

Математическое моделирование теплообмена и гидродинамики в моделях керамических сотовых теплообменников

*О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, Р.З. Шакурова, Е.А. Дудалова,
Э.Р. Зайнуллина*

Казанский государственный энергетический университет

Аннотация: Путем численного моделирования проведены исследования влияния угла наклона пластин элемента регенеративного теплообменника на время нагрева и перепад давления. Исследования проведены для моделей теплообменных элементов с длинами 6 и 20 мм. В зависимости от длины элемента, угол наклона пластин составлял: 10°, 20°, 30°, 40° (при $L=6$ мм) и 3°, 6°, 9°, 12° (при $L=20$ мм). На границе расчетной области задавали скорость и температуру потока воздуха, а именно: 1 и 3 м/с, 303 и 973 К. Результаты исследований показали, что увеличение угла наклона пластин способствует снижению времени нагрева регенератора на 38,56-49,1% в зависимости от длины теплообменного элемента, скорости и температуры потока воздуха.

Ключевые слова: регенерация тепла, сотовый теплообменник, численное моделирование, расчет, время нагрева, перепад давления, геометрия теплообменника, угол наклона пластин, скорость потока воздуха, температура потока воздуха.

Введение

Регенеративные теплообменники предназначены для непрямого теплообмена между горячим и холодным теплоносителем. В таких теплообменниках тепло сначала передается от горячей среды к теплообменнику, а затем к холодной среде [1]. Регенеративные теплообменники активно применяют в различных отраслях промышленности, например, в энергетике для утилизации отработанного тепла дымовых газов [2], в металлургии для утилизации теплоты сгорания конвертерного газа [3], в жилищно-коммунальном хозяйстве для регенерации тепла выхлопных газов лучистых обогревателей для систем отопления в больших залах [4] и т.д.

Теплообменники делят на две категории: с неподвижным слоем, когда теплообменник омывается попеременно горячим и холодным теплоносителем [5], и с подвижным слоем, когда теплообменник непрерывно вращается в двух встречных потоках жидкостей. Существуют большое

количество различных конструкций теплообменников, такие как соты, сферы, кольца Рашига, кольца Лессинга и т.д. [6] Пористые среды показали высокую эффективность в качестве теплообменников [7-9]. При этом пористые теплообменники с неупорядоченной структурой оказывают большее сопротивление потоку теплоносителя, поэтому чаще применяют теплообменники с упорядоченной структурой, например, со структурой сот [10]. Сотовые регенеративные теплообменники получили широкое распространение благодаря высоким показателям удельной площади поверхности, пористости и прочности, в связи с этим в данной статье мы рассмотрим регенеративные теплообменники именно с сотовой структурой.

На характеристики сотового теплообменника влияют материал и структура. В зависимости от температур теплоносителей, теплообменники изготавливают из металла или керамики [11], при этом керамику используют в высокотемпературных приложениях. Влияние материала сотового регенеративного теплообменника исследовано в работе Fu и др. [12]. Авторы оценили характеристики теплообменников, изготовленных из силикагеля, цеолита, хлорида кальция и хлорида лития. Исследования проводились для зимних и летних условий эксплуатации. Лучшие тепловые характеристики показали теплообменники из цеолита. В другой работе исследовали характеристики теплообменников, изготовленных из нитрида алюминия и оксида алюминия [13]. Согласно результатам исследований, нитрид алюминия обеспечивает на 59% более высокую теплопередачу, чем оксид алюминия. Таким образом, материал теплообменника оказывает влияние на его тепловые характеристики.

Структурные параметры регенеративного сотового теплообменника влияют не только на тепловые [14], но и на механические [15,16] и гидравлические [17] характеристики регенеративного теплообменника. В поиске оптимальной конструкции сотового теплообменника ученые всего

мира провели многочисленные исследования, предложив различные варианты геометрий, а для производства геометрических сложных конструкций применяли методы 3D-печати [18]. Yan и др. [19] предложили конструкцию сотового теплообменника с прямоугольными каналами, заполненными решетками X-типа. Авторы исследовали тепловые и гидравлические характеристики теплообменника и сравнили их с характеристиками сотовых теплообменников других геометрий (каналы квадратного сечения, пирамидальная решетка, решетка Кагомэ и др.). Результаты исследований показали, что X-решетка обеспечивают самую высокую теплопередачу из всех исследованных геометрий теплообменника, а также существенно интенсифицирует вихревые потоки и поле турбулентности. Согласно результатам исследований Shin и др. [20], на гидравлические свойства регенеративного теплообменника сильное влияние оказывают такие структурные параметры, как пористость и гидравлический диаметр: их увеличение способствует снижению перепада давления в теплообменнике. Shakiba и др. [21] оценили влияние размера ячейки сотового теплообменника на распределение температуры, тепловой КПД и перепад давления. Авторы выяснили, что теплообменник с ячейками меньшего размера способствует более равномерному распределению температуры и повышению теплового КПД, однако также приводит к значительному повышению перепада давления. Wang и др. [22] исследовали теплопередачу в сотовых керамических теплообменниках с ячейками квадратной, круглой и шестиугольной формы. Результаты численных исследований показали, что теплообменник с шестиугольными ячейками обеспечивает меньшее время зарядки/разрядки в сравнении с ячейками других геометрий. Li и др. [23] экспериментально оценили вклад гидравлического диаметра, длины и пористости сотового теплообменника на время разрядки. Результаты исследований показали, что уменьшению времени разрядки способствуют

увеличение гидравлического диаметра и пористости сотовой керамики, в то время как увеличение длины сотовой керамики, напротив, ведет к повышению времени разрядки. Таким образом, теплогидравлические свойства сотового регенеративного теплообменника зависят от его структурных параметров [24-26].

Анализ литературы по тематике исследования показал, что учеными исследовано влияние большого количества различных факторов на теплообмен и гидродинамику в сотовых регенеративных теплообменниках различной конструкции [27,28]. В данной работе предлагается новая конструкция сотового регенеративного теплообменника, который состоит из множества теплообменных элементов, образованных, в свою очередь, пересечением горизонтальных и вертикальных пластин, расположенных под определенным углом. Целью работы является оценка влияния угла наклона пластин на время нагрева регенеративного теплообменника и перепад давления.

Научная значимость работы заключается в том, что предложена принципиально новая конструкция регенеративного теплообменника и исследовано влияние угла наклона пластин на характеристики теплообменника.

Практическая значимость работы заключается в определении оптимального угла наклона пластин сотового теплообменника, при котором достигается наименьшее время нагрева.

Постановка задачи и метод решения

Путем численного моделирования в ANSYS Fluent (v 19.2) решена задача обтекания потоком горячего воздуха теплообменного элемента сотового керамического регенератора. Регенератор состоит из множества теплообменных элементов, образованных пересечением двух горизонтальных и двух вертикальных пластин (Рисунок 1), расположенных

под углом α . Исследования проводились для теплообменных элементов регенератора двух длин: 6 и 20 мм, которым соответствовали определенные углы наклона пластин (Таблица 1).

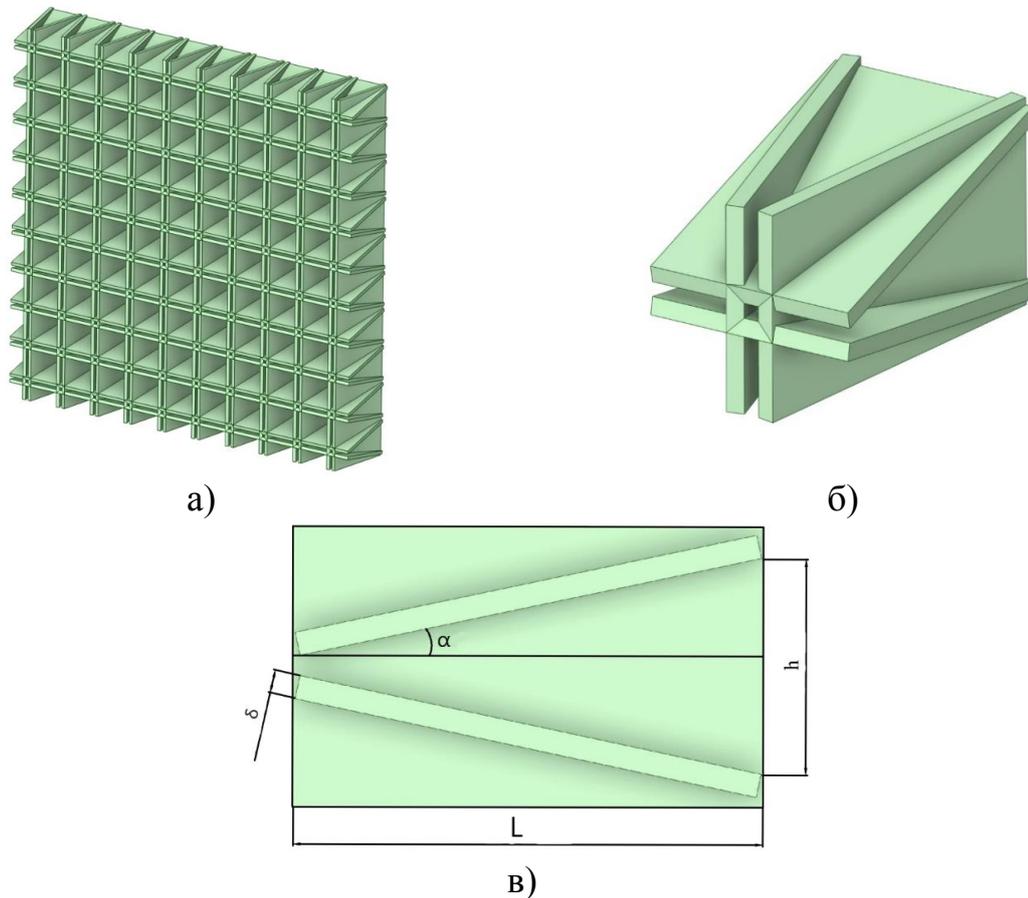


Рис. 1. – Изображения 3D-модели керамического регенератора (а), теплообменного элемента регенератора (б) и его геометрические параметры (в)

На входе в расчетную область задавали скорость и температуру потока воздуха: 1 и 3 м/с, 303 и 973 К. По результатам параметрических расчетов оценивали время нагрева теплообменного элемента регенератора и перепад давления. Оценку времени нагрева теплообменного элемента регенератора проводили следующим образом: по длине ячейки строили 10 поперечных

сечений, в каждом сечении оценивали среднюю температуру поверхности. Расчет останавливался при достижении минимальной средней температуры в каждом сечении 302 К или 972 К.

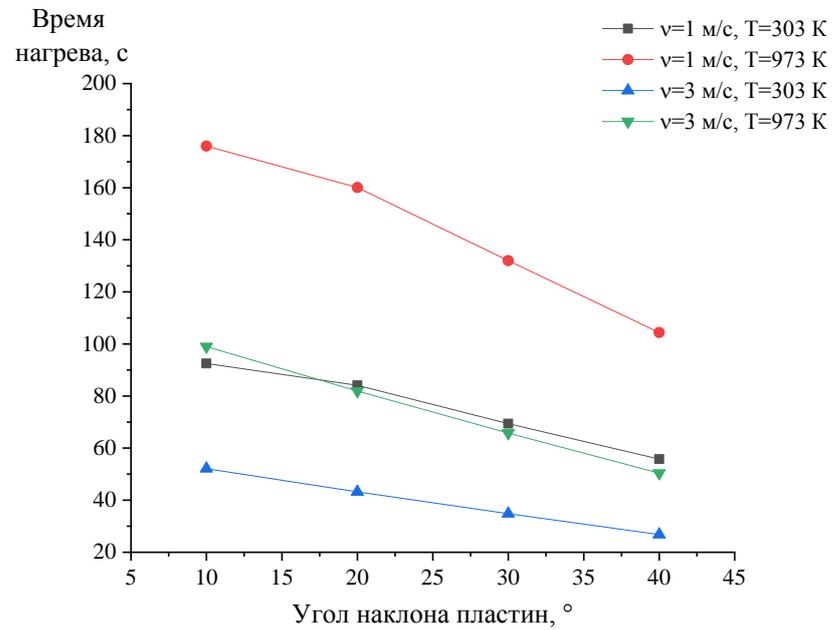
Таблица № 1

Геометрические параметры теплообменных элементов керамических регенераторов

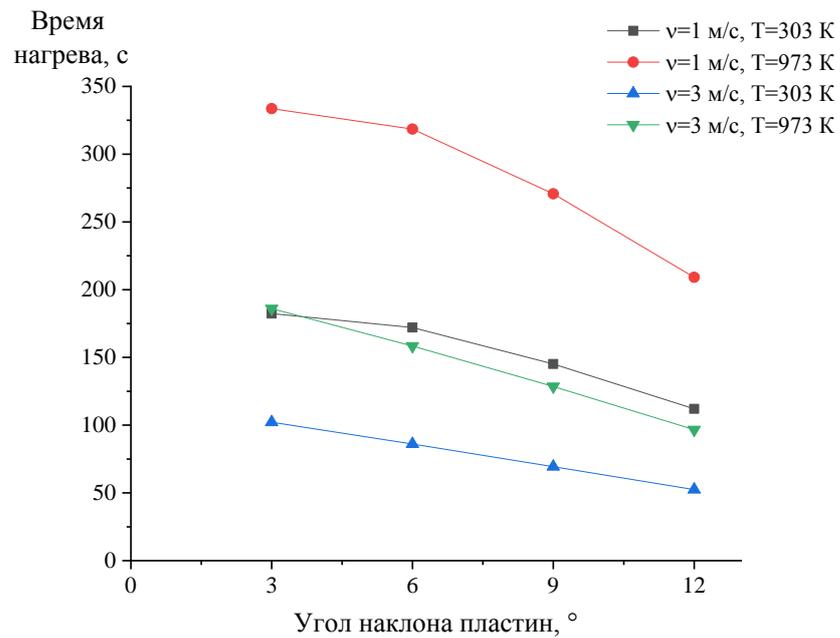
Длина L , мм	Ширина канала h , мм	Толщина пластин δ , мм	Угол наклона пластин α , °
6	6	1	10
			20
			30
			40
20			3
			6
			9
			12

Результаты и обсуждение

По результатам проведенных параметрических расчетов построены графики зависимости времени нагрева от угла наклона пластин для двух длин теплообменного элемента и различных значений скорости и температуры потока воздуха. На рисунке 2 представлены графики изменения времени нагрева для элемента регенератора длиной 6 и 20 мм. Как мы видим из графиков, увеличение угла наклона пластин приводит к снижению времени нагрева регенератора. Так, при угле наклона 10°, скорости потока воздуха 1 м/с и температуре 303 К время нагрева теплообменного элемента регенератора длиной 6 мм составляет 92,5 с. При угле наклона 40° и неизменных параметрах воздуха тот же регенератор прогревается за 55,8 с, то есть на 39,68% быстрее. При более высоких значениях температуры и потока воздуха, а именно 973 К и 3 м/с, теплообменный элемент с углом наклона пластин 40° прогревается на 49,1% быстрее, чем элемент с углом наклона пластин 10°.



а)



б)

Рис. 2. – Изменение времени нагрева теплообменного элемента длиной 6 мм (а) и 20 мм (б) в зависимости от угла наклона пластин

Теплообменный элемент большей длины $L=20$ мм (Рисунок 2, б) имеет такую же тенденцию к снижению времени нагрева по мере увеличения угла наклона пластин. При различных значениях скорости и температуры потока воздуха теплообменный элемент с углом наклона пластин 12° прогревается быстрее, чем элемент с углом наклона пластин 3° , на 38,56% ($v=1$ м/с, $T=303$ К), 37,32% ($v=1$ м/с, $T=973$ К), 48,63% ($v=3$ м/с, $T=303$ К), 48,01% ($v=3$ м/с, $T=973$ К).

На рисунке 3 представлены результаты расчета перепада давления в теплообменном элементе регенератора длиной 6 мм. Расчеты проведены для температуры потока воздуха 303 К и скоростей 1 и 3 м/с. Согласно результатам исследований, по мере увеличения угла наклона пластин, перепад давления возрастает. Так, при скорости потока воздуха 3 м/ перепад давления составляет: 11,83 Па (при $\alpha=10^\circ$), 34,55 Па (при $\alpha=20^\circ$), 104,58 Па (при $\alpha=30^\circ$) и 362,40 Па (при $\alpha=40^\circ$).

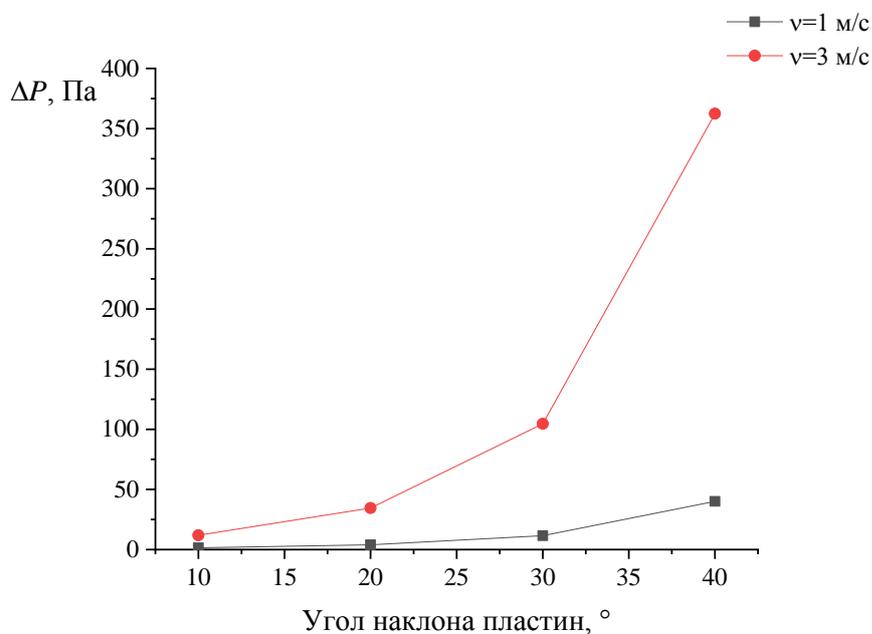


Рис. 3. – Изменение перепада давления в теплообменном элементе длиной 6 мм в зависимости от угла наклона пластин

На рисунке 4 представлены результаты расчета перепада давления в теплообменном элементе регенератора длиной 20 мм. В данном случае мы также наблюдаем тенденцию к повышению перепада давления по мере увеличения угла наклона пластин. Так, при скорости потока воздуха 3 м/с, перепад давления составляет: 13,05 Па (при $\alpha=3^\circ$), 32,80 Па (при $\alpha=6^\circ$), 114,39 Па (при $\alpha=9^\circ$) и 793,26 Па (при $\alpha=12^\circ$). Таким образом, изменение угла наклона пластин оказывает существенное влияние на значение перепада давления.

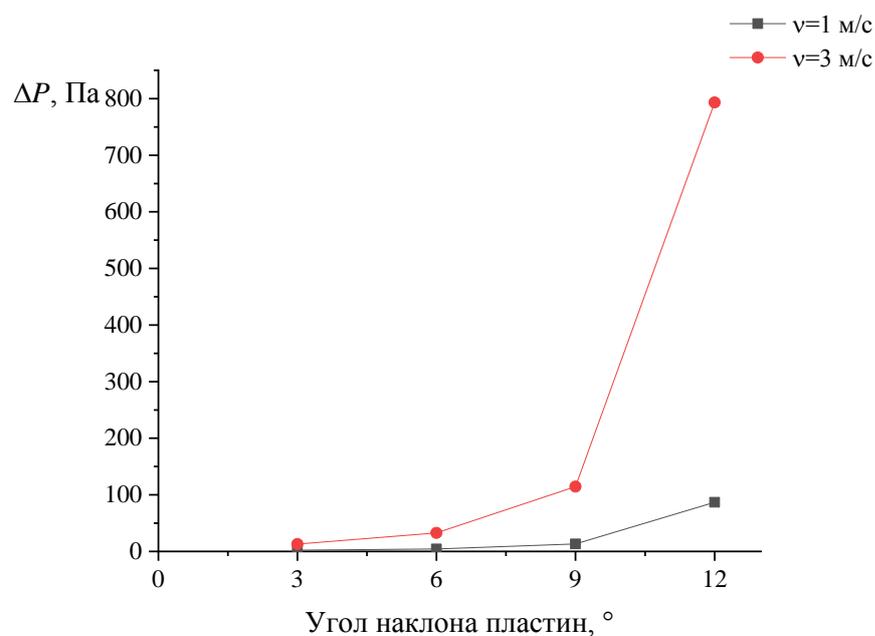


Рис. 4. – Изменение перепада давления в теплообменном элементе длиной 20 мм в зависимости от угла наклона пластин

Выводы

Путем численного моделирования проведены исследования влияния угла наклона пластин элемента керамического регенеративного

теплообменника на время нагрева и перепад давления. Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Увеличение угла наклона пластин способствует снижению времени нагрева керамического регенеративного теплообменника. Данное утверждение справедливо для всех исследованных длин теплообменных элементов регенератора, скоростей и температур потока воздуха. Так, для теплообменного элемента длиной 6 мм удалось достичь снижения времени нагрева до 49,1% при увеличении угла наклона пластин с 10° до 40° ($T=973$ К, $v=3$ м/с). Для теплообменного элемента длиной 20 мм удалось достичь снижения времени нагрева до 48,63% при увеличении угла наклона пластин с 3° до 12° ($T=3033$ К, $v=3$ м/с).

2. Увеличение угла наклона пластин приводит к значительному повышению перепада давления. Так, для теплообменного элемента с длиной 6 мм при увеличении угла наклона пластин с 10° до 40° перепад давления увеличился с 11,83 до 362,40 Па (при $v=3$ м/с). Для теплообменного элемента с длиной 20 мм при увеличении угла наклона пластин с 3° до 12° перепад давления увеличился с 13,05 до 793,26 Па (при $v=3$ м/с).

3. В приложениях, где критично важным параметром является время нагрева, целесообразно применять керамические регенераторы с пластинами, расположенными под определенным углом, который будет изменяться в зависимости от длины теплообменного элемента. В иных приложениях, где время нагрева является второстепенным параметром, а наиболее важно обеспечить наименьший перепад давления в системе, целесообразно применять керамические регенераторы с углом наклона пластин, равным нулю.

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

Литература

1. Carbonare N., Fugmann H., Asadov N., Pflug T., Schnabel L., Bongs C. Simulation and measurement of energetic performance in decentralized regenerative ventilation systems // *Energies*. 2020. V. 13. №22. P. 6010.
2. Zolfagharnasab M.H., Pedram M.Z., Hoseinzadeh S., Vafai K. Application of porous-embedded shell and tube heat exchangers for the waste heat recovery systems // *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 211. P. 118452.
3. Lukin S.V., Shestakov N.N., Porodovsky D.V., Razinkov A.A. Simulation of the Thermal Performance of Regenerative Heat Exchanger for Recovering the Heat of Combustion of Converter Gas // *Metallurgist*. 2022. V. 66. №7-8. pp. 852-862.
4. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. V. 18. P. 100522.
5. Sasidharan S., Dutta P. Studies on thermal energy storage system with ceramic honeycomb channels // *Journal of Energy Storage*. 2022. V. 52. P. 104867.
6. Moghaddam E.M., Foumeny E.A., Stankiewicz A.I., Padding J.T. Heat transfer from wall to dense packing structures of spheres, cylinders and Raschig rings // *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 407. P. 127994.
7. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25. №1. С. 82-103.
8. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Талипова А.Р., Шакурова Р.З., Гилязов, А.И. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. –Т. 14. №1(53). С. 56-64.

9. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Ваньков Ю.В., Ахметова И.Г., Шакурова Р.З., Талипова А.Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. №3. С. 55-69.

10. Kaur I., Singh P. State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 178. P. 121600.

11. Kilkovský B., Jegla Z. An Experimental Verification of Pressure Drop for Integrated Regenerative Equipment // Chemical Engineering Transactions. 2019. V. 76. pp. 253-258.

12. Fu H.X., Yang Q.R., Zhang L.Z. Effects of material properties on heat and mass transfer in honeycomb-type adsorbent wheels for total heat recovery // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 118. pp. 345-356.

13. Fattahi M., Vaferi K., Vajdi M., Moghanlou F.S., Namini A.S., Asl M.S. Aluminum nitride as an alternative ceramic for fabrication of microchannel heat exchangers: a numerical study // Ceramics International. 2020. V. 46. №8. pp. 11647-11657.

14. Almutairi M.M., Osman M., Tlili I. Thermal behavior of auxetic honeycomb structure: an experimental and modeling investigation // Journal of Energy Resources Technology. 2018. V. 140. №12. P. 122904.

15. Hu J.S., Wang B.L. Crack growth behavior and thermal shock resistance of ceramic sandwich structures with an auxetic honeycomb core // Composite Structures. 2021. V. 260. P. 113256.

16. Köllner D., Simon S., Niedermeyer S., Spath I., Wolf E., Kakimoto K. I., Fey T. Relation between Structure, Mechanical and Piezoelectric Properties in Cellular Ceramic Auxetic and Honeycomb Structures // Advanced Engineering Materials. 2023. V. 25. №3. P. 2201387.

17. Kovacev N., Li S., Zeraati-Rezaei S., Hemida H., Tsolaki A., Essa K. Effects of the internal structures of monolith ceramic substrates on thermal and hydraulic properties: additive manufacturing, numerical modelling and experimental testing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. V. 112. pp. 1115-1132.
 18. Zeng Y., Jiang L., Sun Y., Yang Y., Quan Y., Wei S., Lu G., Li R., Rong J., Chen Y., Zhou Q. 3D-printing piezoelectric composite with honeycomb structure for ultrasonic devices // *Micromachines*. 2020. V. 11. №8. P. 713.
 19. Yan H., Zhang Q., Chen W., Xie G., Dang J., Lu T.J. An X-lattice cored rectangular honeycomb with enhanced convective heat transfer performance // *Applied Thermal Engineering*. 2020. V. 166. P. 114687.
 20. Shin M.C., Ahn J., Kang B.H. Performance characteristics of a regenerative heat exchanger depending on its porous structure // *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*. 2012. V. 24. №5. pp. 415-421.
 21. Shakiba S.A., Ebrahimi R., Shams M., Yazdanfar Z. Effects of foam structure and material on the performance of premixed porous ceramic burner // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2015. V. 229. №2. pp. 176-191.
 22. Wang Y.X., Dong M., Li H.Y., Liu Y.Q., Shang Q.H. Study on thermal stress of honeycomb ceramic regenerators with different parameters // *Strength of Materials*. 2014. V. 46. pp. 256-261.
 23. Li Q., Bai F., Yang B., Wang Y., Xu L., Chang Z., Wang Z., El Hefni B., Yang Z., Kubo S., Kiriki H., Han M. Dynamic simulations of a honeycomb ceramic thermal energy storage in a solar thermal power plant using air as the heat transfer fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 129. pp. 636-645.
 24. Wei H., Huang S., Zhang X. Experimental and simulation study on heat and mass transfer characteristics in direct-contact total heat exchanger for flue gas heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 200. P. 117657.
-

25. Kaur I., Singh P. Critical evaluation of additively manufactured metal lattices for viability in advanced heat exchangers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 168. P. 120858.

26. Aider Y., Kaur I., Cho H., Singh P. Periodic heat transfer characteristics of additively manufactured lattices // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. V. 189. P. 122692.

27. Кряклина И.В. Математическая модель и оптимизация параметров работы пластинчатого рекуператора // Инженерный вестник Дона, 2014, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2269/.

28. Смирнов Р.В., Бахвалов Ю.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в энергосберегающих гелиоустановках // Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782/.

References

1. Carbonare N., Fugmann H., Asadov N., Pflug T., Schnabel L., Bongs C. Energies. 2020. V. 13. №22. pp. 6010.

2. Zolfagharnasab M.H., Pedram M.Z., Hoseinzadeh S., Vafai K. Applied Thermal Engineering. 2022. V. 211. pp. 118452.

3. Lukin S.V., Shestakov N.N., Porodovsky D.V., Razinkov A.A. Metallurgist. 2022. V. 66. №7-8. pp. 852-862.

4. Dudkiewicz E., Szałański P. Thermal Science and Engineering Progress. 2020. V. 18. pp. 100522.

5. Sasidharan S., Dutta P. Journal of Energy Storage. 2022. V. 52. pp. 104867.

6. Moghaddam E.M., Foumeny E.A., Stankiewicz A.I., Padding J.T. Chemical Engineering Journal. 2021. V. 407. p. 127994.

7. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Shakurova R.Z. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Problemy` e`nergetiki. 2023. V. 25. №1. pp. 82-104.

8. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Talipova A.R., Shakurova R.Z., Gilyazov, A.I. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo e`nergeticheskogo universiteta. 2022. V. 14. №1(53). pp. 56-64.
 9. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Van`kov Yu.V., Axmetova I.G., Shakurova R.Z., Talipova A.R. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Problemy` e`nergetiki. 2022. V. 24. №3. pp. 55-69.
 10. Kaur I., Singh P. State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 178. pp. 121600.
 11. Kilkovský B., Jegla Z. Chemical Engineering Transactions. 2019. V. 76. pp. 253-258.
 12. Fu H.X., Yang Q.R., Zhang L.Z. Applied Thermal Engineering. 2017. V. 118. pp. 345-356.
 13. Fattahi M., Vaferi K., Vajdi M., Moghanlou F.S., Namini A.S., Asl M.S. Ceramics International. 2020. V. 46. №8. pp. 11647-11657.
 14. Almutairi M.M., Osman M., Tlili I. Journal of Energy Resources Technology. 2018. V. 140. №12. pp. 122904.
 15. Hu J.S., Wang B.L. Composite Structures. 2021. V. 260. pp. 113256.
 16. Köllner D., Simon S., Niedermeyer S., Spath I., Wolf E., Kakimoto K. I., Fey T. Advanced Engineering Materials. 2023. V. 25. №3. pp. 2201387.
 17. Kovacev N., Li S., Zeraati-Rezaei S., Hemida H., Tsolaki A., Essa K. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. V. 112. pp. 1115-1132.
 18. Zeng Y., Jiang L., Sun Y., Yang Y., Quan Y., Wei S., Lu G., Li R., Rong J., Chen Y., Zhou Q. Micromachines. 2020. V. 11. №8. pp. 713.
 19. Yan H., Zhang Q., Chen W., Xie G., Dang J., Lu T.J. Applied Thermal Engineering. 2020. V. 166. pp. 114687.
-

20. Shin M.C., Ahn J., Kang B.H. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering. 2012. V. 24. №5. pp. 415-421.
21. Shakiba S.A., Ebrahimi R., Shams M., Yazdanfar Z. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2015. V. 229. №2. pp. 176-191.
22. Wang Y.X., Dong M., Li H.Y., Liu Y.Q., Shang Q.H. Strength of Materials. 2014. V. 46. pp. 256-261.
23. Li Q., Bai F., Yang B., Wang Y., Xu L., Chang Z., Wang Z., El Hefni B., Yang Z., Kubo S., Kiriki H., Han M. Applied Thermal Engineering. 2018. V. 129. pp. 636-645.
24. Wei H., Huang S., Zhang X. Applied Thermal Engineering. 2022. V. 200. pp. 117657.
25. Kaur I., Singh P. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 168. pp. 120858.
26. Aider Y., Kaur I., Cho H., Singh P. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. V. 189. pp. 122692.
27. Kryaklina I.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2269/.
28. Smirnov R.V., Baxvalov Yu.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1782/.

Дата поступления: 21.01.2024

Дата публикации: 2.03.2024