

Теплогидравлическая эффективность пористых сред в потоке воздуха и воды при симметричных и несимметричных пульсациях

А.Р. Хайруллин, А.И. Хайбуллина, А.А. Синявин

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: В данной работе на основе математического моделирования исследован теплообмен в пористой среде при пульсирующем течении. Моделирование проводилось в программном продукте AnsysFluent. Пористая среда была представлена в виде двухмерного канала с квадратными трубами. Определены закономерности теплообмена и гидравлического сопротивления пористой среды в пульсирующем потоке при различной пористости и диаметра фибер в зависимости от числа Рейнольдса, числа Прандтля, частоты и амплитуды пульсаций. Степень интенсификации теплообмена существенно зависит от режимных и геометрических параметров. Предложен ряд обобщающих зависимостей для расчета теплоотдачи и степени интенсификации теплообмена при симметричных и несимметричных пульсациях потока. Определена теплогидравлическая эффективность при одинаковых числах Рейнольдса и мощностях на прокачку теплоносителя в пористой среде при симметричных и несимметричных пульсациях потока.

Ключевые слова: теплообмен, пульсационное течение, пористая среда, математическое моделирование, теплогидравлическая эффективность.

Для повышения эффективности различного тепломассообменного оборудования широко применяются различные методы интенсификации теплообмена [1–3]. Пористые среды могут применяться в качестве интенсификаторов теплообмена в нефтехимической, холодильной, пищевой, энергетической и др. видах промышленности [4]. Теплообмен и гидродинамика в пористых средах изучается экспериментально [5–7] и численно [8–10]. При исследованиях рассматриваются геометрические параметры пористых сред и режимные параметры потока.

В работах [11–13] экспериментальным методом изучался теплообмен при стационарном течении потока с различными геометрическими и режимными параметрами. Получены обобщающие зависимости для исследованных диапазонов. Установлено, что геометрические и режимные параметры пористых сред влияют на характеристики теплообмена и гидравлическое сопротивление. При численном исследовании пористых сред

применяются различные подходы. В последнее время для моделирования пористых сред стал использоваться метод диаграммы Вороного [14,15]. Применение данного метода позволяет получить хорошее совпадение с экспериментальными данными [16,17], однако используется он только для ограниченных областей со стационарным течением, поскольку требует больших вычислительных ресурсов. При многопараметрических исследованиях пористая среда зачастую моделируется в двухмерной постановке. В работах [18–20] теплообмен в пористых средах изучался при симметричных высокочастотных пульсациях потока 20–100 Нз. Для упрощения моделирования пористая среда была представлена в виде двухмерного ряда квадратных труб. В работах показано, что пульсации потока оказывают существенное влияние на характеристики теплообмена.

Теплообмен в пористых средах в основном исследован при стационарном течении. С другой стороны, теплообмен и гидродинамика в пористых средах при пульсирующих течениях остаются мало изученными. В данной работе теплообмен в пористой среде изучается при симметричных и несимметричных пульсациях в потоках воздуха и воды. Пористая среда представлена в виде ряда квадратных труб.

Расчетная область пористой среды показана на рисунке 1. Максимальное число Рейнольдса при численном моделировании было не более 100, поэтому течение в пористой среде считалась ламинарным. В связи с этим задача решалась в двухмерной постановке, что упрощало численное моделирование. В работе [20] обоснована применимость двухмерного течения в пористой среде при низких числах Re . Число Рейнольдса рассчитывалось по диаметру фибер d и максимальной скорости потока в пористой среде. На стенках фибер задавался постоянный тепловой поток 5 Вт/м^2 при течении воздуха и 500 Вт/м^2 при течении воды. Рабочей средой были воздух и вода. Теплофизические свойства воды и воздуха были

постоянными и рассчитывались в зависимости от числа Прандтля Pr . Для проведения численного исследования использовался программный продукт AnsysFluent. При моделировании использовалась сетка с нодами 20×40 на одну клетку пористой среды, применимость данной сетки для схожей задачи показана в работе [20]. Шаг по времени составлял $0,001$ с.

Частота пульсаций принимала значение f $0,25$, $0,5$, $0,75$ Гц, безразмерная относительная амплитуда пульсаций - A/d 1 , $2,3$, число Рейнольдса Re 10 , 50 , 100 , скважность пульсаций - ψ $0,25$ (несимметричные пульсации) и $0,5$ (симметричные пульсации), число Прандтля Pr $0,7$, $3,55$, $7,01$, порозность - ε $0,75$, $0,84$, $0,938$, диаметр фибер - d 3 , 5 , 7 мм. Расчет параметров пульсаций приведен в работе [21].



Рис. 1. – Расчетная область пористой среды.

В результате численного исследования получены обобщающие зависимости для прогнозирования теплоотдачи при пульсирующих потоках воды и воздуха в пористых средах. Уравнения (1), (2) получены для несимметричных пульсаций ($\psi = 0,25$). Уравнения (3), (4) получены для симметричных пульсаций ($\psi = 0,5$). Уравнения (1) –(4) справедливы для диапазонов $10 \leq Re \leq 100$, $0,7 \leq Pr \leq 7,01$, $1 \leq A/d \leq 3$, $0,25 \leq f \leq 0,75$, $0,75 \leq \varepsilon \leq 0,938$.

$$Nu_p = 2,076 Re^{0,109} \cdot Pr^{-0,049} \cdot A/d^{0,113} \cdot Fo^{-0,22} \cdot \varepsilon^{-0,654} \quad (1)$$

где Nu_p – число Нуссельта в пульсационном течении; Fo – число Фурье определялось, как:

$$Fo = \frac{a}{fd^2},$$

где a – температуропроводность рабочей среды.

$$\frac{\text{Nu}_p}{\text{Nu}_{st}} = 1,786 \text{Re}^{-0,056} \cdot \text{Pr}^{-0,192} \cdot (A/d)^{0,113} \cdot \text{Fo}^{-0,209} \cdot \varepsilon^{0,555} \quad (2)$$

где Nu_{st} – число Нуссельта в стационарном течении.

$$\text{Nu}_p = 2,013 \text{Re}^{0,137} \cdot \text{Pr}^{-0,034} \cdot (A/d)^{0,096} \cdot \text{Fo}^{-0,23} \cdot \varepsilon^{-0,739} \quad (3)$$

$$\frac{\text{Nu}_p}{\text{Nu}_{st}} = 1,732 \text{Re}^{-0,028} \cdot \text{Pr}^{-0,176} \cdot (A/d)^{0,096} \cdot \text{Fo}^{-0,219} \cdot \varepsilon^{0,469} \quad (4)$$

По степенным показателям параметров уравнений (2),(4) можно судить об их влиянии на интенсификацию теплообмена в пульсирующем течении. Поскольку степень при Рейнольдсе, Прандтля и Фурье отрицательная, то с увеличением перечисленных критериев степень интенсификации теплообмена $\text{Nu}_p/\text{Nu}_{st}$ снижается. Максимальное влияние на интенсификацию теплообмена среди режимных параметров оказывает число Фурье. Поскольку степень при амплитуде пульсаций и порозности положительна, то с увеличением амплитуды и порозности происходит повышение степени интенсификации. Среди всех рассмотренных параметров максимальное влияние на интенсификацию теплообмена оказывает порозность пористой среды. Среднее отклонение уравнений (1) –(4) с данными численного эксперимента составило 13,4, 12,9, 13,3 и 11,7% соответственно, максимальное отклонение составило 53,3, 47, 42,4 и 40,8%. Для уменьшения погрешностей обобщающих зависимостей число критериев уравнений (1) – (4) было уменьшено до четырех. Параметры уравнения (5) и среднее δ_{cp} и максимальное δ_{max} отклонение от данных численного эксперимента приведены в таблице № 1, уравнения (6) в таблице № 2.

$$\text{Nu}_p = A \text{Re}^m \cdot (A/d)^c \cdot \text{Fo}^b \cdot \varepsilon^d \quad (5)$$

$$\frac{\text{Nu}_p}{\text{Nu}_{st}} = A \text{Re}^m \cdot (A/d)^c \cdot \text{Fo}^b \cdot \varepsilon^d \quad (6)$$

Таблица № 1

Параметры уравнения (5)

ψ	Pr	A	m	c	b	d	$\delta_{\text{ср}}, \%$	$\delta_{\text{макс}}, \%$
0,25	0,7	1,521	0,067	0,007	-0,023	-1,894	4,5	11,9
0,5	0,7	1,487	0,069	0,002	-0,015	-2,232	4,8	9,7
0,25	3,55	0,957	0,097	0,198	-0,453	-0,186	9,5	29,6
0,5	3,55	1,038	0,161	0,150	-0,407	-0,194	18,9	38,1
0,25	7,01	1,057	0,163	0,133	-0,378	0,118	8,4	28,0
0,5	7,01	1,052	0,182	0,138	-0,402	0,207	12,1	26,9

Таблица № 2

Параметры уравнения (6)

ψ	Pr	A	m	c	b	d	$\delta_{\text{ср}}, \%$	$\delta_{\text{макс}}, \%$
0,25	0,7	1,058	-0,001	0,007	-0,023	-0,307	1,1	9,4
0,5	0,7	1,034	0,001	0,002	-0,015	-0,645	1,6	6,5
0,25	3,55	0,783	-0,120	0,198	-0,453	0,920	9,1	29,8
0,5	3,55	0,850	-0,056	0,150	-0,407	0,912	6,3	20,4
0,25	7,01	0,745	-0,046	0,133	-0,378	1,052	10,7	29,8
0,5	7,01	0,742	-0,027	0,138	-0,402	1,141	12,9	31,7

На рис. 2–8 приведены результаты математического моделирования. Степень интенсификации теплообмена различна в зависимости от характера (симметричные несимметричные пульсации) и интенсивности пульсаций. Оценка интенсивности пульсаций осуществлялась на основе безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo)$. Представление безразмерного комплекса в таком виде сделано на основе анализа обобщающих зависимостей (2), (3) для прогнозирования степени интенсификации в пористой среде при пульсациях потока. Степень при числе Рейнольдса, числе Прандтля и числе Фурье имеет отрицательное значение. Степень при амплитуде имеет положительное значение. Интенсификация теплообмена выше при симметричных пульсациях при значениях безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo)$ меньше двух. С увеличением безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo)$ больше двух, несимметричные пульсации эффективней для усиления теплообмена в

пористой среде. При достижении безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo) \approx 20$ степень интенсификации теплообмена не зависит от характера пульсаций. Во всем исследованном диапазоне рост гидравлического сопротивления выше при несимметричных пульсациях потока (рис. 4). Теплогидравлическая эффективность пульсационного метода интенсификации в пористой среде оценивалась фактором аналогий Рейнольдса (ФАР) (критерий Кирпичева) при одинаковых числах Рейнольдса ФАР и при одинаковых мощностях требуемых на прокачку теплоносителя. ФАР рассчитывался по формуле (7), $ФАР_N$ рассчитывался по формуле (8):

$$ФАР = \frac{Nu_p / Nu_{st}}{\xi_p / \xi_{st}}, \quad (7)$$

где ξ_p, ξ_{st} – коэффициент гидравлического сопротивления при пульсационном и стационарном течении соответственно.

$$ФАР = \frac{Nu_p / Nu_{st}}{(\xi_p / \xi_{st})^{1/3}}. \quad (8)$$

ФАР пористой среды при несимметричных пульсациях выше симметричных при значениях безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo)$ меньше 0,1. С увеличением $A/d/(RePrFo)$, характер пульсаций имеет одинаковый эффект на ФАР (рис. 5,6). Теплогидравлическая эффективность при одинаковых мощностях $ФАР_N$ больше единицы при $A/d/(RePrFo)$ меньше 0,2. Симметричные пульсации эффективней несимметричных при $ФАР_N$ практически во всем диапазоне, кроме $A/d/(RePrFo)$ меньше 0,07.

Интенсификация теплообмена также существенно зависит от порозности пористой среды. Как при симметричных, так и несимметричных пульсациях степень интенсификации выше при порозности 0,938 при значениях безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo)$ меньше двух. При значениях безразмерного комплекса $A/d/(RePrFo)$ больше двух, интенсификация выше для пористой среды с порозностью 0,84. Лучшей

теплогидравлической эффективностью обладает пористая среда с минимальной порозностью 0,75.

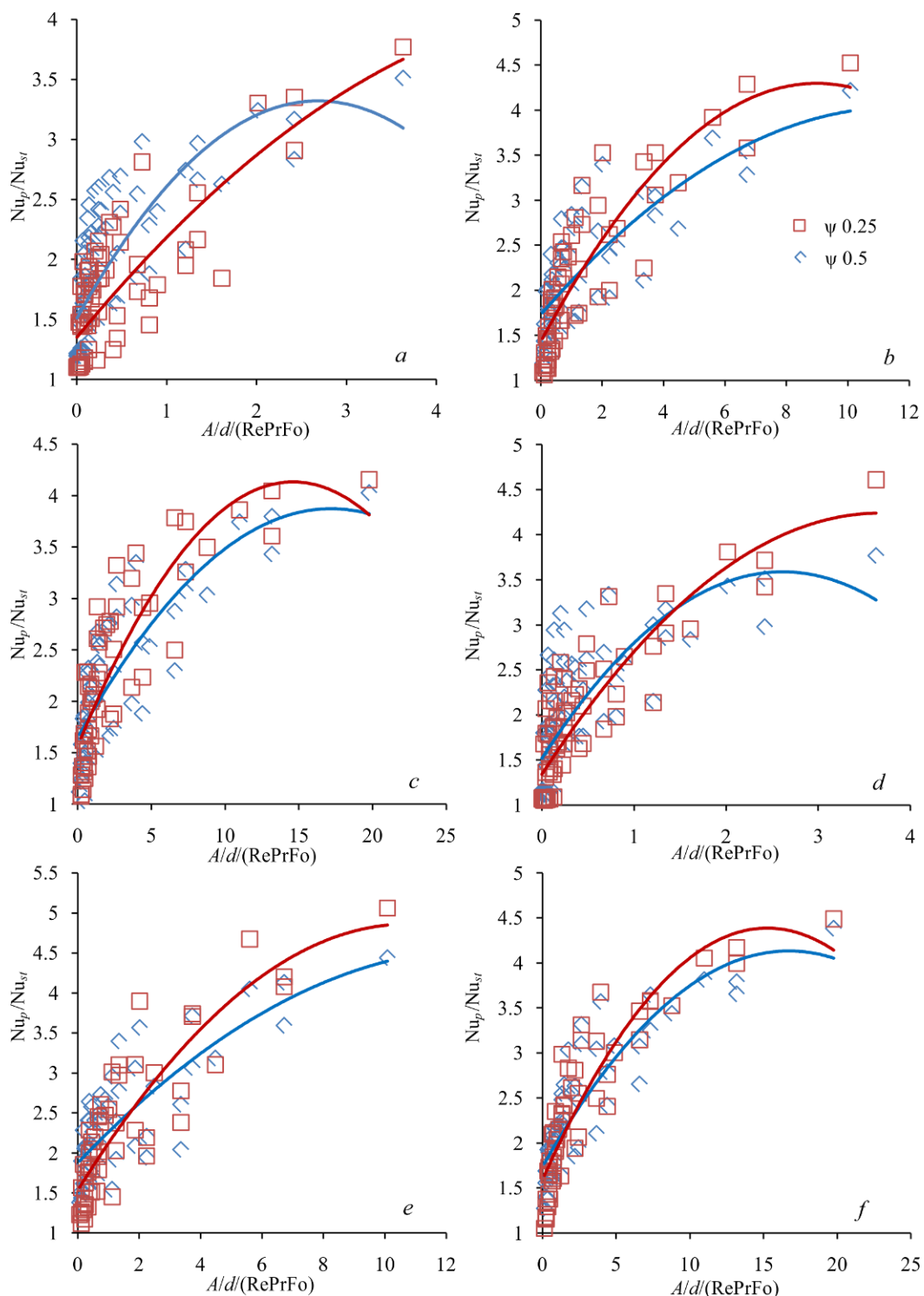


Рис. 2. – Зависимость Nu_p/Nu_{st} от $A/d/(RePrFo)$:

- a) $d = 3$, $\varepsilon = 0,75$; b) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,75$; c) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,75$;
- d) $d = 3$ мм, $\varepsilon = 0,84$; e) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,84$; f) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,84$

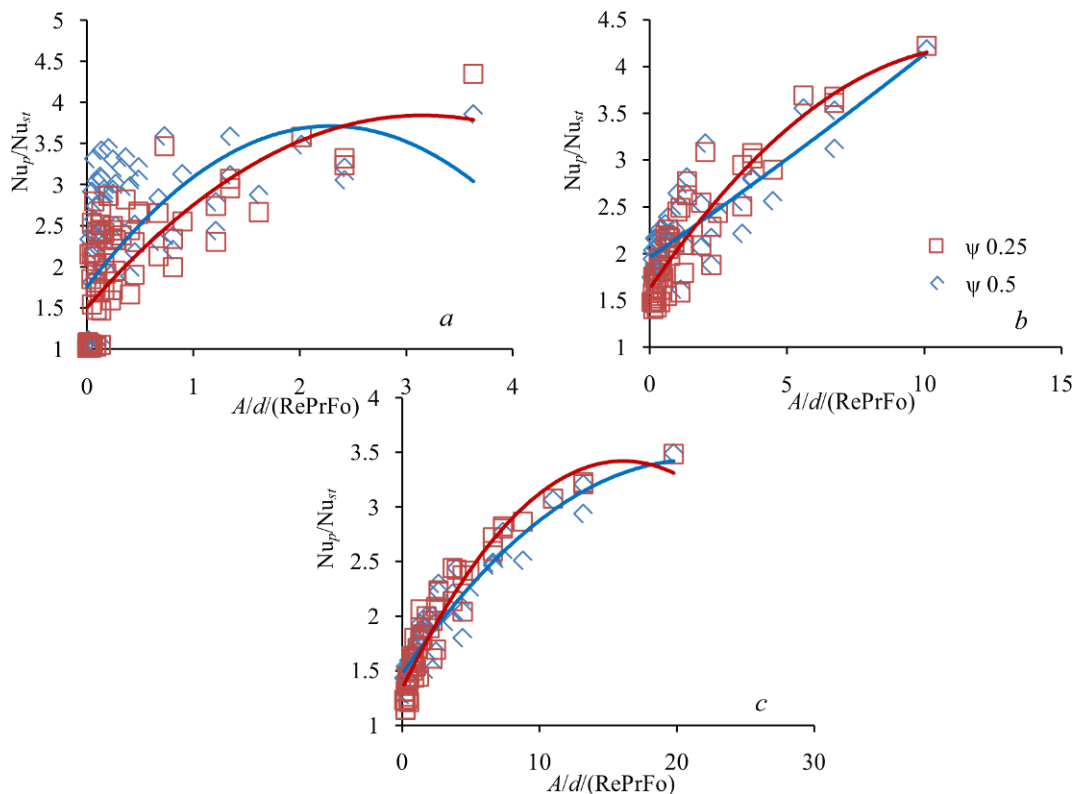


Рис. 3. – Зависимость Nu_p/Nu_{st} от $A/d/(RePrFo)$:

a) $d = 3$, $\varepsilon = 0,938$; b) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,938$; c) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,938$

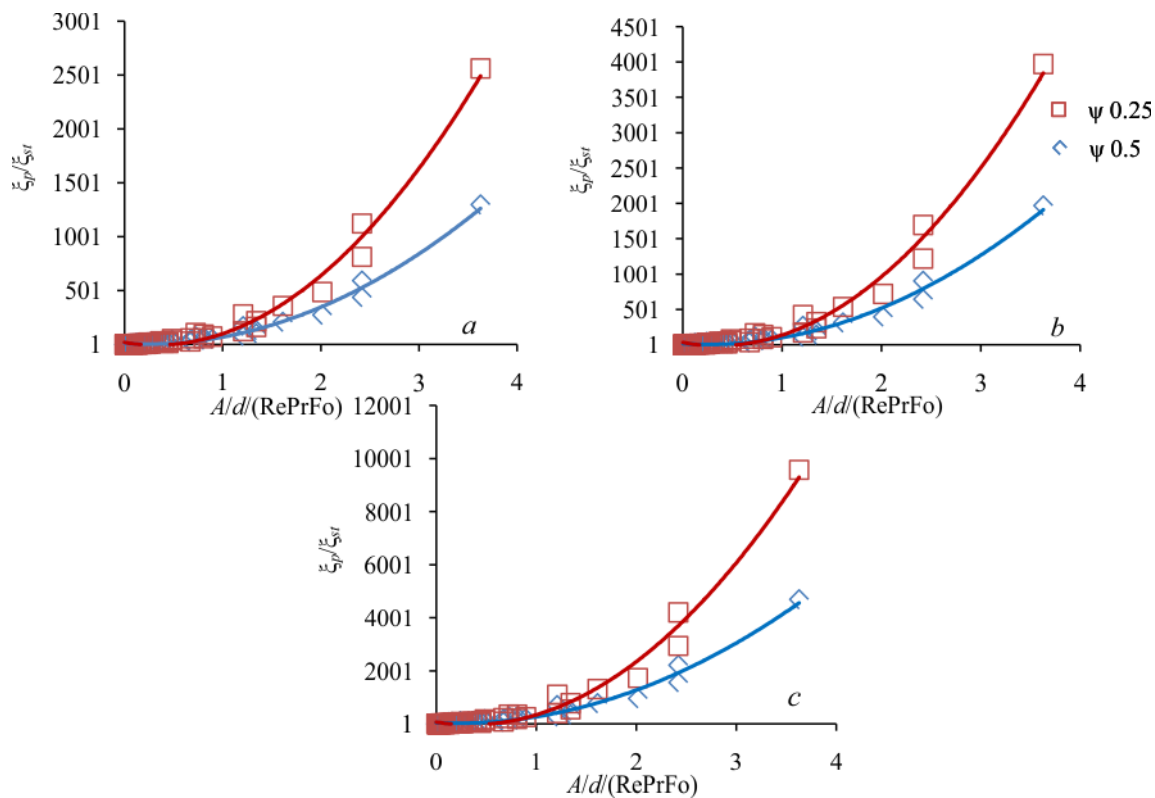


Рис. 4. – Зависимость ξ_p/ξ_{st} от $A/d/(RePrFo)$, при $d = 3$:

a) $\varepsilon = 0,75$; b) $\varepsilon = 0,84$; c) $\varepsilon = 0,938$

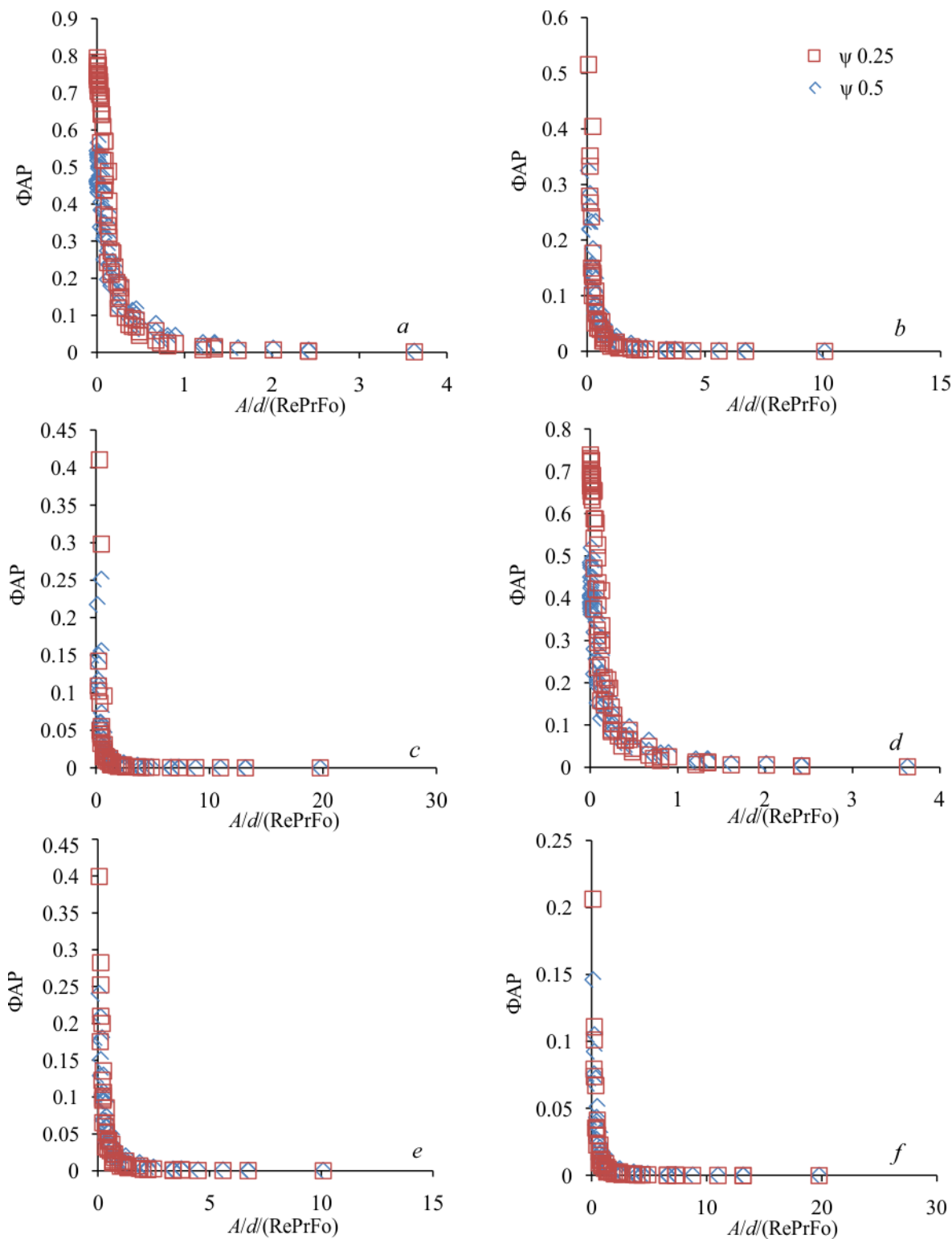


Рис. 5. – Зависимость ФАР от $A/d/(RePrFo)$:

- a) $d = 3$, $\varepsilon = 0,75$; b) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,75$; c) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,75$;
 d) $d = 3$ мм, $\varepsilon = 0,84$; e) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,84$; f) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,84$

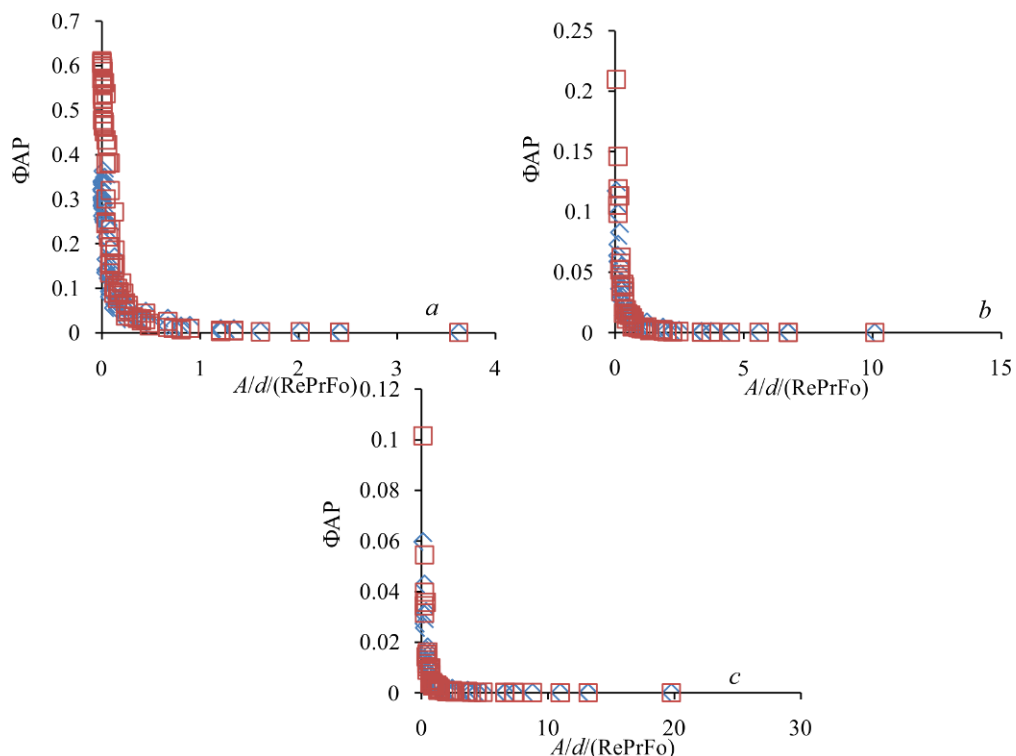


Рис. 6. – Зависимость ФАР от $A/d/(RePrFo)$:

a) $d = 3$, $\varepsilon = 0,938$; b) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,938$; c) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,938$

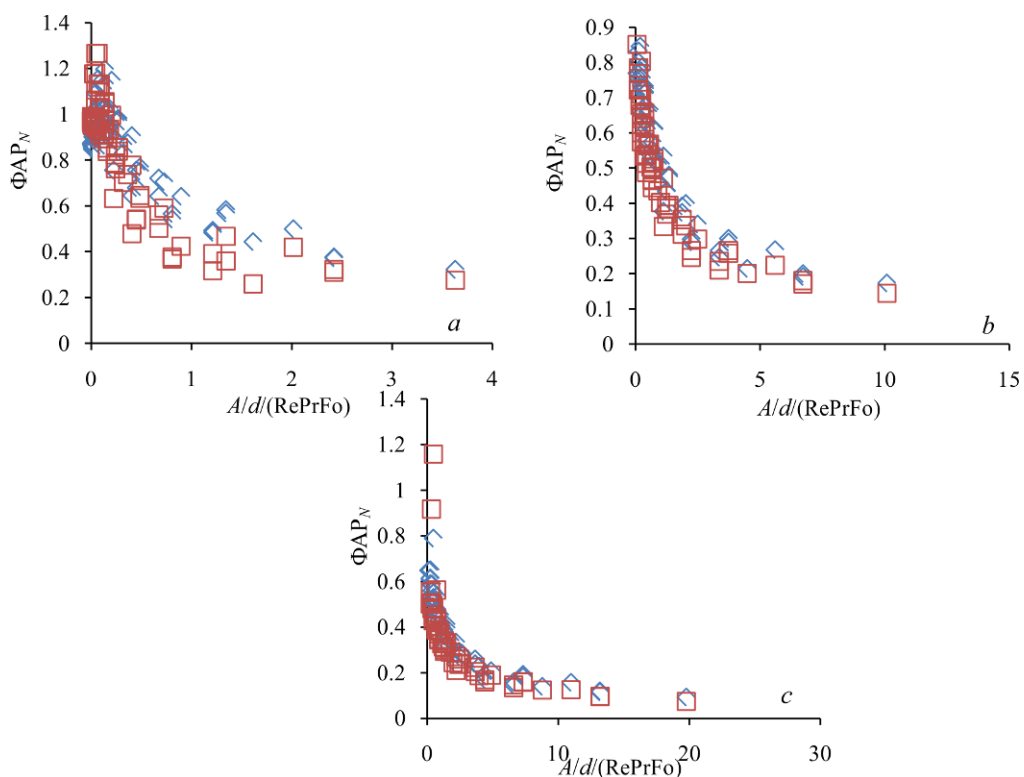


Рис. 7. – Зависимость ΦAP_N от $A/d/(RePrFo)$:

a) $d = 3$, $\varepsilon = 0,75$; b) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,75$; c) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,75$

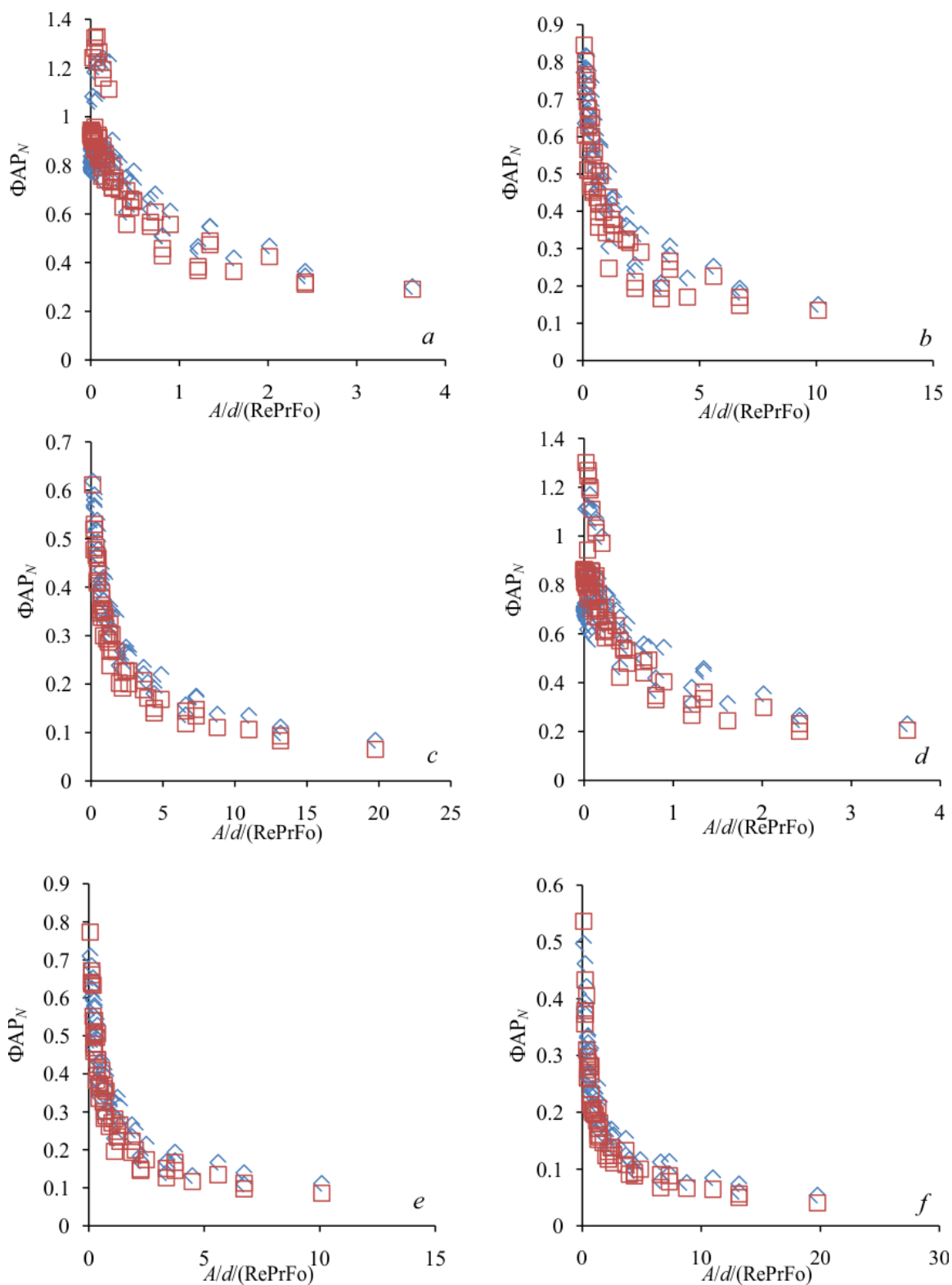


Рис. 8. – Зависимость ΦAP_N от $A/d/(RePrFo)$:

a) $d = 3$ мм, $\varepsilon = 0,84$; b) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,84$; c) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,84$;

d) $d = 3$, $\varepsilon = 0,938$; e) $d = 5$ мм, $\varepsilon = 0,938$; f) $d = 7$ мм, $\varepsilon = 0,938$

В данной работе на основе математического моделирования исследован теплообмен и гидравлическое сопротивление пористой среды при пульсирующем потоке воды и воздуха. В результате получены критериальные уравнения для прогнозирования теплоотдачи в пористой среде при пульсационном течении для различных режимных и геометрических параметров. Установлено, что с увеличением интенсивности пульсаций происходит усиление теплообмена. Интенсификация теплообмена различна в зависимости от характера пульсаций (симметричные несимметричные пульсации), режима течения и порозности. Во всем исследованном диапазоне максимальная интенсификация теплообмена достигла 5 раз для порозности - 0,84, числе Рейнольдса - 10, числе Прандтля - 3,55, частоте - 0,75, амплитуде - 3 и скважности пульсаций - 0,25.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, rscf.ru/project/21-79-10406/.

Литература

1. Nguyen D.H., Ahn H.S. A comprehensive review on micro/nanoscale surface modification techniques for heat transfer enhancement in heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, Vol. 178. URL: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121601.
 2. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925.
 3. Дресвянникова Е.В, Лекомцев П.Л., Савушкин А.В. Возможности регулирования процессов тепловлажностной обработки в массообменных аппаратах при воздействии электрического поля // Инженерный вестник Дона, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235.
-

4. Wang H., Guo L., Chen K. Theoretical and experimental advances on heat transfer and flow characteristics of metal foams // *Sci. China Technol. Sci.* 2020. Vol. 63, № 5. pp. 705–718.

5. Rezaei E., Abbassi A. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in metal-foam-filled circular and flattened tubes // *J Therm Anal Calorim.* 2021. Vol. 146, № 1. pp. 469–482.

6. Zhu M. et al. Experimental investigation of the comprehensive heat transfer performance of PCMs filled with CMF in a heat storage device // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, Vol. 188. URL: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122582.

7. Yogi K. et al. Experimental investigation on the local heat transfer with a circular jet impinging on a metal foamed flat plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, Vol. 162. URL: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120405.

8. Badruddin I.A. et al. Heat Transfer in Porous Media: A Mini Review // *Materials Today: Proceedings.* 2020. Vol. 24. pp. 1318–1321.

9. Gong L. et al. Thermal performance of micro-channel heat sink with metallic porous/solid compound fin design // *Applied Thermal Engineering.* 2018. Vol. 137. pp. 288–295.

10. Hung T.-C., Huang Y.-X., Yan W.-M. Thermal performance of porous microchannel heat sink: Effects of enlarging channel outlet // *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2013. Vol. 48. pp. 86–92.

11. Mancin S. et al. Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2013. Vol. 62. pp. 112–123.

12. Dietrich B. Heat transfer coefficients for solid ceramic sponges – Experimental results and correlation // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2013. Vol. 61. pp. 627–637.

13. Bağcı Ö., Dukhan N. Experimental hydrodynamics of high-porosity metal foam: Effect of pore density // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 103. pp. 879–885.
 14. Abishek S. et al. Generation and validation of virtual nonwoven, foam and knitted filter (separator/coalescer) geometries for CFD simulations // *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 188. pp. 493–507.
 15. Li Y. et al. Radiative characteristics of Voronoi open-cell foams made from semitransparent media // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 133. pp. 1008–1018.
 16. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Numerical investigation of pressure drop and heat transfer through open cell foams with 3D Laguerre-Voronoi model // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 113. pp. 819–839.
 17. Li J.-Q. et al. Pore scale simulation of spectral radiative properties of Voronoi open-cell carbon foams at high temperatures // *Infrared Physics & Technology*, 2021, Vol. 114. URL: doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103655.
 18. Kim S.-M., Ghiaasiaan S.M. Numerical Modeling of Laminar Pulsating Flow in Porous Media // *Journal of Fluids Engineering*, 2009, Vol. 131, № 4. URL: doi.org/10.1115/1.3089541.
 19. Mulcahey T.I., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders // *International Journal of Thermal Sciences*. 2013. Vol. 64. pp. 105–120.
 20. Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. Thermal Dispersion and Convection Heat Transfer during Laminar Transient Flow in Porous Media // *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. Vol. 50. pp. 440–448.
 21. Haibullina A.I. et al. Enhancement of heat transfer of heat exchangers using in transport by pulsating flow // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, Vol. 918, № 1. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/918/1/012163.
-

References

1. Nguyen D.H., Ahn H.S. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, Vol. 178. URL: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121601.
 2. Korniyenko F.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/925.
 3. Dresvyannikova E.V. Lekomtsev P.L., Savushkin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2235.
 4. Wang H., Guo L. Chen K. Sci. China Technol. Sci. 2020. Vol. 63, № 5. pp. 705–718.
 5. Rezaei E., Abbassi A. J Therm Anal Calorim. 2021. Vol. 146, № 1. pp. 469–482.
 6. Zhu M. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022, Vol. 188. URL: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122582.
 7. Yogi K. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, Vol. 162. URL: doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120405.
 8. Badruddin I.A. et al. Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 24. pp. 1318–1321.
 9. Gong L. et al. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 137. pp. 288–295.
 10. Hung T.-C., Huang Y.-X., Yan W.-M. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 48. pp. 86–92.
 11. Mancin S. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 62. pp. 112–123.
 12. Dietrich B. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 61. pp. 627–637.
 13. Bağcı Ö., Dukhan N. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 103. pp. 879–885.
 14. Abishek S. et al. Separation and Purification Technology. 2017. Vol. 188. pp. 493–507.
-



15. Li Y. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 133. pp. 1008–1018.
16. Nie Z., Lin Y., Tong Q. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 113. pp. 819–839.
17. Li J.-Q. et al. Infrared Physics & Technology, 2021, Vol. 114. URL: doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103655.
18. Kim S.-M. Journal of Fluids Engineering. 2009, Vol. 131, № 4 URL: doi.org/10.1115/1.3089541.
19. Mulcahey T.I., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. International Journal of Thermal Sciences. 2013. Vol. 64. pp. 105–120.
20. Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M. International Journal of Thermal Sciences. 2011. Vol. 50. pp. 440–448.
21. Haibullina A.I. et al. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020, Vol. 918, № 1. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/918/1/012163.