



**А. И. ПОПОВ**  
**А. В. ЕРЕМИН**  
**Н. Н. КЕЧИН**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАНАЛЕ С ОРЕБРИЕМ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER IN A CHANNEL WITH FINS BASED  
ON A TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE

Представлена методика исследования теплопереноса в каналах теплообменных устройств, где для интенсификации теплообмена используются ребра, выполненные в форме трижды периодической минимальной поверхности (TPMS от англ. «triple periodic minimal surface») Шварца Primitive. Решение задачи теплопереноса осуществляется методом конечных элементов в модуле Fluent программного комплекса ANSYS. В работе рассматривается влияние начальной скорости потока, а также толщины TPMS-ребер на потери давления и температурные характеристики потока. Исследование показало, что TPMS-оробрение способствует интенсификации теплообмена и создает турбулентные течения в непосредственной близости к TPMS-каркасу. Потери давления в канале увеличиваются по степенному закону при увеличении начальной скорости потока. Полученные в рамках исследования результаты демонстрируют потенциал применения TPMS в теплообменных устройствах и открывают множество перспектив для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** TPMS, теплоперенос, оробрение, метод конечных элементов, ANSYS

### Введение

Одной из главных целей современной инженерии является сокращение выбросов загрязняющих веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), связанных со сжиганием твердых и жидких топлив. Ключевым фактором в решении проблемы выбросов

Presents a methodology for studying heat and mass transfer in the channels of heat exchange devices, where fins made in the form of a Schwarz Primitive triply periodic minimal surface (TPMS) are used to intensify heat transfer. The solution of the heat and mass transfer problem is carried out using the finite element method in the Fluent module of the ANSYS software package. The work examines the influence of the initial flow velocity, as well as the thickness of the TPMS fins on the pressure loss and temperature characteristics of the flow. The study showed that TPMS fins enhance heat transfer and create turbulent flows in close to the TPMS frame. The pressure loss in the channel increases according to a power law with increasing initial flow velocity. The results obtained in this study demonstrate the potential of using TPMS in heat exchange devices and open many prospects for further research.

**Keywords:** TPMS, heat and mass transfer, fins, finite element method, ANSYS

вредных веществ является использование возобновляемых источников энергии (солнечная, ветровая, геотермальная и др.). Однако в настоящее время при доле возобновляемых источников энергии в мировом энергетическом балансе, не превышающей 30 % (20 % в России), более перспективным направлением является разра-

ботка новых эффективных решений в области конструирования теплообменных устройств, рекуперативных систем, катализаторов и т. д.

На сегодняшний день ведется разработка огромного числа технологий, которые позволяют значительно повысить КПД источников и потребителей энергии [1-9]. Это может быть достигнуто путем оптимизации конструкций, использования новых материалов с высокой теплопроводностью, рекуперации тепла из отходящих газов, применения катализаторов для более полного сгорания топлива и обработки отходящих газов и очистки их от загрязняющих веществ, а также внедрения эффективных систем управления процессами сжигания.

Отдельно стоит отметить разнообразие подходов к созданию теплообменных устройств и рекуперативных систем [10–17]. Помимо научных исследований в области совершенствования классических видов теплообменников, таких как пластинчатые, кожухотрубные, «труба в трубе», появляются совершенно новые виды теплообменных устройств, в том числе: микро- и наноканальные теплообменники [18, 19], графеновые теплообменники [20] и др.

Для интенсификации теплообменных процессов в вышеперечисленных устройствах применяется множество методов, к которым относятся оребрение поверхностей, турбулизация потока и др. Создание дополнительного перемешивания потоков и увеличение коэффициента теплопередачи обычно осуществляется за счет продольных или поперечных ребер, расположенных на теплообменных поверхностях. Однако в условиях стремительно развивающегося технологического прогресса с появлением высокоточных 3D-принтеров, позволяющих производить объекты как из пластика, так и из металла, стоит обратить внимание на более сложные и эффективные структуры, такие как трижды периодические минимальные поверхности (TPMS, от англ. triply periodic minimal surface).

TPMS – это поверхности минимальной энергии, которые локально минимизируют свою площадь и повторяются в трех ортогональных направлениях. Одной из особенностей TPMS, позволяющей применять их в различного рода теплообменных устройствах, является способность делить пространство на два или более непересекающихся объема. Кроме того, благодаря своей структуре TPMS обеспечивают высокую прочность конструкций, а также большую суммарную площадь теплообмена при минимальном объеме. Множество работ, посвященных исследованию TPMS, подтверждают данные свойства [21–28]. Так, например, в работе [27] при помощи численного моделирования проводится морфологический анализ для установления связи между геометри-

ческими параметрами TPMS-решеток и характеристиками пористой структуры (сопротивление потоку, теплопередача и прочность). А в статье [28] численно и экспериментально определяются механические свойства TPMS-решеток, изготовленных на 3D-принтере. Авторы показали, что TPMS-материалы обладают превосходными прочностными свойствами по сравнению с другими решетчатыми структурами и могут быть использованы в качестве конструкционных материалов.

В настоящей работе предложена методика расчёта теплообменного устройства с TPMS-наполнением на основе вычислительного эксперимента в ANSYS Fluent. В качестве примера рассматривается участок теплообменника, в котором для интенсификации теплообмена применяются ребра в форме трижды периодической минимальной поверхности Шварца Primitive.

### Методология

На рис. 1 изображен элементарный элемент (элементарная ячейка) исследуемой трижды периодической минимальной поверхности Шварца P, а также решетка, образующаяся в результате копирования (трансляции) ячейки в трех ортогональных направлениях декартовой системы координат.

Множество существующих трижды периодических минимальных поверхностей обладают кубической симметрией. Это означает, что при повороте ячейки на 90 град вокруг любой из осей симметрии, изображенных на рис. 1, наблюдается полное совпадение всех точек исследуемой области.

При рассмотрении элементарной ячейки можно определить два характерных геометрических параметра: толщина стенки ячейки  $\delta$  и размер куба, где размер куба определяется длиной ребра  $a$  элементарной кубической ячейки. Эти параметры влияют на характеристики потока и будут варьироваться в процессе исследования.

Как было сказано ранее, большинство TPMS делят пространство на два или более непересекающихся объема. На рис. 2 представлены внешний и внутренний объемы, на которые делит пространство элементарная ячейка TPMS Шварца P.

В рамках исследования рассматривается задача тепломассопереноса в канале, заполненном пористой структурой, основанной на TPMS Шварца P, которая включает в себя решение основных дифференциальных уравнений: сохранения массы (1), импульса (2) и энергии (3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) + \vec{F}_b, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k\nabla T + (\vec{\tau} \cdot \vec{v})) + S_g, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность;  $t$  – время;  $v$  – скорость;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\vec{F}_b$  – объемная сила;  $E$  – полная энергия единицы массы;  $p$  – давление;  $\vec{\tau}$  – тензор напряжений сдвига;  $S_g$  – источник энергии.

Однако получить аналитическое решение системы уравнений (1) – (3) с учётом сложной

геометрии ячейки Шварца Р крайне сложно. Поэтому для решения задачи используется численный метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS Fluent. Геометрическая модель и краевые условия для численного решения задачи тепломассопереноса в пористой TPMS-среде изображены на рис. 3.

На входе в канал температура жидкости составляет  $T_0 = 300$  К, а начальная скорость по-

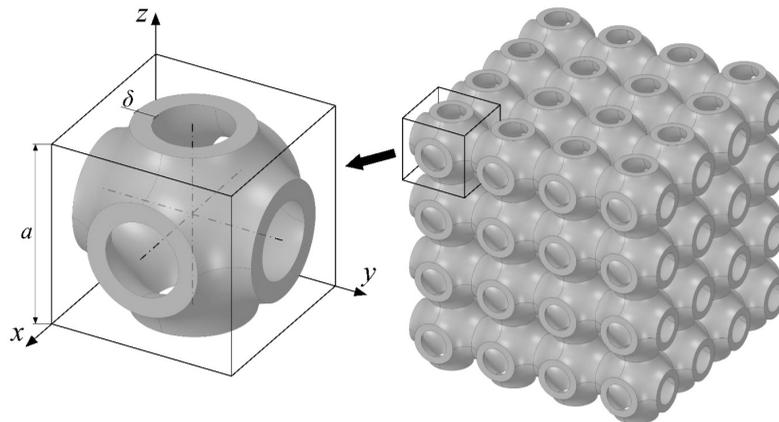


Рис. 1. TPMS Шварца Primitive

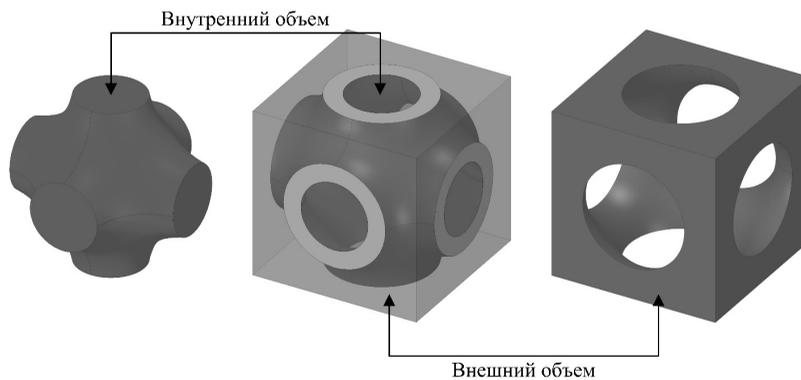


Рис. 2. Разделение пространства TPMS стенкой

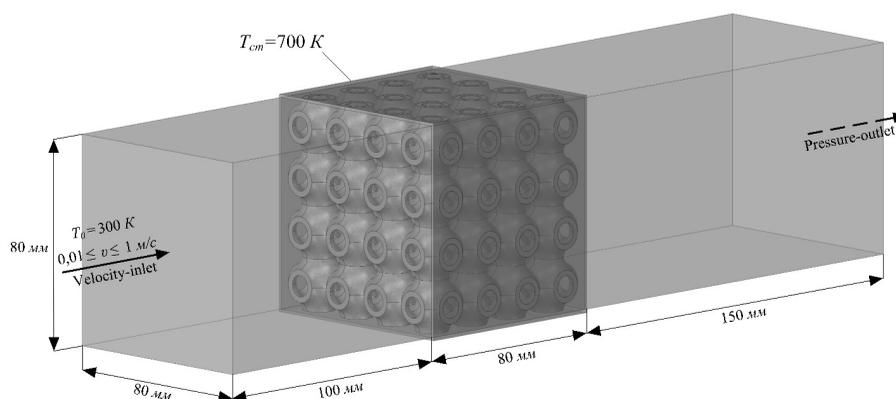


Рис. 3. Схема задачи

тока изменяется в диапазоне от 0,01 до 1 м/с. Свойства жидкости и металла, из которого изготовлен канал и TPMS-решетка, представлены в таблице. Ко всем боковым поверхностям на участке, где расположена пористая TPMS вставка, применяется граничное условие первого рода при температуре стенки  $T_{ст} = 700$  К. Исследование течения жидкости в канале выполняется при двух комбинациях геометрических параметров элементарной ячейки, а именно:  $a = 20$  мм,  $\delta = 1$  мм и  $a =$

20 мм,  $\delta = 2$  мм. Таким образом оценивается влияние толщины стенки ячейки на характеристики потока.

Пространственная сетка для решения задачи методом конечных элементов изображена на рис. 4. При ее построении использовались гексагональные элементы, поскольку они позволяют получить более точное решение и быструю сходимость в рассматриваемой геометрической области по сравнению с тетраэдральной и кубической сеткой.

Свойства исследуемых материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, кг/м·с
Вода	0,6	4182	998,2	0,001003
Алюминий	202,4	871	2719	–

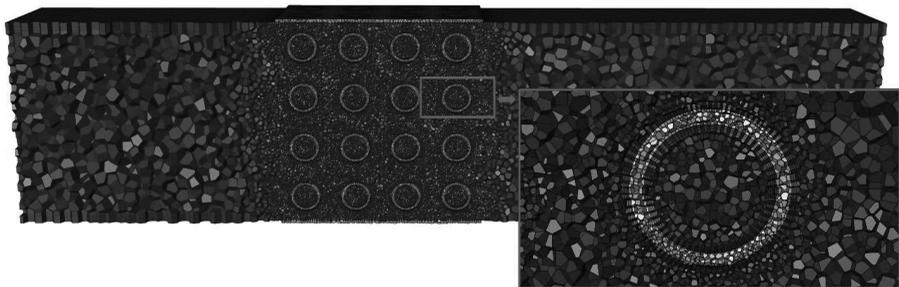


Рис. 4. Сетка

В ходе построения сетки был проведен анализ сеточной сходимости (рис. 5) и определено, что оптимальным является решение на сетке, состоящей из 4 – 4,5 млн. ячеек, поскольку дальнейшее увеличение количества элементов значительного влияния на точность решения не оказывает, но сильно увеличивает длительность и сложность решения.

При численном решении задачи тепломассопереноса в исследуемой пространственной области при помощи метода конечных элемен-

тов в программном комплексе ANSYS был принят ряд допущений:

1. Свойства материалов постоянны и не зависят от температуры.
2. Теплообмен через стенки канала отсутствует.
3. Процесс стационарен, т. е. скорость, давление и другие параметры не изменяются со временем.

Результаты

При анализе результатов численного моделирования тепломассопереноса в канале с квадратным сечением, в котором была размещена вставка в форме трижды периодической минимальной поверхности Шварца Primitive, было обнаружено несколько ключевых гидродинамических и тепловых зависимостей.

Полученные контуры скорости (рис. 6) и температуры (рис. 7) демонстрируют распределение этих параметров по всему каналу. Анализ профилей скорости показывает, что зоны турбулентного течения возникают в областях, непосредственно прилегающих

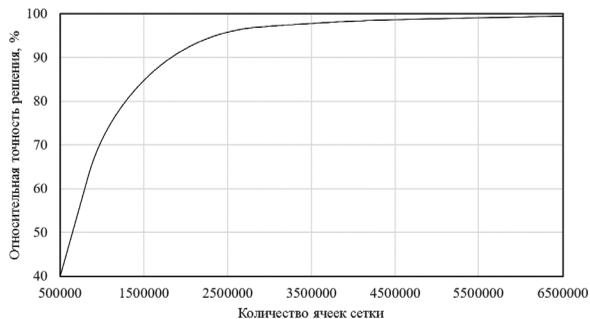


Рис. 5. Сходимость сетки

к TPMS-каркасу, что способствует интенсификации теплообмена.

На основе численного эксперимента получены зависимости потерь давления в канале и температуры воды на выходе из канала от начальной скорости потока (рис. 8).

Полученные графики иллюстрируют, что потери давления увеличиваются с увеличением начальной скорости потока по степенному закону. Рост потерь давления в потоке жидкости обусловлен увеличением трения между жидкостью и стенками канала, а также увеличением внутреннего трения в жидкости. Каркас на основе трижды периодической минимальной поверхности Шварца Р внутри канала приводит к возникновению сложных турбулентных течений, которые приводят к дополнительным потерям давления.

Обнаруженные зависимости соответствуют теоретическим ожиданиям и подтверждают возможность использования TPMS Шварца Р

для интенсификации теплообмена. Полученные результаты позволяют прогнозировать поведение системы при различных начальных скоростях потока, что может быть полезно при проектировании теплообменных систем. Например, в системах масляного охлаждения турбин, в автомобильных теплообменниках, системах теплоснабжения и др.

Полученные результаты могут отличаться в зависимости от конкретных параметров и условий эксперимента, включая материал и геометрию вставки, а также свойства используемой жидкости. Вместо воды в данном канале может протекать любая другая жидкость или газ. Поэтому целью дальнейших исследований в этом направлении будет определение универсальных зависимостей, позволяющих определить гидродинамические и тепловые характеристики потока в зависимости от характерных геометрических параметров и граничных условий.

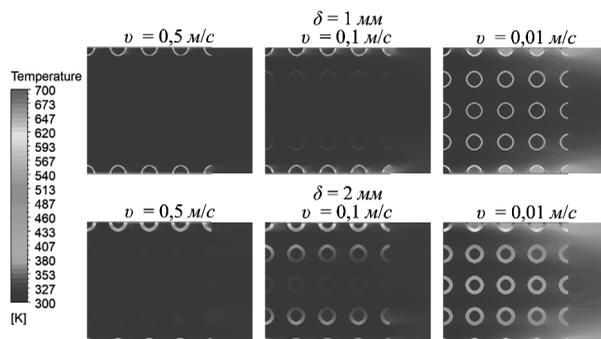


Рис. 6. Контурные распределения температуры

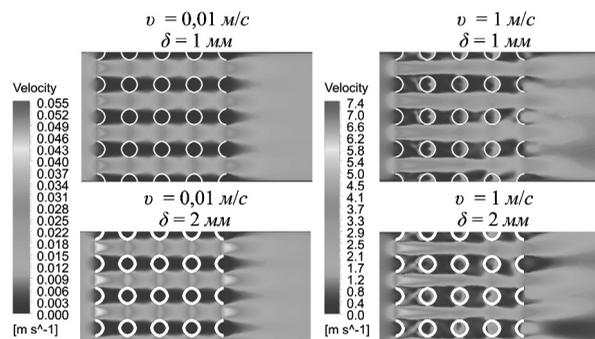


Рис. 7. Контурные распределения скорости

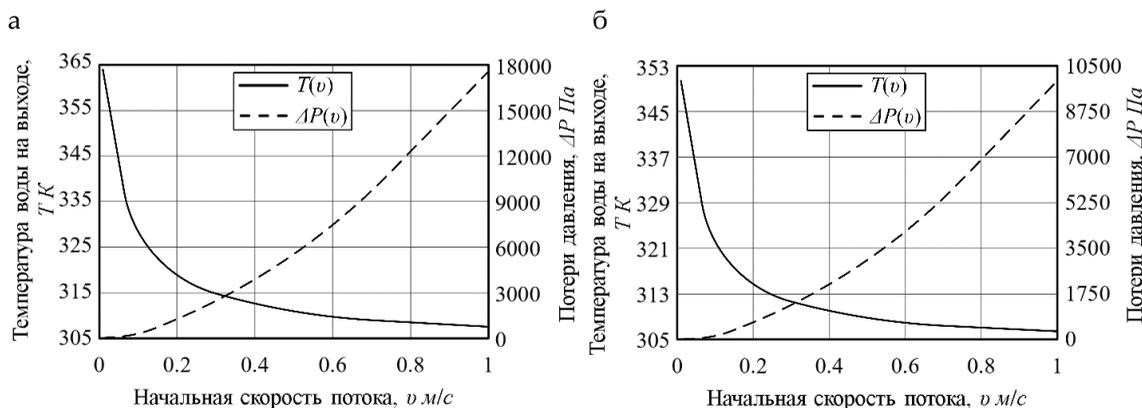


Рис. 8. Графики зависимости температуры и потерь давления от начальной скорости потока: а – при  $a = 20$  мм,  $\delta = 2$  мм; б – при  $a = 20$  мм,  $\delta = 1$  мм

### Заключение

В статье представлена методика определения полей температуры и скорости в канале с TPMS-оребрением на основе вычислительного эксперимента в ANSYS Fluent.

В ходе исследования тепломассопереноса в канале с квадратным сечением, внутри которого расположена вставка из трижды периодических минимальных поверхностей Шварца Primitive, были получены зависимости характеристик потока от геометрических параметров

TPMS-решетки. Показано, что потери давления в канале увеличиваются по степенному закону при увеличении начальной скорости потока, а температура воды на выходе из канала снижается. Это свидетельствует о сложной природе взаимодействия потока с пространственной структурой вставки, что открывает широкие возможности для дальнейших исследований и оптимизации процессов теплопереноса.

Результаты исследования демонстрируют потенциал применения минимальных поверхностей Шварца Primitive в области теплообмена и могут быть использованы для совершенствования конструкции теплообменных устройств. Кроме того, TPMS-решетки, изготовленные из специальных материалов, могут использоваться в качестве каталитических вставок в различных технологических задачах, обеспечивая при этом высокую эффективность при минимальной массе и размерах.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-23-00300, <https://rscf.ru/project/22-23-00300/>*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ngo I.L. et al. A new design of ground heat exchanger with insulation plate for effectively geothermal management // *Geothermics*. 2022. V. 105. P. 102512. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102512
2. Milovanović Z.N., Branković D.L., Milovanović V.Z. J. Efficiency of condensing thermal power plant as a complex system – An algorithm for assessing and improving energy efficiency and reliability during operation and maintenance // *Reliability Modeling in Industry 4.0*. 2023. P. 233–325. DOI: 10.1016/b978-0-323-99204-6.00005-4
3. Wang Y. et al. Thermo-economic analysis of a waste-to-energy assisted carbon capture system for a coal-fired power plant // *Applied Thermal Engineering*. 2023. V. 229. P. 120594. DOI: 10.2139/ssrn.4243447
4. Elgamal A.H., Vahdati M., Shahrestani M. Assessing the economic and energy efficiency for multi-energy virtual power plants in regulated markets: A case study in Egypt // *Sustainable Cities and Society*. 2022. V. 83. P. 103968. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103968
5. Bayramov A.N. Comprehensive assessment of system efficiency and competitiveness of nuclear power plants in combination with hydrogen complex // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.314
6. Aditya L. et al. A review on insulation materials for energy conservation in buildings // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017. V. 73. P. 1352–1365. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.034
7. Cuce P.M., Riffat S. A comprehensive review of heat recovery systems for building applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 47. P. 665–682. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.087
8. De Gracia A., Cabeza L.F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings // *Energy and Buildings*. 2015. V. 103. P. 414–419. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.007
9. Barakat S. et al. Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system // *Energy conversion and management*. 2016. V. 111. P. 137–146. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.060
10. Zohuri B. *Compact heat exchangers*. Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-29835-1
11. Pordanjani A.H. et al. An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy // *Energy Conversion and Management*. 2019. V. 198. P. 111886. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111886
12. Dixit T., Ghosh I. Review of micro- and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 41. P. 1298–1311. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.024
13. Hesselgreaves J.E., Law R., Reay D. *Compact heat exchangers: selection, design and operation*. Butterworth-Heinemann, 2016.
14. Shabgard H. et al. Heat pipe heat exchangers and heat sinks: Opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V. 89. P. 138–158. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.020
15. Okonkwo E.C. et al. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. V. 145. P. 2817–2872. DOI: 10.1007/s10973-020-09760-2
16. Pashchenko D. First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming // *Energy*. 2018. V. 143. P. 478–487. DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.012
17. Pashchenko D. Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit // *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 171. P. 917–924. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.057
18. Huang B. et al. Experimental investigation of the flow and heat transfer performance in micro-channel heat exchangers with cavities // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 159. P. 120075. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120075
19. Ramesh K.N., Sharma T.K., Rao G.A. P. Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: a review // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. V. 28. P. 3135–3165. DOI: 10.1007/s11831-020-09495-1
20. Fares M., Mohammad A.L.M., Mohammed A.L.S. Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. V. 18. P. 100584. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100584
21. Han L., Che S. An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: From biological structures to self-assembled systems // *Advanced Materials*. 2018. V. 30. N. 17. P. 1705708. DOI: 10.1002/adma.201705708

22. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices // *Advanced Engineering Materials*. 2019. V. 21. N. 10. P. 1900524. DOI: 10.1002/adem.201900524
  23. Feng J. et al. Isotropic porous structure design methods based on triply periodic minimal surfaces // *Materials & Design*. 2021. V. 210. P. 110050. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110050
  24. Chen Z. et al. On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties // *Materials & design*. 2019. V. 183. P. 108109. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108109
  25. Abueidda D. W. et al. Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces // *Mechanics of Materials*. 2016. V. 95. P. 102–115. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.01.004
  26. Sychov M.M. et al. Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology // *Acta Astronautica*. 2018. V. 150. P. 81–84. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.034
  27. Cheng Z., Xu R., Jiang P.X. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 170. P. 120902. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120902
  28. Abueidda D.W. et al. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures // *Materials & Design*. 2017. V. 122. P. 255–267. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.018
- ## REFERENCES
1. Ngo I.L. et al. A new design of ground heat exchanger with insulation plate for effectively geothermal management. *Geothermics*. 2022. V. 105. P. 102512. DOI: 10.1016/j.geothermics.2022.102512
  2. Milovanović Z.N., Branković D.L., Milovanović V.Z.J. Efficiency of condensing thermal power plant as a complex system – An algorithm for assessing and improving energy efficiency and reliability during operation and maintenance. *Reliability Modeling in Industry 4.0*. 2023. P. 233–325. DOI: 10.1016/b978-0-323-99204-6.00005-4
  3. Wang Y. et al. Thermo-economic analysis of a waste-to-energy assisted carbon capture system for a coal-fired power plant. *Applied Thermal Engineering*. 2023. V. 229. P. 120594. DOI: 10.2139/ssrn.4243447
  4. Elgamal A.H., Vahdati M., Shahrestani M. Assessing the economic and energy efficiency for multi-energy virtual power plants in regulated markets: A case study in Egypt. *Sustainable Cities and Society*. 2022. V. 83. P. 103968. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103968
  5. Bayramov A.N. Comprehensive assessment of system efficiency and competitiveness of nuclear power plants in combination with hydrogen complex. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.314
  6. Aditya L. et al. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017. V. 73. P. 1352–1365. DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.034
  7. Cuce P.M., Riffat S. A comprehensive review of heat recovery systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 47. P. 665–682. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.087
  8. De Gracia A., Cabeza L.F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*. 2015. V. 103. P. 414–419. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.007
  9. Barakat S. et al. Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system. *Energy conversion and management*. 2016. V. 111. P. 137–146. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.12.060
  10. Zohuri B. *Compact heat exchangers*. Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-29835-1
  11. Pordanjani A.H. et al. An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *Energy Conversion and Management*. 2019. V. 198. P. 111886. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111886
  12. Dixit T., Ghosh I. Review of micro-and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 41. P. 1298–1311. DOI: 10.1016/j.rser.2014.09.024
  13. Hesselgreaves J.E., Law R., Reay D. *Compact heat exchangers: selection, design and operation*. Butterworth-Heinemann. 2016.
  14. Shabgard H. et al. Heat pipe heat exchangers and heat sinks: Opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. V. 89. P. 138–158. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.020
  15. Okonkwo E.C. et al. An updated review of nanofluids in various heat transfer devices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. V. 145. P. 2817–2872. DOI: 10.1007/s10973-020-09760-2
  16. Pashchenko D. First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming. *Energy*. 2018. V. 143. P. 478–487. DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.012
  17. Pashchenko D. Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit. *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 171. P. 917–924. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.057
  18. Huang B. et al. Experimental investigation of the flow and heat transfer performance in micro-channel heat exchangers with cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 159. P. 120075. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120075
  19. Ramesh K.N., Sharma T.K., Rao G.A.P. Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. V. 28. P. 3135–3165. DOI: 10.1007/s11831-020-09495-1
  20. Fares M., Mohammad A.L.M., Mohammed A.L.S. Heat transfer analysis of a shell and tube heat exchanger operated with graphene nanofluids. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. V. 18. P. 100584. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100584

21. Han L., Che S. An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: From biological structures to self-assembled systems. *Advanced Materials*. 2018. V. 30. N. 17. P. 1705708. DOI: 10.1002/adma.201705708
22. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Advanced Engineering Materials*. 2019. V. 21. N. 10. P. 1900524. DOI: 10.1002/adem.201900524
23. Feng J. et al. Isotropic porous structure design methods based on triply periodic minimal surfaces. *Materials & Design*. 2021. V. 210. P. 110050. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110050
24. Chen Z. et al. On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties. *Materials & design*. 2019. V. 183. P. 108109. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108109
25. Abueidda D.W. et al. Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces. *Mechanics of Materials*. 2016. V. 95. P. 102–115. DOI: 10.1016/j.mechmat.2016.01.004
26. Sychov M.M. et al. Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology. *Acta Astronautica*. 2018. V. 150. P. 81–84. DOI: 10.1016/j.actaastro.2017.12.034
27. Cheng Z., Xu R., Jiang P.X. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 170. P. 120902. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120902
28. Abueidda D.W. et al. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*. 2017. V. 122. P. 255–267. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.03.018

Об авторах:

**ПОПОВ Андрей Игоревич**

старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: pixinot@icloud.com

**ЕРЕМИН Антон Владимирович**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: a.v.eremin@list.ru

**КЕЧИН Никита Николаевич**

аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: director@samaraclimat.ru

**POPOV Andrey Ig.**

Senior Lecturer of the Industrial Heat  
Power Engineering Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244  
Email: pixinot@icloud.com

**EREMIN Anton V.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor,  
Head of the Industrial Thermal Power Engineering Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244  
E-mail: a.v.eremin@list.ru

**KECHIN Nikita N.**

Post graduate student of the Industrial Thermal Power  
Engineering Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244  
E-mail: director@samaraclimat.ru

Для цитирования: Попов А.И., Еремин А.В., Кечин Н.Н. Исследование тепломассопереноса в канале с оребрением на основе трижды периодической минимальной поверхности // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 49–56. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.06.

For citation: Popov A.I., Eremin A.V., Kechin N.N. Study of heat and mass transfer in a channel with fins based on a triply periodic minimal surface. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 4, pp. 49–56. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.06.