенного критериального уравнения конвективного теплообмена для пористых структур экспериментальным путем [Текст] // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 1(22). С. 106-117.

*Дата поступления
в редакцию: 10.12.2022*

*Дата принятия
к публикации: 02.02.2023*