

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2023 Issue: 09 Volume: 125

Published: 26.09.2023 <http://T-Science.org>

Issue

Article



Dmitriy Mihailovich Bragin
Samara State Technical University
Assistant

Andrey Igorevich Popov
Samara State Technical University
Senior Lecturer

Sofya Alekseevna Zinina
Samara State Technical University
Assistant

Anton Vladimirovich Eremin
Samara State Technical University
Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS IN THE WALLS OF A LATTICE BASED ON A SCHWARTZ P TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE

Abstract: In this work, a study of hydrodynamics in the walls of a Schwartz P triply periodic minimal surface was performed. TPMS lattices consisting of 1, 8, and 27 unit cells were chosen as the initial geometry for CFD modeling. The fluid flow problem was solved using the Fluent module of the ANSYS software package. In the course of solving the problem, the vector fields of the velocity distribution were obtained and the pressure losses in the TPMS channels were determined. Based on the analysis of the graph of the dependence of pressure losses on the flow velocity, an analytical dependence was obtained to determine the pressure losses for Schwarz P an elementary cubic cell with a cube edge length $a = 75 \text{ mm}$ and wall thickness $\delta = 5 \text{ mm}$.

Key words: minimal surface, ANSYS, CFD modeling, pressure drop, TPMS.

Language: Russian

Citation: Bragin, D. M., Popov, A. I., Zinina, S. A., & Eremin, A. V. (2023). Investigation of hydrodynamics in the walls of a lattice based on a Schwartz P triply periodic minimal surface. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 09 (125), 326-331.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-09-125-38> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2023.09.125.38>

Scopus ASCC: 2600.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ В СТЕНКАХ РЕШЕТКИ, ОСНОВАННОЙ НА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШВАРЦА P

Аннотация: В работе выполнено исследование гидродинамики в стенках трижды периодической минимальной поверхности Шварца P. В качестве исходной геометрии для CFD-моделирования выбраны TPMS решетки, состоящие из 1, 8 и 27 элементарных ячеек. Решение задачи течения жидкости выполнено при помощи модуля Fluent программного комплекса ANSYS. В ходе решения задачи получены векторные поля распределения скорости и определены потери давления в TPMS каналах. Исходя из анализа графика зависимости потерь давления от начальной скорости потока получена аналитическая зависимость для

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 1.582	РИИЦ (Russia) = 3.939	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.771	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 7.184	OAJI (USA) = 0.350

определения потерь давления для в элементарной кубической ячейке Шварца Р с длиной ребра куба $a = 75$ мм и толщиной стенки $\delta = 5$ мм.

Ключевые слова: минимальная поверхность, ANSYS, CFD-моделирование, потери давления, TPMS.

Введение

УДК 532.5

Во множестве современных двигателей [1,2], холодильников [3], турбин [4] и других агрегатов [5,6] высокое тепловыделение является серьезной проблемой, которую необходимо решать. Недостаточный отвод тепла может привести к перегреву и повреждению компонентов, что может снизить эффективность и даже привести к поломке механизма [7].

Для эффективного отвода тепла применяются различные методы, одним из которых является использование тонких каналов для охлаждающей жидкости. Этот метод заключается в прохождении охлаждающей жидкости через узкие каналы, расположенные непосредственно внутри компонентов, выделяющих большое количество тепла. При прохождении жидкости через тонкие каналы происходит интенсивное охлаждение поверхностей компонентов и отвод тепла в окружающую среду.

В рамках данной работы в качестве архитектуры для охлаждающих каналов предлагается использовать трижды периодическую минимальную поверхность (TPMS, от англ. triply periodic minimal surface) Шварца Р.

Изучению свойств TPMS посвящено большое количество статей [8-20]. Главным преимуществом TPMS конструкций считается их высокая прочность, что подтверждается рядом

работ [8-11]. Также TPMS конструкции зарекомендовали себя в качестве биологических тканей и протезов [11,12]. Изучению гидравлических процессов, протекающих в объеме, ограниченном TPMS решеткой, посвящены работы [13-17]. Особенность TPMS делить пространство на два непересекающихся объема/лабиринта позволяет создавать рекуперативные теплообменники [18-20]. А высокая пористость материалов на основе TPMS позволяет использовать структуру в качестве теплоизоляционного материала [21,22].

Однако, процесс протекания жидкости через стенки/решетку TPMS структур остается малоизученным. В настоящей статье выполнено исследование гидродинамических характеристик каналов с TPMS архитектурой при помощи численного моделирования в программном комплексе ANSYS в модуле Fluent.

Теоретическая часть

На рис. 1 представлена TPMS Шварца Р. Создание архитектуры TPMS Шварца Р, в первую очередь, осуществлялось в программе Surface Evolver [23,24], основанной на граничном методе генерации. При помощи функций итеративного уточнения исходной поверхности, определяемой ее границами, с учетом геометрических ограничений было получено облако точек, точно описывающее топологию TPMS структуры. Для получения фасетированной поверхности из облака точек применялся программный комплекс SolidWorks.

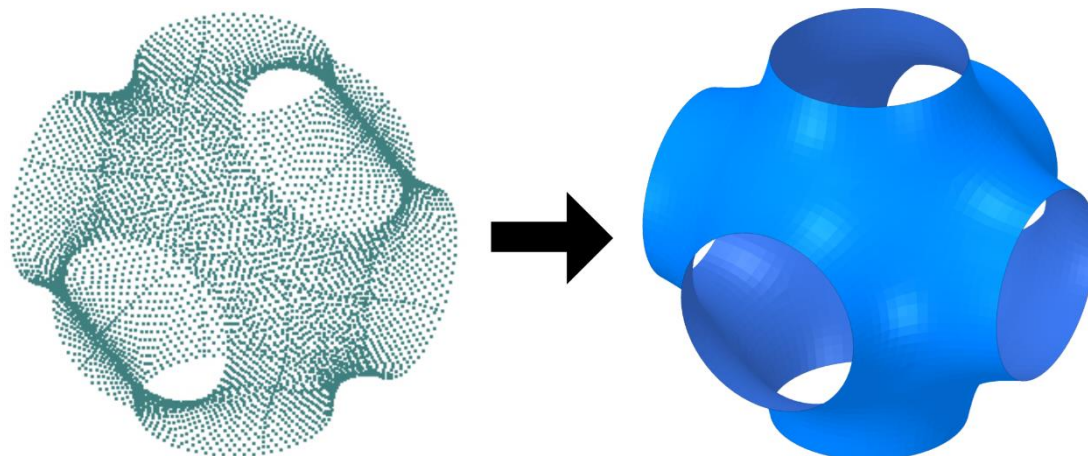


Рисунок 1. Трижды периодическая минимальная поверхность Шварца Р.

Дальнейшая обработка геометрии проводилась во встроенном в ANSYS редакторе

Space Claim. При помощи функции Thickness поверхности придается толщина δ . Стоит

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

отметить, что элементарная ячейка TPMS Шварца Р обладает кубической симметрией и вписывается в куб с длиной ребра a (рис. 2).

Для исследования были построены геометрии, состоящие из 1, 8 ($2 \times 2 \times 2$) и 27 ($3 \times 3 \times 3$) элементарных кубических ячеек. Характерны

геометрические размеры для всех указанных на рис. 2 элементарных ячеек одинаковые: $a = 75 \text{ мм}$ и $\delta = 5 \text{ мм}$.

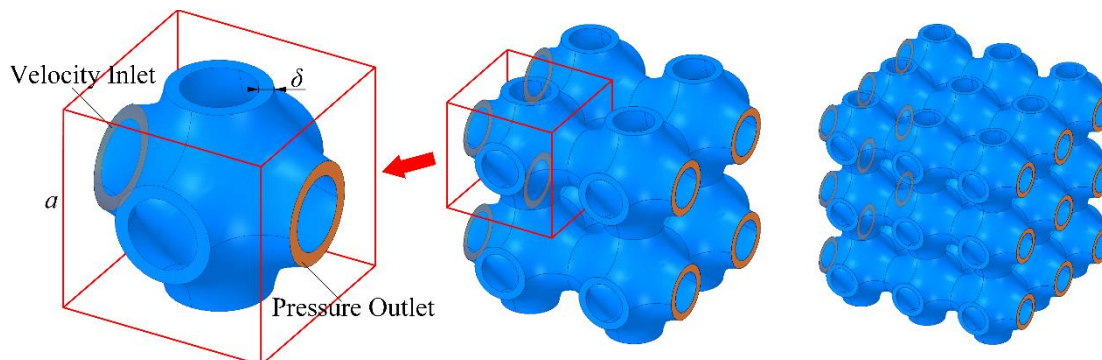


Рисунок 2. Расчетная геометрия, состоящая из 1, 8 и 27 ячеек.

В качестве рабочего тела в исследовании выбрана вода с плотностью $\rho = 998,2 \text{ Кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\eta = 0.001003 \text{ Кг/м}\cdot\text{с}$. Вход и выход для жидкости также отмечены на рис. 2. Исследование гидродинамики одной ячейки было выполнено при скоростях потока на входе в канал $1 \leq v \leq 10 \text{ м/с}$ и при скорости 1 м/с для 8 и 27 ячеек.

Сетка для численного моделирования методом конечных элементов в модуле Fluent для 1, 8 и 27 ячеек изображена на рис. 3. В результате определения сеточной сходимости (рис. 4) было выявлено, что сетка, состоящая из 4500000 элементов пригодна для получения результатов с точностью до 98%.

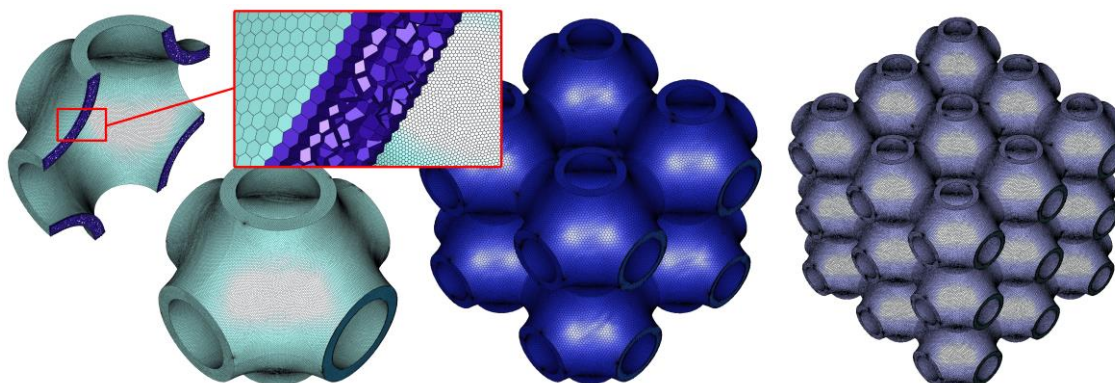


Рисунок 3. Конечно-элементная сетка.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 1.582	РИИЦ (Russia) = 3.939	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.771	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 7.184	OAJI (USA) = 0.350

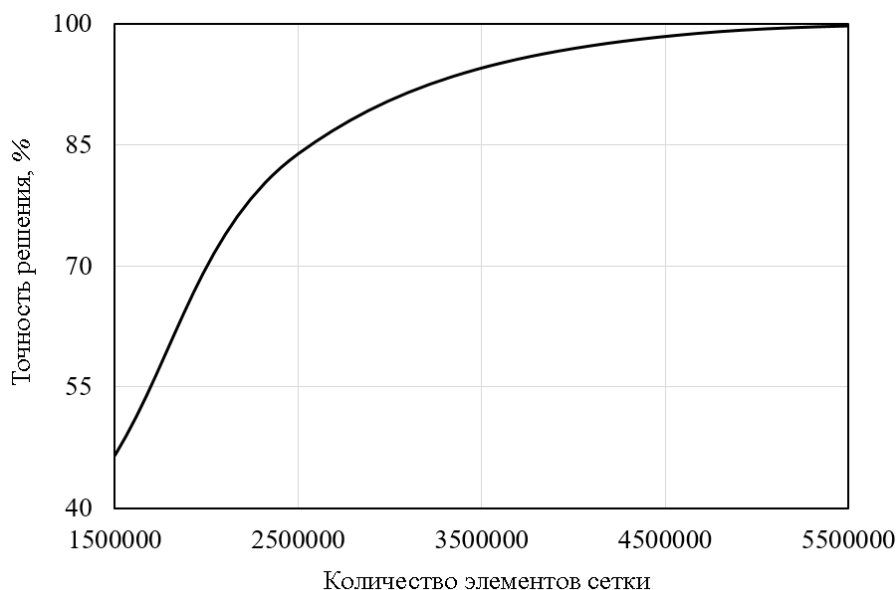


Рисунок 4. График сходимости сетки.

Результаты

В результате компьютерного моделирования гидродинамики в стенках TPMS были получены векторные поля скоростей и потери давления. Исходя из анализа рис. 5 можно выделить области с наибольшими и наименьшими, скоростями потока, отмеченные красными и синим зонами соответственно.

Для одной ячейки было выполнено измерение падения давления при различных начальных скоростях потока.

На графике на рис. 6 изображена зависимость потерь давления в TPMS ячейке Шварца Р от начальной скорости потока, которая может быть аппроксимирована степенной функцией:

$$\Delta P = 324,63v^{2,0597}$$

Исходя из анализа полученных результатов можно заключить о теоретической возможности использования стенок TPMS Шварца Р в качестве

каналов для охлаждающей жидкости в механизмах с большим тепловыделением. Помпа в автомобильном двигателе способна создавать давление от 150 до 200 кПа в системе охлаждения, чего достаточно для циркуляции жидкости через каналы TPMS решеток при скорости потока $1 < v < 2$ м/с.

Заключение

В ходе работы было выполнено компьютерное моделирование течения жидкости через стенки TPMS решетки Шварца Р. Определены зоны, в которых поток воды достигает максимальную и минимальную скорость. Получена зависимость падения давления в одной ячейке TPMS Шварца Р при различных начальных скоростях потока.

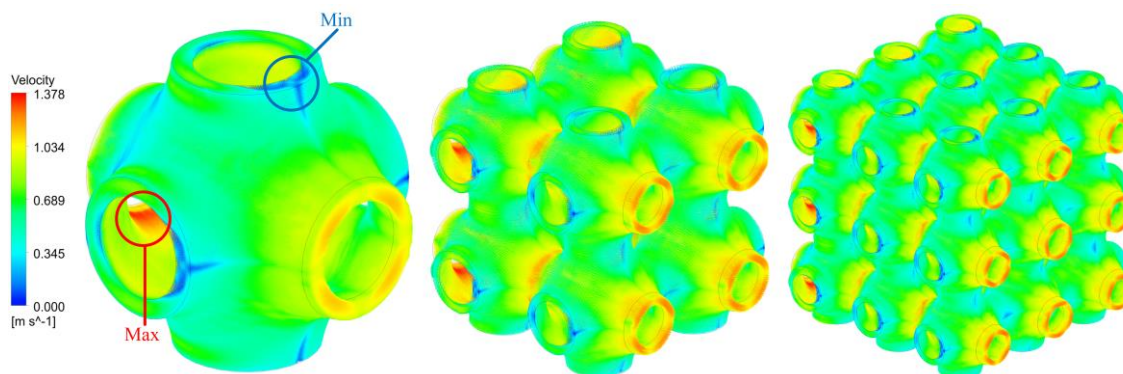


Рисунок 5. Векторное поле распределения скоростей.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 1.582	ПИИЦ (Russia) = 3.939	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.771	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 7.184	OAJI (USA) = 0.350

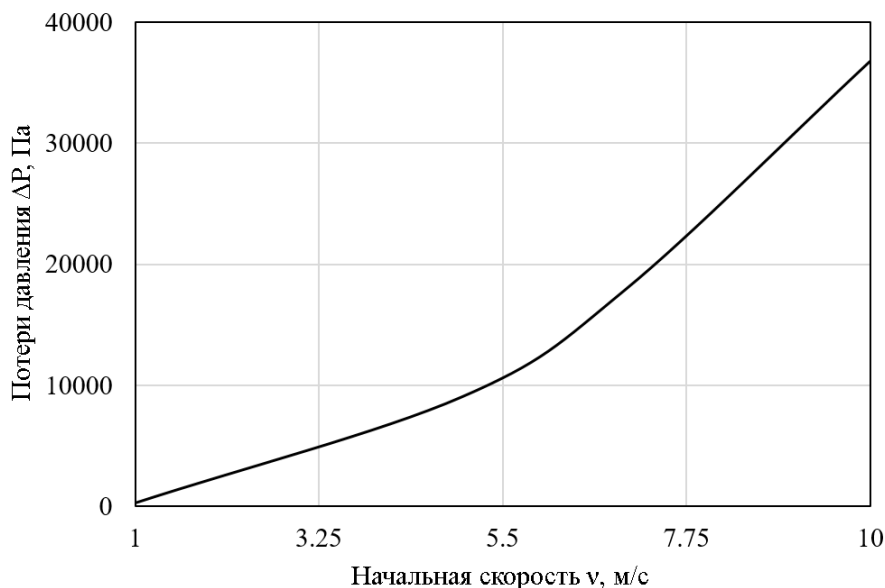


Рисунок 6. График зависимости потерь давления от начальной скорости потока.

Полученные результаты справедливы исключительно для ячейки, которая вписана в куб с длиной ребра $a = 75$ мм и толщиной стенки $\delta = 5$ мм. Для получения обобщенных результатов и универсальных зависимостей необходимо более детальное изучение TPMS решеток при различных геометрических параметрах. Однако, результаты настоящего исследования показывают возможность применения TPMS решеток в качестве каналов для охлаждающей жидкости во множестве агрегатов с высоким тепловыделением, поскольку современные автомобильные и другие помпы способны создавать достаточно высокое давление

в системе охлаждения для циркуляции жидкости через каналы с TPMS структурой.

Для учета теплообменных свойств совместно с массопереносом необходимо подключать уравнение энергии в решателе Fluent. Решение совмещенной задачи тепломассопереноса в стенках TPMS Шварца Р будет являться целью дальнейших исследований.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10044, <https://rscf.ru/project/23-79-10044/>

References:

1. Schroder, H. J., & Power, G. G. (1997). Engine and radiator: fetal and placental interactions for heat dissipation. *Experimental Physiology: Translation and Integration*, 1997, Т. 82, №. 2, pp. 403-414.
2. Abiuso, P., & Perarnau-Llobet, M. (2020). Optimal cycles for low-dissipation heat engines. *Physical review letters*, 2020, Т. 124, №. 11, p. 110606.
3. Manzano, G., et al. (2019). Boosting the performance of small autonomous refrigerators via common environmental effects. *New Journal of Physics*, 2019, Т. 21, №. 1, p. 123026.
4. Salem, A. R., et al. (2021). Experimental and numerical study of jet impingement cooling for improved gas turbine blade internal cooling with in-line and staggered nozzle arrays. *Journal of Energy Resources Technology*, Т. 143, №.1.
5. Hua, J., et al. (2021). Influence of pre-chamber structure and injection parameters on engine performance and combustion characteristics in a turbulent jet ignition (TJI) engine. *Fuel*, 2021, Т. 283, p. 119236.
6. Khan, M., et al. (2021). Study of engine-oil based CNT nanofluid flow on a rotating cylinder with viscous dissipation. *Physica Scripta*, 2021, Т. 96, №. 7, p. 075005.
7. Gonzalez-Ayala, J., et al. (2020). Energetic self-optimization induced by stability in low-

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИИ (Russia) = 3.939
ESJI (KZ) = 8.771
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

- dissipation heat engines. *Physical review letters*, 2020, T. 124, №. 5, p. 050603.
8. Novak, N., et al. (2021). Development of novel hybrid TPMS cellular lattices and their mechanical characterisation. *Journal of materials research and technology*, 2021, T. 15, pp. 1318-1329.
 9. Gao, T., et al. (2022). Elastic mechanical property hybridization of configuration-varying TPMS with geometric continuity. *Materials & Design*, 2022, T. 221, p. 110995.
 10. Fu, J., et al. (2022). Isotropic design and mechanical characterization of TPMS-based hollow cellular structures. *Composite Structures*, 2022, T. 279, p. 114818.
 11. Al-Ketan, O., et al. (2020). Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 2020, T.102, p. 103520.
 12. Zhu, L., et al. (2019). Design and biomechanical characteristics of porous meniscal implant structures using triply periodic minimal surfaces. *Journal of Translational Medicine*, 2019, T. 17, №. 1, pp. 1-10.
 13. Eremin, A. V., et al. (2021). *Numerical Study of Hydrodynamic Characteristics of Porous Material Based on Schwarz P Surface*. 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE, 2021, pp. 1030-1032.
 14. Clarke, D. A., et al. (2021). Investigation of flow through triply periodic minimal surface-structured porous media using MRI and CFD. *Chemical Engineering Science*, 2021, T. 231, p. 116264.
 15. Bragin, D. M., et al. (2022). Vektornoe raspredelenie skorosti v elementarnoj yachejke poverhnosti Shena I-WP. *Ural'skij nauchnyj vestnik Uchrediteli: Tovarishchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu Uralnauchkniga*, 2022, T. 3, №. 1, pp. 66-72.
 16. Popov, A. I., et al. (2021). Verteilung des vektorgeschwindigkeitsfeldes von der außenseite der elementzelle der Schwartzoberfläche typ P. *Problemy nauchnoj mysli*, 2021, T. 9, №. 1, pp. 71-77.
 17. Bragin, D.M., Popov, A.I., Zinina, S.A., & Leonov, S.S. (2021). Raspredelenie vektornogo polya skorosti vnutri elementarnoj yachejki poverhnosti Shvarca tipa P. *Naukosfera*, 2021, № 7-2, pp. 253-256.
 18. Li, W., Li, W., & Yu, Z. (2022). Heat transfer enhancement of water-cooled triply periodic minimal surface heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2022, T. 217, p. 119198.
 19. Dharmalingam, L. K. (2022). *Review of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) based Heat Exchanger Designs*, 2022.
 20. Li, W., Yu, G., & Yu, Z. (2020). Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO2 cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2020, T. 179, p. 115686.
 21. Popov, A. I., et al. (2022). Opređenje effektivnogo koefficienta teploprovodnosti poristogo materiala s uporyadochennoj strukturoj, osnovannoj na TPMP I-WP. *Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyh tekhnologij i energoeffektivnosti*, 2022, T. 7, № 3(25) ch.1, pp. 61-67.
 22. Bragin, D. M., Zinina, S.A., & Eremin, A.V. (2021). Issledovanie teploizolyacionnyh svojstv kompozicionnogo materiala s strukturoj TPMP. *Naukosfera*, 2021, № 11-2, pp. 120-124.
 23. Brakke, K. A. (1992). The surface evolver. *Experimental mathematics*, 1992, T. 1, №. 2, pp. 141-165.
 24. Brakke, K. A. (1994). Surface evolver manual. *Mathematics Department, Susquehanna Univerisity, Selinsgrove, PA*, 1994, T. 17870, №. 2.24, p. 20.