УДК 66.045.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШВАРЦА PRIMITIVE

♦♦♦♦♦

INVESTIGATION OF A HEAT EXCHANGE DEVICE BASED ON A THRICE PERIODIC MINIMUM SCHWARZ SURFACE PRIMITIVE

Попов Андрей Игоревич
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
popov.ai@samgtu.ru

Брагин Дмитрий Михайлович
аспирант кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
Dimabragin2204@yandex.ru

Зинина Софья Алексеевна
аспирант кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
sofazinina4@gmail.com

Мустафин Равиль Мансурович
старший преподаватель
кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
ravil-bk211@mail.ru

Кечин Никита Николаевич
аспирант кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет

Аннотация. В настоящей статье представлено исследование теплообменного устройства, структура которого основана на трижды периодической минимальной поверхности Шварца P. Трижды периодические минимальные поверхности – это поверхности, которое локально минимизируют площадь для заданной границы, так что средняя кривизна в каждой точке поверхности равна нулю. Трижды периодические минимальные поверхности обладают уникальными свойствами, в том числе, способностью разделять пространство на два непересекающихся лабиринта. Данное свойство позволяет использовать их в рекуперативных теплообменниках. Для создания геометрии теплообменника на основе минимальной поверхности Шварца P в работе использовались программные пакеты Surface Evolver и Space Claim. Численное моделирование теплообмена выполнялось в ANSYS Fluent. Тепловая мощность предлагаемой конструкции сравнивалась с мощностью классического трубчатого теплообменника, обладающего аналогичными массогабаритными характеристиками. В результате серии вычислительных экспериментов были построены контуры температуры и скорости в исследуемом теплообменнике. Выявлено, что особенности формы трижды периодической минимальной поверхности создают области местных сопротивлений, которые способствуют интенсификации теплообмена. Результаты также показывают, что теплообменник на основе трижды периодической минимальной поверхности Шварца P имеет большую тепловую мощность по сравнению с классическим трубчатым теплообменником.

Popov Andrey Igorevich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
popov.ai@samgtu.ru

Bragin Dmitry Mikhailovich
Postgraduate Student of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
Dimabragin2204@yandex.ru

Zinina Sofya Alekseevna
Postgraduate student of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
sofazinina4@gmail.com

Mustafin Ravil Mansurovich
Senior Lecturer at the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
ravil-bk211@mail.ru

Kechin Nikita Nikolaevich
Postgraduate Student of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University

Annotation. This paper presents a study of a heat exchange device which structure is based on Schwarz P triply periodic minimal surface. Triply periodic minimal surfaces are surfaces that locally minimize the area for a given boundary, so that the average curvature at each point of the surface is zero. Triply periodic minimal surfaces have unique properties, including the ability to divide space into two non-intersecting labyrinths. This property allows them to be used in recuperative heat exchangers. To create the geometry of the heat exchanger based on Schwarz P minimal surface, the Surface Evolver and Space Claim software packages were used in the work. Numerical simulation of heat transfer was performed in ANSYS Fluent. The thermal power of the proposed design was compared with the power of a classic tubular heat exchanger with similar mass and size characteristics. As a result of a series of computational experiments, temperature and velocity contours were constructed in the heat exchanger under study. It was found that the shape features of the triply periodic minimal surface create areas of local resistance that contribute to the intensification of heat exchange. The results also show that the heat exchanger based on Schwarz P triply periodic minimal surface has a higher thermal power compared to the classic tubular heat exchanger.

Ключевые слова: минимальная поверхность, теплообмен, ANSYS, перепад давления, контур скорости.

Keywords: minimum surface, heat transfer, ANSYS, pressure drop, velocity contour.

***Благодарность**: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-00317. URL : https://rscf.ru/project/25-79-00317*

Введение

В настоящее время пористые материалы представляют большой интерес в области конструирования различного оборудования в космическом и авиационном машиностроении, энергетике, медицине и т.д.

Вне зависимости от размера пор структура пористых материалов может быть упорядоченная или неупорядоченная. Неупорядоченные пористые материалы характеризуются случайным распределением пор по всему объему тела. Это означает, что поры в таких материалах могут иметь различные размер и форму, не подчиняясь при этом какому-либо порядку.

Пористые материалы с упорядоченной структурой обладают регулярным и организованным характером распределения пор. Это означает, что поры имеют постоянный размер и порядок, следуя определенным геометрическим или кристаллическим шаблонам. Такие материалы чаще всего имеют решетчатую структуру, в которой поры выстроены по определенным направлениям и интервалам. Главным преимуществом пористых материалов с упорядоченной структурой является то, что они проще поддаются точному математическому описанию. Эти материалы часто используются в оптике, фотонике, катализе, сенсорах и других технологических областях, где контроль порядка и размера пор имеет важное значение для достижения конкретных свойств и функциональности.

Отдельно стоит сказать про особый класс пористых материалов с упорядоченной структурой, а именно пористые материалы со структурой, основанной на трижды периодических минимальных поверхностях (ТПМП). ТПМП – это поверхности, которые локально минимизируют площадь для заданной границы, так что средняя кривизна в каждой точке поверхности равна нулю. Эти поверхности обладают уникальными геометрическими характеристиками. Например, минимальная поверхность по своей природе гладкая, не имеет острых краев или углов и делит пространство на две или более непересекающиеся, переплетающиеся и бесконечные области, которые могут периодически повторяться в трех ортогональных направлениях. ТПМП наблюдаются в природе, например, в мыльных пленках [1], блок-сополимерах [2], крыльях бабочек [3, 4], морских ежах [5] и т.д.

Первое упоминание о ТПМП в литературе относится к 1865 году, когда немецкий математик Герман Шварц представил «Примитивную» («Primitive») и «Аламазную» («Diamond») поверхности. Почти столетие спустя несколько других ТПМП были представлены Аланом Шоном. [1] Возможно, одной из самых интересных ТПМП, открытых Шоном, была поверхность типа «Гироид» («Gyroid»), которая интенсивно исследовалась на предмет ее топологических свойств [6] в различных дисциплинах в течение последних двух десятилетий [7–9].

В настоящее время большое внимание трижды периодическим минимальным поверхностям уделяется со стороны таких ученых как Arash Ataee [10], Chung-Fu Cheng [11], Lu Han [12], Oraib Al-Ketan [13, 14], Dong-Wook Lee [15], Lei Zhang [16], Zhilong Cheng [17], Jiho Kim [18]. Очевидно, явным недостатком пористых материалов на основе трижды периодических минимальных поверхностей является сложность в изготовлении. Однако, развитие аддитивных технологий позволяет производить различные объекты со сложной структурой, в том числе материалы с ТПМП топологией. Поэтому столь стремительный интерес к применению таких структур в различных инженерных объектах наблюдается именно в последнее время.

Наиболее разработанными на сегодняшний день являются вопросы, связанные с изучением прочностных характеристик (при сжатии, растяжении, скручивании) пористых материалов на основе ТПМП [7–9]. Wang Z и др. в своем исследовании [7] обнаружили, что пористые структуры, основанные на трижды периодических минимальных поверхностях по прочности, не уступают сотовым панелям при одноосном сжатии. Од-

нако, в отличии от сотовых панелей ТПМП-материалы не ограничены направлением сжатия и могут выдерживать разнонаправленную нагрузку.

Множество исследований подтверждает эффективность применения ТПМП конструкций в различных инженерных задачах. В настоящее время аддитивные технологии позволяют изготавливать сложные макро- и микрорешетчатые структуры, а также устройства на их основе из различных метолов и пластиков. Полезной функцией аддитивного производства является возможность изготовления сложных мультифункциональных конструкций в едином корпусе без дополнительной сборки [19]. В связи с этим перспективным является конструирования компактных теплообменных устройств на основе трижды периодических минимальных поверхностей [20, 21]. Например, в работе Oh S. и др. [21] выполнено численное и экспериментальное исследование теплообменного устройства, в котором разделяющая среды стенка имеет форму ТПМП типа Gyroid. Исследования показывают, что подобная конструкция позволяет увеличить теплопередачу на 70–100 % по сравнению с классическими рекуперативными теплообменниками.

Целью настоящей работы является исследование теплообменного устройства, основанного на ТПМП Шварца P [22–24].

Материалы и методы исследования

Трижды периодическая минимальная поверхность Шварца P представлена на рисунке 1.

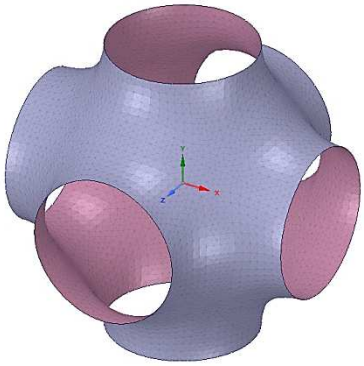


Рисунок 1 – Трижды периодическая минимальная поверхность Шварца P

Данная поверхность была сгенерирована с использованием программы Surface Evolver [25]. Последующее твердотельное моделирование выполнялось в программе Space Claim. При помощи функции утолщения поверхности, изображенной на рисунке 1, придавалась толщина путем построения эквидистант и заполнения пространства между эквидистантами материалом. Далее полученная твердотельная элементарная ячейка транслируется в ортогональных направлениях декартовой система координат, образуя ТПМП-решетку. Схема теплообмена через полученную решетку представлена на рисунке 2.

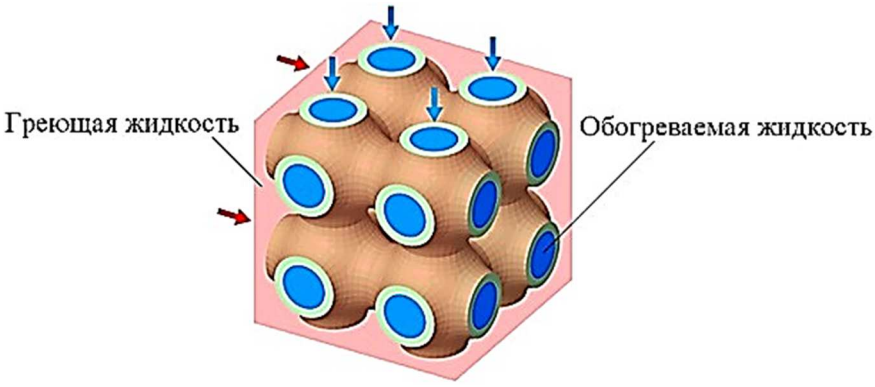


Рисунок 2 – Схема теплообмена

Трижды периодическая минимальная поверхность Шварца P делит пространство на два равных непересекающихся объема, по одному из которых движется греющая среда, а по-другому – нагреваемая. Использование ТПМП в конструкции теплообменных вместо классических трубных пучков позволяет значительно увеличить теплоотдачу и, следовательно, тепловую мощность устройств. В рамках настоящей работы выполнено численное исследование отдельного элемента ТПМП-теплообменника (рис. 2) в ANSYS Fluent.

Расчетная геометрия для элемента теплообменного устройства с ТПМП структурой представлена на рисунке 3. Область, в которой происходит теплопередача, состоит из решетки 3 × 3 × 3 (0.01 × 0.01 × 0.01 м) элементов ТПМП Шварца P. Непосредственно перед и после теплообменной области расположены участки стабилизации потоков длиной 0.03 м.

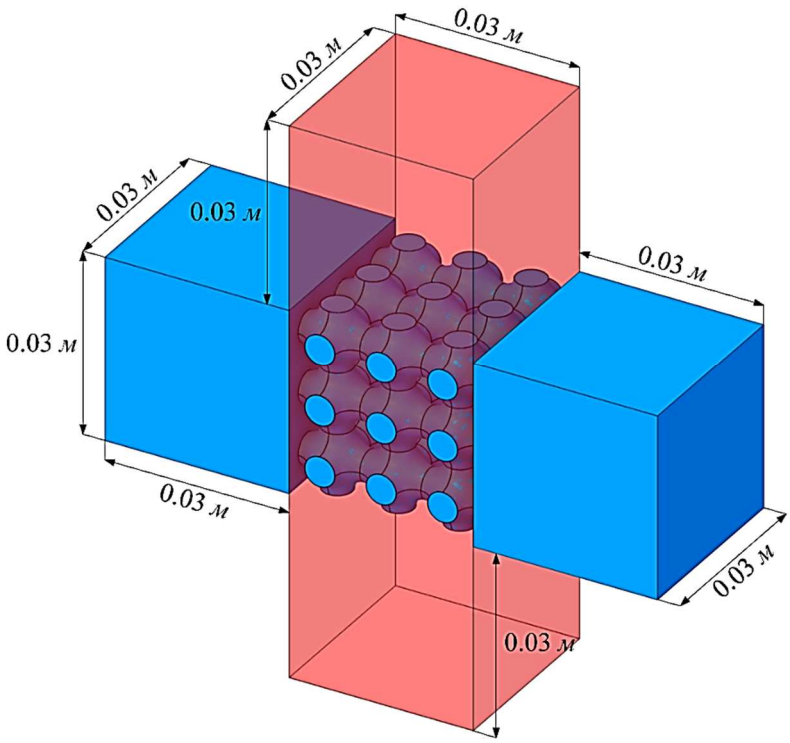


Рисунок 3 – Расчетная модель

Тепловая мощность предлагаемой конструкции сравнивалась с мощностью трубчатого теплообменного устройства, имеющего аналогичные массогабаритные характеристики и расходы рабочих сред. Начальными условиями для потока нагреваемой среды во всех случаях являлись $T_{\text{х}} = 0\ ^{\circ}C$ и $u_0 = 0.1 м/с$. Греющая среда, движущаяся перпендикулярно потоку нагреваемой среды, имеет начальную температуру $T_{\text{г}} = 100\ ^{\circ}C$. Скорость потока греющей среды варьировалась в диапазоне от 0.1 до 1 м/с. Условия для задачи также представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Краевые условия

Краевые условия	Значение
Начальная температура холодной жидкости	0 °C
Начальная температура горячей жидкости	100 °C
Скорость течения холодной жидкости	0.1 м/с
Скорость течения горячей жидкости	0.1 … 1 м/с

Сетка для решения задачи методом конечных элементов в ANSYS Fluent изображена на рисунке 4. Сетка состоит из ≈4 млн элементов. Анализ сеточной сходимости показал, что указанного количества элементов достаточно для получения результатов численного моделирования с погрешностью < 2 %.

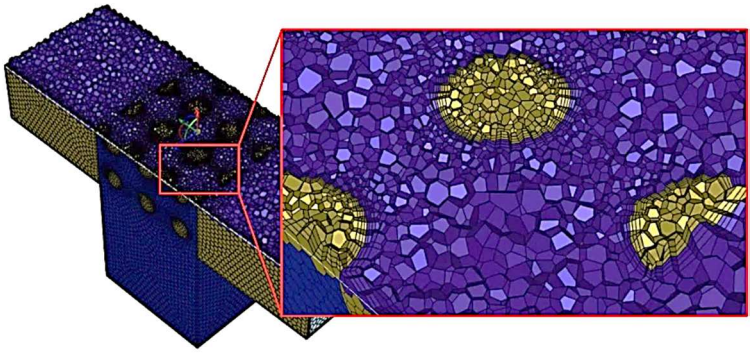
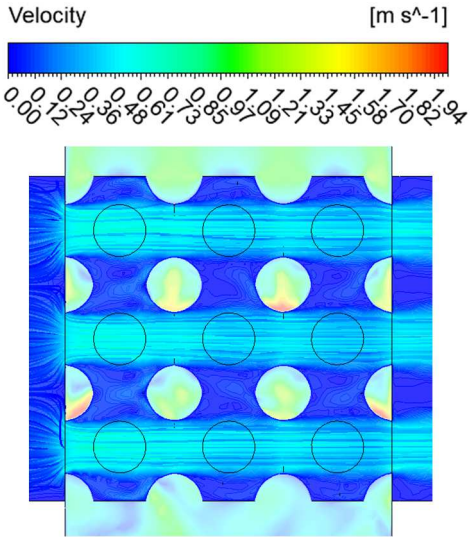


Рисунок 4 – Конечно элементная сетка

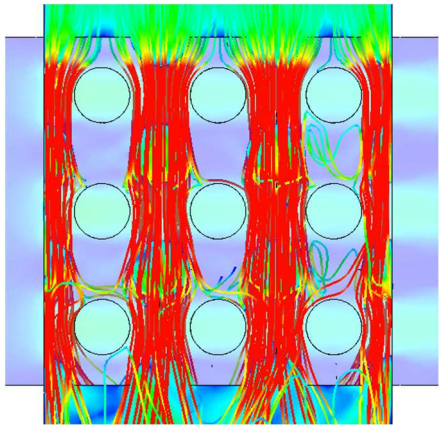
При моделировании течения жидкости в ТПМП-теплообменнике использовалась k – epsilon модель турбулентности.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 5 представлены контуры распределения скорости в элементе теплообменника. Из анализа рисунка 5 можно заключить, что особенности формы трижды периодической минимальной поверхности создают области местных сопротивлений, которые способствуют интенсификации теплообмена.



а)



б)

Рисунок 5 – Контуры скорости:
а) поток обогреваемой среды; б) поток греющей среды

Результаты численного моделирования также позволили построить график зависимости температуры нагреваемой среды и потерь давления от начальной скорости греющей среды (рис. 6). При этом параметры ТПМП-теплообменника сравнивались с параметрами классического трубчатого теплообменника.

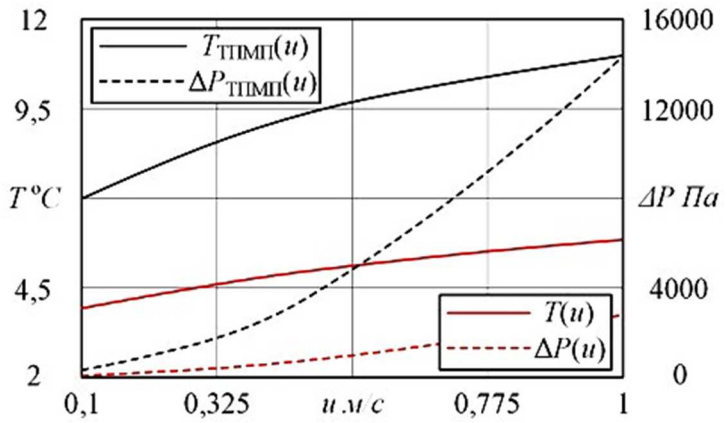


Рисунок 6 – График потерь давления и температуры обогреваемой жидкости от скорости греющей жидкости

Из анализа графика на рисунке 6 можно заключить, что ТПМП-теплообменник обладает большей тепловой мощностью по сравнению с трубчатым теплообменником при тех же массе и габаритах, и том же гидравлическом сопротивлении. Данное преимущество во многом связано с увеличением площади теплообмена, а также с турбулизацией потока, вызванной особенностями геометрии трижды периодических минимальных поверхностей.

Выводы и заключение

В работе проведено исследование элемента теплообменника, конструкция которого основана на трижды периодической минимальной поверхности Шварца Р.

С помощью численного моделирования в ANSYS Fluent получены контуры скорости в рассматриваемой геометрии. Также построены графики зависимости температуры и потерь давления обогреваемой жидкости от начальной скорости греющей жидкости.

Проведено сравнение тепловой мощности ТПМП теплообменника с мощностью классического теплообменного устройства, имеющего аналогичную массу и размеры. Результаты показывают, что ТПМП теплообменник имеет большую тепловую мощность по сравнению с трубчатым теплообменником при тех же массе и размерах, и том же гидравлическом сопротивлении. Это преимущество во многом обусловлено увеличением площади теплообмена, а также турбулизацией потока, вызванной особенностями геометрией трижды периодической минимальной поверхности.

Литература / References

1. Schoen A.H. Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections. – National Aeronautics and Space Administration, 1970. – Vol. 5541.
2. Matsen M.W. Unifying weak-and strong-segregation block copolymer theories / M.W. Matsen, F.S. Bates // Macromolecules. – 1996. – Vol. 29. – № 4. – P. 1091–1098. DOI: https://doi.org/10.1021/ma951138i
3. Characterization of a mechanically tunable gyroid photonic crystal inspired by the butterfly parides sesostris / C. Pouya [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2015. DOI: https://doi.org/10.1002/adom.201500436
4. Michielsen K. Gyroid cuticular structures in butterfly wing scales: biological photonic crystals / K. Michielsen, D.G. Stavenga // Journal of The Royal Society Interface. – 2008. – Vol. 5. – № 18. – P. 85–94. – URL : https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1065
5. Profiting from nature: macroporous copper with superior mechanical properties / M. Lai [et al.] // Chemical communications. – 2007. – № 34. – P. 3547-3549. DOI: https://doi.org/10.1039/B707469G

6. Wu L. Engineering gyroid-structured functional materials via templates discovered in nature and in the lab / L. Wu, W. Zhang, D. Zhang // Small. – 2015. – Vol. 11. – № 38. – P. 5004–5022. DOI: https://doi.org/10.1002/smll.201500812
7. Mechanical behavior and deformation mechanism of triply periodic minimal surface sheet under compressive loading / Z. Wang [et al.] // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2021. – Vol. 28. – № 19. – P. 2057–2069. DOI: https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1829756
8. Elmadih W. et al. Mechanical vibration bandgaps in surface-based lattices //Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 25. – P. 421–429. – URL : https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.011
9. Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study / D.W. Abueidda [et al.] // Materials & Design. – 2019. – Vol. 165. – P. 107597. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107597
10. Ultrahigh-strength titanium gyroid scaffolds manufactured by selective laser melting (SLM) for bone implant applications / A. Ataee [et al.] // Acta Materialia. – 2018. – Vol. 158. – P. 354–368. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.08.005
11. Nanoporous gyroid Ni/NiO/C nanocomposites from block copolymer templates with high capacity and stability for lithium storage / C.F. Cheng [et al.] // Journal of Materials Chemistry A. – 2018. – Vol. 6. – № 28. – P. 13676–13684. DOI: https://doi.org/10.1039/C8TA04077J
12. Han L. An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: from biological structures to self-assembled systems / L. Han, S. Che // Advanced Materials. – 2018. – Vol. 30. – № 17. – P. 1705708. DOI: https://doi.org/10.1002/adma.201705708
13. Al-Ketan O. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices / O. Al-Ketan, R.K. Abu Al-Rub // Advanced Engineering Materials. – 2019. – Vol. 21. – № 10. – P. 1900524. DOI: https://doi.org/10.1002/adem.201900524
14. Al-Ketan O. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials / O. Al-Ketan, R. Rowshan, R.K.A. Al-Rub // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 19. – P. 167–183. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.006
15. Lee D.W. Stiffness and yield strength of architectured foams based on the Schwarz Primitive triply periodic minimal surface / D.W. Lee, K.A. Khan, R.K.A. Al-Rub // International Journal of Plasticity. – 2017. – Vol. 95. – P. 1–20. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.03.005
16. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading / L. Zhang [et al.] // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 23. – P. 505–515. DOI https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.007
17. Cheng Z. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures / Z. Cheng, R. Xu, P.X. Jiang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 170. – P. 120902. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120902
18. Kim J. 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures / J. Kim, D.J. Yoo // Journal of Computational Design and Engineering. – 2020. – Vol. 7. – №. 4. – P. 527–550. DOI: https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa032
19. Yang S. A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing / S. Yang, Y. Tang, Y.F. Zhao // Journal of Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 20. – P. 444–449. DOI https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.024
20. Characterisation of heat transfer within 3D printed TPMS heat exchangers / B.W. Reynolds [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – Vol. 212. – P. 124–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124264
21. Functional morphology change of TPMS structures for design and additive manufacturing of compact heat exchangers / S.H. Oh [et al.] // Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 76. – P. 103778. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103778
22. Bragin D.M. Effective Thermal Conductivity of Porous Material Based on TPMS / D.M. Bragin, A.I. Popov, A.V. Eremin // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2023. – P. 965–968. DOI: https://doi.org/10.1109/SUMMA60232.2023.10349525
23. Experimental Study of Effective Thermal Conductivity of Materials Based on TPMS / D.M. Bragin [et al.] // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2023. – P. 983–985. DOI: https://doi.org/10.1109/SUMMA60232.2023.10349385
24. Popov A.I. Study of Aerodynamic in Porous Materials with Topology of Triply Periodic Minimal Surfaces / A.I. Popov, D.M. Bragin, A.V. Eremin // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2023. – P. 944–948. DOI: https://doi.org/0.1109/SUMMA60232.2023.10349440
25. Brakke K.A. The surface evolver //Experimental mathematics. – 1992. – Vol. 1. – № 2. – P. 141–165. DOI: https://doi.org/10.1080/10586458.1992.10504253