

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 151–157
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 151–157

Научная статья
УДК 536.251
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-151-157

Конвективный теплообмен в волокнистых материалах

Д.П. Волков^{1✉}, Ю.П. Заричняк², Н.В. Пилипенко²

¹ Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

✉ dp-lv@yandex.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование эффективной теплопроводности волокнистых материалов при повышенном (до $150 \cdot 10^5$ Па) давлении газа наполнителя. Изучено влияние перепада температур на слое пористого материала, пористости, диаметра волокон, давления и рода флюида в порах на эффективную теплопроводность пористого материала. Показано, что для исключения конвективного переноса тепла следует использовать материалы с минимальным диаметром волокон ($d < 100$ мкм) и с пористостью, не превышающей 95 %.

Ключевые слова: пористость волокнистого материала, эффективная теплопроводность, давление флюида в порах, конвекция, проницаемость пористого материала

Для цитирования. Волков Д.П., Заричняк Ю.П., Пилипенко Н.В. Конвективный теплообмен в волокнистых материалах // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 4. С. 151–157. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-151-157

Original article

Convective heat transfer in fibrous materials

D.P. Volkov^{1✉}, Yu.P. Zarichnyak², N.V. Pilipenko²

¹ Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

✉ dp-lv@yandex.ru

Abstract. The article presents experimental and theoretical study of the fibrous materials effective thermal conductivity at the elevated pressure (up to $150 \cdot 10^5$ Pa) of the filler-gas. The authors studied the effect of temperature difference on the layer at the porous material, porosity, fibers diameter and the fluid type in the pores on the effective thermal conductivity of the porous material. The article demonstrates that convective transfer elimination requires employing the materials with minimum diameter of fibers ($d < 100 \mu\text{m}$) and porosity not exceeding 95 %.

Keywords: porosity of fibrous material, effective thermal conductivity, pressure of fluid in pores, convection, porous material permeability

For citation. Volkov D.P., Zarichnyak Yu.P., Pilipenko N.V. Convective heat transfer in fibrous materials. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 151–157 (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-4-151-157

Введение

Пористые волокнистые композиционные материалы широко применяются в строительной отрасли в качестве низкотемпературных и высокотемпературных теплоизолирующих, звукоизолирующих и огнезащитных элементов конструкций, в транспортном (железнодорожном, морском) машиностроении, включая авиастроение и объекты космической техники. Для снижения массы и стоимости конструктивных элементов тепловой или огнезащитной изоляции обычно используются высокопористые ($0,8 < \Pi < 0,95$) композиционные материалы из стеклянных, минеральных или металлических волокон (для высокотемпературных фильтров).

В высокопористых материалах при определенных условиях возникает конвективный перенос теплоты, существенно превышающий суммарный результат кондуктивного, молекулярного и лучистого переноса теплоты в порах. Структура пористого материала образована сообщающимися или не сообщающимися между собой порами, распределенными внутри тела упорядоченным или неупорядоченным образом. При определенных условиях (высокое давление флюида, большие перепады температур) в слое пористого материала может возникнуть конвективное движение заполняющего поры газа или жидкости. При расчете температурных режимов различных сооружений и конструкций, в которых применяются пористые материалы, необходимо знание эффективной теплопроводности этих материалов, учитывающей и конвективную составляющую.

Критерием подобия, определяющим возникновение конвективного переноса тепла в пористой среде, принято так называемое фильтрационное число Рэлея (Ra) [1–3]

$$Ra^* = \frac{g \cdot \beta \cdot L \cdot k \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot T}{\mu \cdot \lambda_{\text{конд}}}, \quad (1)$$

которое можно представить в виде следующего произведения

$$Ra^* = Gr \cdot Pr^* \cdot Da, \quad (2)$$

где

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3}{\nu^2} \Delta T, \quad Pr^* = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_{\text{конд}}},$$

$$Da = \frac{k}{L^2}, \quad k = f(\Pi, \delta)$$

безразмерные числа Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr) для пористой среды и Дарси (Da) соответственно.

В работах [1–3] показано, что интенсивность теплообмена в слое пористого пористого материала определяется соотношением:

$$Nu^* = \frac{q \cdot L}{\lambda_{\text{конд}} \cdot \Delta T} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{конд}}} = f(Ra^* (Da)). \quad (3)$$

В случае когда пористую среду заполняет газ, описываемый уравнением состояния $p = \rho \cdot R \cdot T$, в работе [2] предлагается следующее выражение для фильтрационного числа Рэлея:

$$Ra^* = \frac{g \cdot \beta \cdot L \cdot k \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot p^2}{\mu \cdot \lambda_{\text{конд}} R^2 T^2} = \quad (4)$$

$$= Ra_o \cdot Da \cdot B \cdot P^2 \cdot f(p).$$

В формулах (1)–(4): $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность пористого материала с естественной конвекцией в порах; $\lambda_{\text{конд}}$ – эффективная теплопроводность материала при отсутствии конвекции; L – толщина слоя материала в направлении потока тепла; ΔT – перепад температуры в слое; k – проницаемость исследуемого образца; $B = \lambda_{\text{г}} / \lambda_{\text{конд}}$ – отношение теплопроводности газа в порах к теплопроводности материала при отсутствии конвекции; $P_{\text{отн}} = P / P_0$ – относительное гидростатическое давление; P, P_0 – абсолютное и нормальное гидростатическое давление в пористой среде; β – объемный коэффициент термического расширения газа в порах; g – гравитационная постоянная; ν – кинематическая вязкость; a – температуропроводность газа; q – плотность теплового потока через слой материала; c_p – теплоемкость; μ – динамическая вязкость; $f(p)$ – поправка, учитывающая изменение физических свойств газа в зависимости от давления.

В ранее проведенных исследованиях [4, 5] с использованием формул (1)–(4) предложены методики расчета эффективной теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ пористых зернистых материалов и мелкозернистых плотных флюидонасыщенных (аргон, вода) горных пород при наличии конвекции. Результаты расчета показали, что в высокопористых ($\Pi > 40\%$) крупнозернистых ($d = 0,5 \div 2,0$ мм) материалах теплопроводность резко возрастает при увеличении давления в порах. В мелкозернистых низкопористых ($\Pi < 15\%$) горных породах в широком диапазоне изменения давле-

ния и при различных средах, насыщающих поры, конвекция не возникала.

Авторы теоретических и экспериментальных работ [2, 3, 7] считают, что естественная конвекция в проницаемых пористых слоях возникает, если величина фильтрационного числа Ra^* превышает его критическое значение, а именно $Ra^* > Ra_{кр}^* = 40$.

Экспериментальное исследование теплопроводности

Для выявления влияния пористости, диаметра волокон и давления газа на возникновение конвекции в пористых модельных волокнистых материалах (металлические путанки) проведены экспериментальные исследования эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ при высоких давлениях газообразной среды на установке, описанной в работе [6]. В ней исследован перенос тепла в горизонтальных слоях проницаемых пористых материалов, заключенных между изотермическими непроницаемыми поверхностями с различной температурой. Пористость материалов изменялась в диапазоне $\Pi = 95 \div 99$ %. В качестве газообразной среды применялся гелий при давлении $p = (40 \div 120) \cdot 10^5$ Па. Диаметр металлической проволоки, из которой делалась

путанка, был 0,31 и 0,7 мм. Теплопроводность материала волокон изменялась от 24 Вт/(м·К) (копель) до 395 Вт/(м·К) (медь). Результаты экспериментального исследования эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$, проведенного нами, представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, увеличение пористости, диаметра волокон и давления газа наполнителя способствует увеличению эффективной теплопроводности металлических путанок, что объясняется возникновением конвекции в слое пористого материала. Из соотношения (2) следует, что при возрастании пористости и диаметра волокон возрастает и средний диаметр пор δ , что приводит к увеличению проницаемости слоя пористого материала и в итоге к возрастанию $Nu^* = f(Ra^*)$. Увеличение давления газа наполнителя также приводит к росту числа Нуссельта (Nu^*).

В табл. 1 представлены значения критического числа Ra^* , рассчитанные по формуле (1), и значения числа Нуссельта (Nu^*). На основании обработки и аппроксимации экспериментальных данных других авторов в работе [6] предлагается следующая зависимость для расчета интенсивности теплообмена в горизонтальных слоях волокнистых материалов:

Таблица 1. Теплопроводность металлических путанок при повышенном давлении гелия

Материал и диаметр волокон d мм	Пористость Π %	Давление газа p , 10^5 Па	Теплопроводность $\lambda_{эф}$ Вт/(м·К)	Ra^*	$Nu^* = \frac{\lambda_{эф}}{\lambda_{конд}}$
копель 0,7	98	40	0,35	22,9	1,31
		80	0,81	91,7	3,03
		120	0,95	206,4	3,56
медь 0,7	95	40	0,46	3,8	1,03
		80	0,47	15,2	1,05
		120	0,51	34,2	1,14
медь 0,7	97	40	0,48	8,3	1,09
		80	0,52	33,2	1,19
		120	0,90	74,7	2,05
медь 0,7	99	40	0,53	38,7	1,48
		80	1,24	154,9	3,46
		120	1,88	348,5	5,17
медь 0,31	95	40	0,42	1,1	0,98
		80	0,42	4,5	0,98
		120	0,45	10,1	1,05
медь 0,31	98	40	0,40	3,8	0,96
		80	0,41	15,4	0,98
		120	0,48	34,6	1,15
медь 0,31	99	40	0,42	8,7	1,13
		80	0,42	34,8	1,13
		120	0,58	78,3	1,56

при $Ra^* \leq 40 \quad Nu^* = 1$
 при $40 < Ra^* < 400 \quad Nu^* = 0,4(Ra^*)^{0,5} - 1,5 \quad (5)$
 при $400 < Ra^* < 10\,000 \quad Nu^* = 0,17(Ra^*)^{0,5} + 2,8.$

Экспериментальные исследования интенсивности теплообмена представлены на рис. 1.

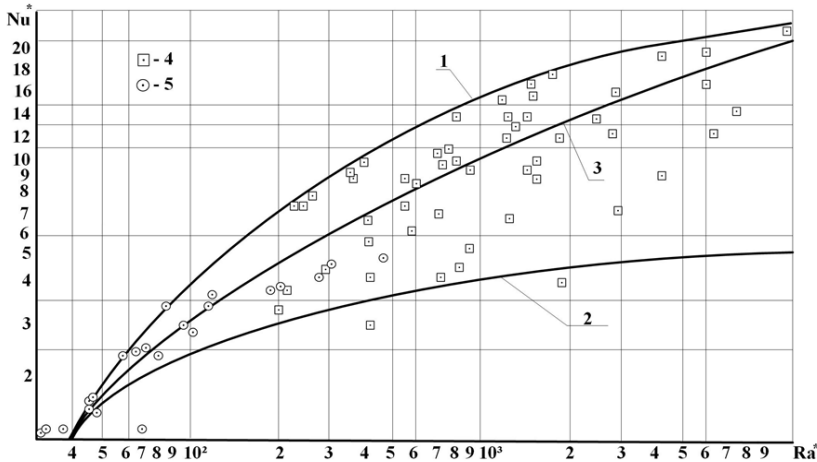


Рис. 1. Результаты экспериментального исследования интенсивности теплообмена в волокнистых материалах: 1, 2 – зона разброса экспериментальных данных [3]; 3 – аппроксимационная кривая [6]; 4 – эксперимент из работы [6]; 5 – экспериментальные данные авторов настоящей статьи (табл. 1)

Экспериментальные данные по интенсивности теплообмена в волокнистых материалах попадают в зону разброса экспериментальных данных работ [3] и [6] и отличаются от аппроксимационной зависимости (5) не более чем на 26 %.

Методика расчета теплопроводности

Как отмечалось в работах [4, 5], для оценки возможности возникновения конвекции газа или жидкости в слое пористого пронцаемого материала необходимо определить:

- теплопроводность слоя волокнистого материала при отсутствии конвекции $\lambda_{конд}$;
- пронцаемость k ; критерий Дарси (Da);
- значение средней интенсивности теплопередачи через слой пористого материала $Nu^* = f(Ra^*)$.

Исходной информацией для расчета эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ пористого материала являются: теплопроводность твердого компонента (волокон) λ_1 ; теплопроводность компонента в порах λ_2 ; диаметр волокон d ; пористость материала Π ; температуры ограничивающих поверхностей T_1 и T_2 и толщина слоя L .

По справочным данным о свойствах компонента в порах, размерах полости и температурах на ее границах по формуле (1) рассчитывается значение числа Ra^* .

Если в порах находится газ, то расчет Ra^* целесообразно проводить по формуле (4). В этом случае все параметры газа наполнителя определяются при давлении $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Па и средней температуре слоя $T_{ср}$.

В зависимости от структуры волокнистого материала (упорядоченная или хаотическая) по формулам, подробно рассмотренным в работе [8], определяется теплопроводность $\lambda_{конд}$ при отсутствии конвекции. В рассмотренных случаях использована модель волокнистого материала с хаотической структурой [8] и расчет теплопроводности проводится по формуле:

$$\lambda_{конд} \cong \frac{\lambda_1}{\frac{0,8}{C^2 + \nu(1-C)^2 + \frac{2\nu C(1-C)}{\nu C + 1 - C}} + \frac{0,2}{\frac{C^2 y^2}{\Phi} + \nu(1-C)^2 + \frac{2\nu C(1-C)}{\nu C + 1 - C}}}, \quad (6)$$

где $\nu = \lambda_2/\lambda_1$; $\Phi = 0,017 + 0,4y$; $y = r_k / (0,5d)$ – относительный радиус пятна контакта между волокнами диаметром d ; r_k – радиус пятна контакта.

Относительный размер пятна контакта для слоя стекловаты составляет $y = 3 \cdot 10^{-3}$. Для органических волокон величина пятна контакта может достигать значений $y = (2 \div 5) \cdot 10^{-2}$, для металлических волокон – $y = 2 \cdot 10^{-4}$. При проведении расчетов эффективной теплопроводности по формуле (6) для каждой группы материалов (органика, силикатные волокна, металлы) целесообразно принимать некое среднее значение параметра « y » [8]. Параметр « c » связан с пористостью уравнением:

$$2c^3 - 3c^2 + \Pi = 0. \quad (7)$$

Пронцаемость k определяется геометрией поровой структуры пористого материала, и в работе [9] предложены модель и формула для расчета пронцаемости

$$k = \frac{\delta^2}{32\tau} \cdot c^2, \quad (8)$$

где c – геометрический параметр модели, являющийся функцией пористости Π ; τ – извилистость пор.

В работе [10] экспериментально установлено, что при пористости $\Pi < 13\%$ проницаемость практически равна нулю. При увеличении пористости извилистость пор уменьшается, и при $\Pi = 1$ должна равняться 1.

Извилистость пор будет определяться выражением [9]:

$$\tau = \left(\frac{1 - \Pi_c}{\Pi - \Pi_c} \right)^{0,4}, \quad (9)$$

где Π_c – порог протекания.

При пористости, равной $\Pi_c = 0,15$, в рассматриваемой пористой системе проницаемость «прыжком» возрастает от нуля до некоторой величины и далее с ростом пористости Π изменяется монотонно. Это явление получило название «прыжковой проводимости» [11].

По известным значениям пористости Π и диаметра пор δ по формулам (8) и (2) определяется проницаемость k пористого материала и критерий Дарси.

По соотношениям (5) и (3) определяются средняя интенсивность теплопередачи через слой Nu^* и эффективная теплопроводность слоя $\lambda_{эф}$.

По предложенной методике была рассчитана эффективная теплопроводность медных путанок, стекловаты, каолиновой ваты, стекловолокна и нихромовой путанки. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными авторов настоящей статьи и измерениями из работ [12, 13]. Экспериментальные исследования эффективной теплопроводности в работах [12] и [13] проведены в стационарном режиме по методу цилиндра и пластины соответственно.

Исследованы зависимости эффективной теплопроводности от диаметра волокон, пористости, перепада температур, вида и давления газа наполнителя или жидкости в порах. Результаты расчета и сопоставления с экспериментом представлены на рис. 2–5.

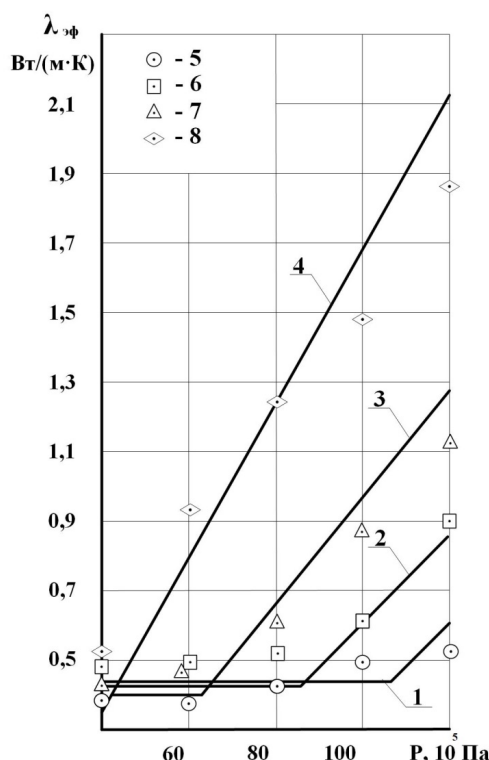


Рис. 2. Зависимость эффективной теплопроводности медной путанки $d = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м от пористости и давления газа наполнителя (в порах – гелий); 1, 2, 3, 4 – расчет; 5, 6, 7, 8 – эксперимент авторов; 1, 5 – $\Pi = 0,96$; 2, 6 – $\Pi = 0,97$; 3, 7 – $\Pi = 0,98$; 4, 8 – $\Pi = 0,99$

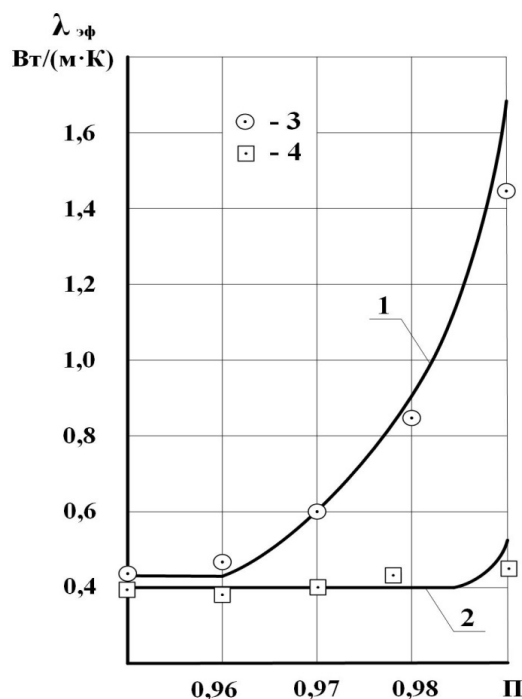


Рис. 3. Зависимость эффективной теплопроводности медной путанки от диаметра волокон и пористости при давлении $p = 100 \cdot 10^5$ Па (в порах – гелий); 1 – расчет при $d = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – расчет при $d = 0,31 \cdot 10^{-3}$ м; 3, 4 – эксперимент авторов

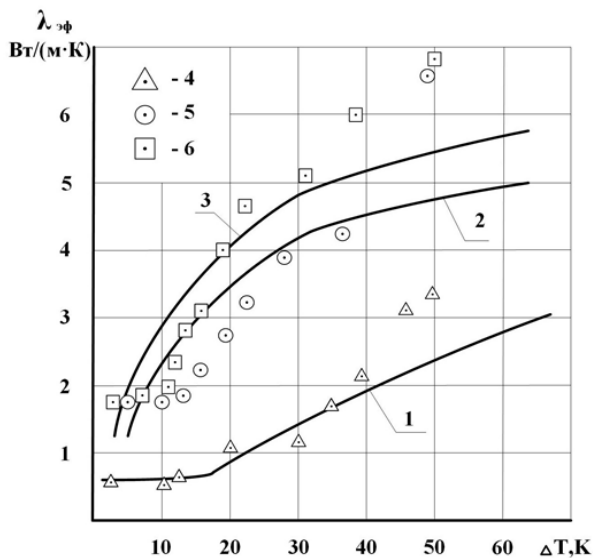


Рис. 4. Зависимость эффективной теплопроводности от перепада температур при нормальном давлении (флюид в порах – дистиллированная вода). Стекловолокно $d = 0,15 \cdot 10^{-4}$ м, $\Pi = 0,984$: 1 – расчет, 4 – эксперимент [13]; нихромовая путанка $d = 1 \cdot 10^{-4}$ м, $\Pi = 0,986$: 2 – расчет, 5 – эксперимент [13]; нихромовая путанка $d = 1 \cdot 10^{-4}$ м, $\Pi = 0,991$: 3 – расчет, 6 – эксперимент [13]

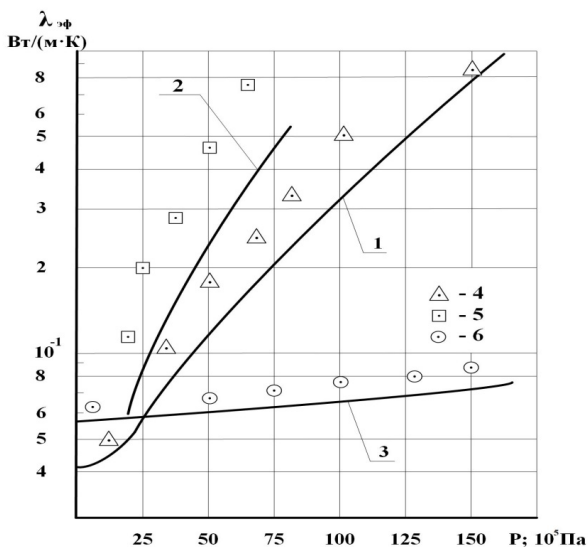


Рис. 5. Зависимость эффективной теплопроводности от давления газа наполнителя при $t = 350$ °С. Стекловата – в порах воздух $\Pi = 0,953$: 1 – расчет, 4 – эксперимент [12]; стекловата – в порах CO_2 , $\Pi = 0,953$: 2 – расчет, 5 – эксперимент [12]; каолиновая вата – в порах CO_2 , $\Pi = 0,945$: 3 – расчет, 6 – эксперимент [12]

Заключение

Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными авторов и независимых исследователей [12, 13] показывает качественное и количественное соответствие. Характер гистограммы расхождений расчетных и

опытных значений коэффициента теплопроводности волокнистых материалов близок к кривой нормального распределения. Среднеквадратическое расхождение результатов расчета с экспериментальными данными для 185 точек не превышает 13 % при доверительной вероятности 0,67 % и 26 % при доверительной вероятности 0,95.

На эффективную теплопроводность пористого материала существенное влияние оказывают диаметр волокон, пористость, перепад температур на слое материала, давление и род флюида, заполняющего поры.

Результаты эксперимента и расчета волокнистой изоляции, проведенные в среде гелия, воздуха, CO_2 и дистиллированной воды в диапазоне давлений $p = (1 \div 150) \cdot 10^5$ Па и пористости $\Pi = (0,95 \div 0,99)$, показывают, что эффективная теплопроводность увеличивается от 4 до 20 раз (рис. 2–5).

Так, эффективная теплопроводность стекловаты пористостью $\Pi = 0,953$ возрастает от $\lambda_{\text{эф}} = 0,45$ Вт/(м·К) ($p = 12 \cdot 10^5$ Па) до $\lambda_{\text{эф}} = 8$ Вт/(м·К) ($p = 150 \cdot 10^5$ Па).

Увеличение диаметра волокон медной путанки ($\Pi = 0,99$) в два раза при давлении $p = 100 \cdot 10^5$ Па приводит к возрастанию эффективной теплопроводности от $\lambda_{\text{эф}} = 0,45$ Вт/(м·К) до $\lambda_{\text{эф}} = 1,45$ Вт/(м·К) (рис. 3).

Изменение перепада температур на слое волокнистого материала в диапазоне $\Delta T = (2 \div 60)$ К при нормальном давлении сопровождается возрастанием эффективной теплопроводности от 4 до 6 раз (рис. 4).

Пористость начинает оказывать влияние на возникновение конвекции при значениях $\Pi > 0,95$ (рис. 3).

Проведенные исследования показали, что при проектировании и создании новых типов волокнистой высокотемпературной изоляции для исключения конвективного переноса тепла следует использовать материалы с минимальным диаметром волокон ($d < 100$ мкм) и с пористостью, не превышающей 95 %.

Список источников

1. Комбарну М.А., Брюн Е.А. Тепловая конвекция в пористой среде // Тепло- и массообмен. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова АН БССР, 1972. Т. 9. Ч. 2. С. 141–162.
2. Власюк М.П., Полежаев В.И. Исследование переноса тепла при естественной конвекции в проницаемых пори-

- стных материалах // Тепло- и массоперенос. Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова АН БССР, 1972. Т. 1. Ч. 2. С. 366–373.
- Власюк М.П., Полежаев В.И.** Естественная конвекция и перенос тепла в проницаемых пористых материалах. Москва, 1975. 78 с. (Препринт института прикладной математики АН СССР № 77).
 - Волков Д.П., Григорьев Б.А., Заричняк Ю.П., Рамазанова А.Э., Эмиров С.Н.** Проницаемость низкопористых пород-коллекторов и возможности конвективного переноса тепла через флюиды в порых // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2021. № 1 (46). С. 119–124.
 - Волков Д.П., Заричняк Ю.П., Романов Н.Н., Симонова М.А.** Анализ возникновения конвективного переноса тепла в зернистых материалах // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2021. № 4 (49). С. 88–93.
 - Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Шарков А.В.** Конвективный теплообмен в волокнистых материалах при повышенном давлении газообразной среды // Инженерно-физический журнал. 1978. Т. 35. № 4. С. 655–662.
 - Чжань, Айви, Бэрри.** Естественная конвекция в замкнутой прямоугольной полости, заполненной пористым материалом // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия «Теплопередача». 1970. № 1. С. 23–30.
 - Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Ленинград: Энергия, 1974. 264 с.
 - Волков Д.П.** Проницаемость пористых материалов // Инженерно-физический журнал. 1981. Т. 41. № 3. С. 421–427.
 - Terzaghi G.** Principles of soil mechanics: III – Determination of permeability of clay // Engineering News-Record. 1925. № 95. P. 832–836.
 - Дульнев Г.Н., Новиков В.В.** Процессы переноса в неоднородных средах. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение. 1991, 248 с.
 - Быков В.Н., Воронков С.Т., Дехтярев В.Л., Томашева Л.Н., Погонцев В.Г., Терещенко Е.Н.** Экспериментальное исследование эффективной теплопроводности волокнистых изоляций в сжатых газах // Теплофизика высоких температур. 1972. Т. 10. Вып. 4. С. 788–794.
 - Кокорев Л.С., Харитонов В.В., Большаков В.И., Сысоев Ю.М., Плаксеев А.А.** Естественная конвекция в волокнистой теплоизоляции // Теплофизика высоких температур. 1980. Т. 18. № 2. С. 341–346.
 - Institut teplo- i massoobmena im. A.V. Lykova AN BSSR, 1972, vol. 1, ch. 2, pp. 366–373. (In Russ).
 - Vlasyuk M.P., Polezhaev V.I.** Estestvennaya konvektsiya i perenos tepla v pronitsayemykh poristykh materialakh. [Natural convection and heat transfer in permeable porous materials]. Moscow, 1975, 78 p. (Preprint of the Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, no. 77). (In Russ).
 - Volkov D.P., Grigoriev B.A., Zarichnyak Yu.P., Ramazanova A.E. Emirov S.N.** Pronitsayemost nizkoporistykh porod-kollektorov i vozmozhnosti konvektivnogo perenosa tepla cherez flyuidy v porakh [Permeability of low-porous reservoir rocks and the possibility of convective heat transfer through fluids. Scientific and technical collection]. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, no. 1 (46), pp. 119–124. (In Russ).
 - Volkov D.P., Zarichnyak Yu.P., Romanov N.N., Simonova M.A.** Analiz vozniknoveniya konvektivnogo perenosa tepla v zernistykh materialakh [Analysis of the occurrence of convective heat transfer in granular materials. Scientific and technical collection]. *Vesti gazovoy nauki*, 2021, no. 4 (49), pp. 88–93. (In Russ).
 - Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P., Sharkov A.V.** Konvektivnyi teploobmen v voloknistykh materialakh pri povyshennom davlenii gazoobraznoy sredy [Convective heat exchange in fibrous materials at increased pressure of the gaseous medium]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1978, vol. 35, no. 4, pp. 655–662. (In Russ).
 - Zhan, Ivy, Barry.** Estestvennaya konvektsiya v zamknutoy pryamougolnoy polosti. zapolnennoy poristym materialom [Natural convection in a closed rectangular cavity filled with porous material]. *Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers. Series Heat Transfer*, 1970, no 1, pp. 23–30.
 - Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P.** Teploprovodnost smesey i kompozitsionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad, Energiya, 1974, 264 p.
 - Volkov D.P.** Pronitsayemost poristykh materialov [Permeability of porous materials]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1981, vol. 41, no. 3, pp. 421–427. (In Russ).
 - Terzaghi K.** Principles of soil mechanics: III – Determination of permeability of clay. *Engineering News-Record*. 1925, no. 95, pp. 832–836.
 - Dulnev G.N., Novikov V.V.** Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh [Transfer processes in inhomogeneous media]. Leningrad, Energoatomizdat, 1991, 248 p. (In Russ).
 - Bykov V.N. Voronkov S.T., Dekhtyarev V.L., Tomasheva L.N., Pogontsev V.G., Tereshchenko E.N.** Eksperimentalnoye issledovaniye effektivnoy teploprovodnosti voloknistykh izolyatsiy v szhatykh gazakh [Experimental study of the effective thermal conductivity of fibrous insulations in compressed gases]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1972, vol. 10, no. 4, pp. 788–794. (In Russ).
 - Kokorev L.S., Kharitonov V.V., Bolshakov V.I., Sysoev Y.M., Plakseev A.A.** Estestvennaya konvektsiya v voloknistoy teploizolyatsii [Natural convection in fibrous thermal insulation]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1980, vol. 18, no. 2, pp. 341–346. (In Russ).

References

- Kombarnu M.A., Brun E.A.** Teplovaya konvektsiya v poristoy srede [Thermal convection in a porous environment]. *Teplo- i massoperenos*. Minsk, Institut teplo- i massoobmena im. A.V. Lykova AN BSSR, 1972, vol. 9, ch. 2, pp. 141–162. (In Russ).
- Vlasyuk M.P., Polezhaev V.I.** Issledovaniye perenosa tepla pri estestvennoy konveksii v pronitsayemykh poristykh materialakh [Study of heat transfer during natural convection in permeable porous materials]. *Teplo- i massoperenos*. Minsk,

Статья поступила в редакцию 15.01.2023; одобрена после рецензирования 24.02.2023; принята к публикации 05.04.2023.

The article was submitted on 15.01.2023; approved after reviewing on 24.02.2023; accepted for publication on 05.04.2023.