

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

SOI: [1.1/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS) DOI: [10.15863/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS)

International Scientific Journal
Theoretical & Applied Science

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

Year: 2023 Issue: 04 Volume: 120

Published: 28.04.2023 <http://T-Science.org>

Issue

Article



Andrey Igorevich Popov
Samara State Technical University
research assistant

Dmitriy Mihailovich Bragin
Samara State Technical University
assistant

Sofya Alekseevna Zinina
Samara State Technical University
assistant

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

THERMAL CONDUCTIVITY OF A POROUS MATERIAL WITH AN ORDERED STRUCTURE BASED ON A SCHWARZ P TRIPLE PERIODIC MINIMAL SURFACE, TAKING INTO ACCOUNT THERMAL CONDUCTIVITY OF AIR

Abstract: The paper studies the heat-conducting properties of a porous material with an ordered structure, based on Schwarz P TPMS, taking into account the thermal conductivity of air in the interpore space. Thermal conductivity was studied for a TPMS material made of aluminum. The problem of thermal conductivity was solved by the finite element method in the Steady-State Thermal module of the ANSYS software package. The obtained results demonstrate that the thermal conductivity of the TPMS material with air is higher by 1.1% than the thermal conductivity of the lattice without air. The dependences obtained during the study will make it possible to predict the thermal conductivity of a TPMS material for applications in a variety of engineering problems.

Key words: thermal conductivity, air, TPMS, ANSYS, finite element method.

Language: Russian

Citation: Popov, A. I., Bragin, D. M., Zinina, S. A., & Eremin, A. V. (2023). Thermal conductivity of a porous material with an ordered structure based on a Schwarz P triple periodic minimal surface, taking into account thermal conductivity of air. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 04 (120), 301-307.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-04-120-56> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2023.04.120.56>

Scopus ASCC: 2200.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА С УПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРОЙ, ОСНОВАННОЙ НА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ШВАРЦА Р, С УЧЕТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

Аннотация: В работе проводится исследование теплопроводящих свойств пористого материала с упорядоченной структурой, основанной на TPMS Шварца Р, с учётом теплопроводности воздуха в межпоревом пространстве. Теплопроводность изучалась для TPMS-материала из алюминия. Задача теплопроводности

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

решалась методом конечных элементов в модуле *Steady-State Thermal* программного комплекса ANSYS. Полученные результаты демонстрируют, что теплопроводность TPMS-материала с учетом воздуха выше на 1,1% теплопроводности решетки без воздуха. Полученные в ходе исследования зависимости позволяют прогнозировать теплопроводность TPMS-материала для прикладного применения во множестве инженерных задач.

Ключевые слова: теплопроводность, воздух, TPMS, ANSYS, метод конечных элементов.

Введение

УДК 536.2

Разработка материалов с прогнозируемыми теплофизическими свойствами является важной задачей для многих областей науки и техники, таких как энергетика [1-3], машиностроение [4,5], электротехника [6,7], аэрокосмическая промышленность [8], строительство [9,10] и т.д.

Одним из наиболее важных теплофизических свойств материалов является теплопроводность – способность материала передавать тепло. Прогнозирование теплопроводности материала играет важную роль в решении множества инженерных задач, связанных с конструированием систем охлаждения, проектированием зданий и сооружений, разработкой теплообменных устройств и многого другого [1-3,11].

Задача разработки материалов с прогнозируемыми свойствами решается на макро- и микроуровне. На микроуровне разработка новых материалов может включать создание структурных материалов на основе наночастиц, полимерных нанокомпозитов или композитов с наночастицами металлов [12]. Эти материалы могут иметь уникальные свойства, такие как: высокая термостойкость, устойчивость к износу, высокая проводимость и т.д. На макроуровне новые материалы могут быть разработаны путем

комбинирования различных материалов [13], таких как стекловолокно, углеродное волокно или полимерные материалы, а также путем конструирования упорядоченных и неупорядоченных решеток, для получения пористых структур.

Наибольший интерес как для прикладных, так и для научных задач представляют пористые материалы с упорядоченной структурой, поскольку моделирование таких материалов значительно упрощается с использованием различных численных [14] и аналитических методов [15].

Среди упорядоченных структур особого внимания заслуживают трижды периодические минимальные поверхности (TPMS от англ. triply periodic minimal surfaces). TPMS состоят из двух отдельных непересекающихся объемов, разделенных стенкой имеющей минимально возможную площадь при заданных ограничениях. TPMS делит трехмерное (3D) пространство на два взаимопроницающих канала для создания большого отношения площади поверхности к объему. TPMS встречаются в природе, например, в биологических мембранах, горных кристаллах и сополимерных фазах в качестве межматериальных разделительных поверхностей. На рисунке 1 изображена TPMS Шварца Р, являющаяся объектом данного исследования.

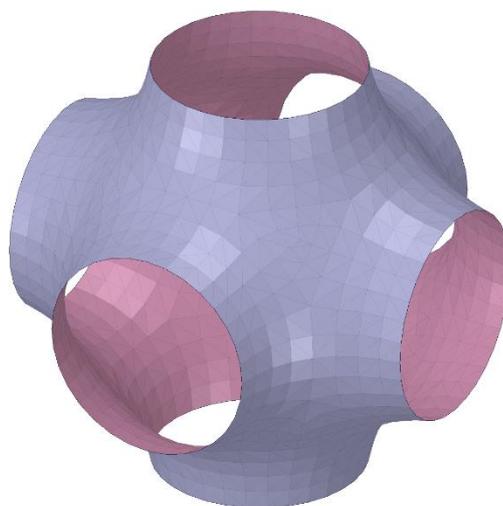


Рисунок 1. TPMS Шварца Р.

Трижды периодические минимальные поверхности можно точно описать при помощи

Impact Factor:

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

SIS (USA) = 0.912
 ПИНЦ (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

тригонометрических функций вида $f(x, y, z) = c$. Для описания TPMS Шварца Р применяется следующая функция:

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0. \quad (1)$$

Важно отметить, что обладающие высокой прочностью TPMS-материалы находят широкое распространение в сферах медицины [16-19], машиностроения [20], конструирования различного оборудования [21], шумоизоляции [22] аэрокосмической отрасли [23,24] и т.д. На сегодняшний день существует большое количество исследований, посвященных изучению свойств TPMS [24-31]. Однако, малоизученным является влияние воздуха, заполняющего полости внутри

TPMS решетки, на теплопроводность TPMS-материалов.

В рамках данной работы проводится исследование теплопроводности TPMS-материала, решетка которого основана на TPMS Шварца Р с учётом теплопроводности воздуха, заполняющего полости внутри TPMS решетки.

Теоретическая часть

Исследуемая TPMS Шварца Р обладает кубической симметрией [32]. В связи с этим пористый материал с TPMS топологией будет состоять из идентичных и последовательно соединенных в направлениях осей OX, OY, OZ элементарных ячеек (рис. 2).

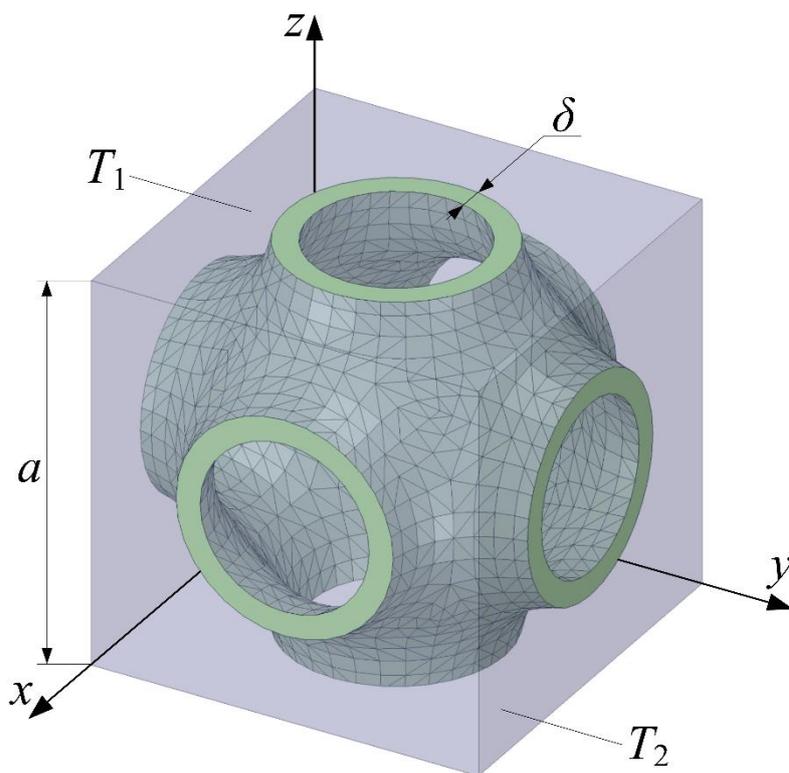


Рисунок 2. Геометрия элементарной ячейки TPMS Шварца Р

Изображенная на рисунке 2 элементарная ячейка обладает двумя характерными геометрическими параметрами: a – длина ребра куба; δ – толщина стенки TPMS.

Согласно закону Фурье, теплопроводность в рассматриваемой геометрии определяется следующим образом

$$\lambda = \frac{qa}{\Delta TS}, \quad (2)$$

На гранях куба накладываются граничные условия первого рода $T_1 = 0^\circ\text{C}$ и $T_2 = 100^\circ\text{C}$.

Учитывая граничные условия и $S = a^2$ выражения (2) примет вид:

$$\lambda = \frac{q}{(T_2 - T_1)a}. \quad (3)$$

Для определения теплопроводности ячейки по формуле (3) необходимо знать значение теплового потока q . Данное значение определялось с использованием численного решения данной задачи в модуле Steady-State Thermal программного комплекса ANSYS.

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

Сетка для решения задачи методом конечных элементов изображена на рис. 3 и состоит из 1,5 млн. элементов.

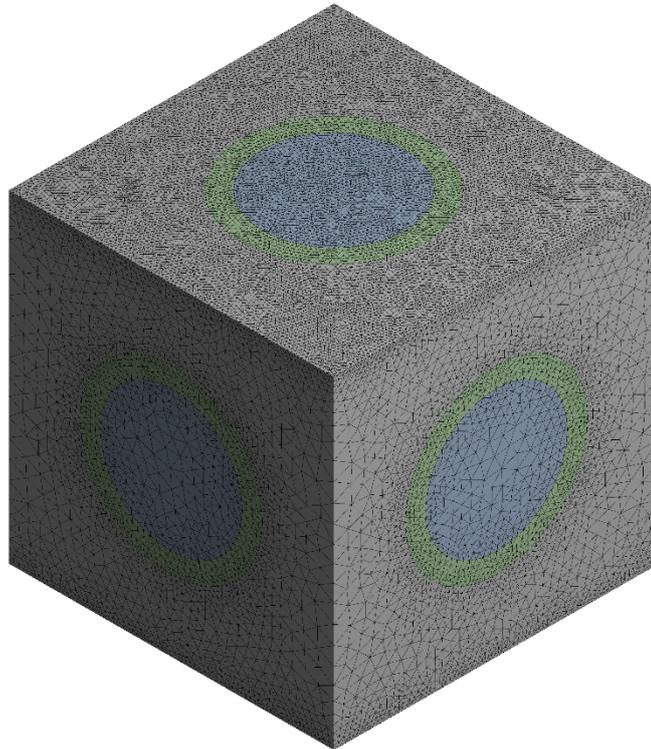


Рисунок 3. Сетка для решения задачи методом конечных элементов

В качестве исходных материалов были выбраны алюминий с теплопроводностью 202,4 $Вт/м^{\circ}С$ и воздух – 0,0242 $Вт/м^{\circ}С$.

При решении задачи теплопроводности в элементарной ячейке были приняты следующие допущения:

1. На всех гранях куба, где не действует ГУ 1 рода, теплообмен отсутствует.
2. Теплообмен конвекцией и излучением отсутствует.

Результаты

При решении задачи теплопроводности в TPMS-материале при помощи модуля Steady-State Thermal программного комплекса ANSYS были получены значения теплового потока q в сечении элементарной ячейки при различных геометрических параметрах. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Длина ребра куба a , м	Толщина стенки ячейки δ , м	Плотность теплового потока q , $Вт/м^2$
0,01	0,0004	137570
0,01	0,0006	212430

При помощи формулы (3) была определена теплопроводность элементарной ячейки Шварца Р при различных геометрических параметрах.

Результаты расчета изображены на графике на рис. 4.

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

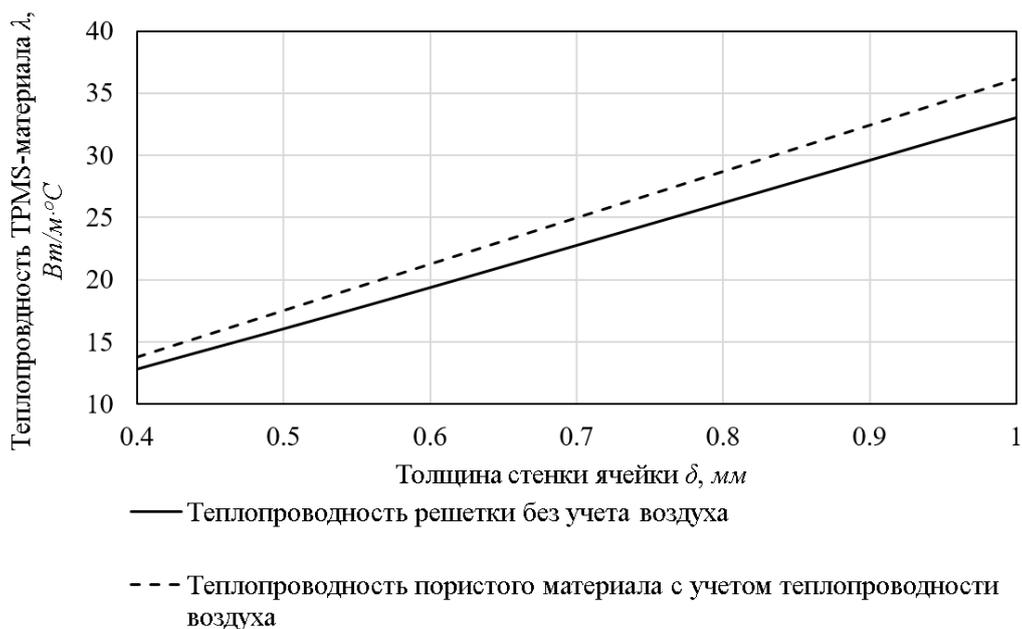


Рисунок 4. График зависимости теплопроводности TPMS-материала от толщины стенки ячейки

Из графика видно, что зависимость теплопроводности от толщины ячейки имеет линейный характер при неизменной длине ребра куба. Теплопроводность пористого материала с учетом теплопроводности воздуха приблизительно на 1,1% выше теплопроводности решетки без воздуха.

Заключение

В настоящем исследовании был изучен пористый материал с упорядоченной структурой, основанной на TPMS Шварца Р. В ходе работы оценивалось влияние воздуха на теплопроводность TPMS решетки изготовленной

из алюминия. Был получен график зависимости теплопроводности TPMS-материала от толщины стенки ячейки, которая изменялась в диапазоне $0.4 < \delta < 1$ мм при постоянной длине ребра куба $a = 10$ мм. Из анализа полученных зависимостей можно заключить, что теплопроводность оказывает незначительное влияние (приблизительно 1%) на TPMS решетку, изготовленную из алюминия. Однако очевидно, что при исследовании влияния воздуха необходимо также учитывать конвективный перенос тепла в межпоровом пространстве, что будет являться целью дальнейших исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00047, <https://rscf.ru/project/21-79-00047/>.

References:

1. Du, C., et al. (2023). Predicting Effective Thermal Conductivity of Sintered Silver by Microstructural-Simulation-Based Machine Learning. *Journal of Electronic Materials*, 2023, pp. 1-12.
2. Luo, Y., et al. (2022). Accurate prediction on the lattice thermal conductivities of monolayer systems by a high-throughput descriptor. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, Т. 56, №. 4, pp. 045304.
3. O'Connor, W. E., et al. (2014). Thermal property prediction and measurement of organic phase change materials in the liquid phase near the melting point. *Applied energy*, 2014, Т. 132, pp. 496-506.
4. Bani Hani, D., et al. (2023). Reliability modeling of the fatigue life of lead-free solder joints at

Impact Factor:

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

SIS (USA) = 0.912
PIIHQ (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

- different testing temperatures and load levels using the Arrhenius model. *Scientific Reports*, 2023, T. 13, №. 1, p. 2493.
- Ma, J., et al. (2017). High-adaptable prediction method of flat-end milling force based on material properties for difficult-to-machine materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, T. 92, pp. 1493-1506.
 - Napp, D. (1995). *Lead free interconnect materials for the electronics industry*. Seventeenth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. 'Manufacturing Technologies-Present and Future', IEEE, 1995, pp. 238-244.
 - Li, Y., et al. (2023). *Electrical regulation of interfacial thermal conductance of graphene/MoS₂ heterojunction: Uncovering the role of electrons*. (pp.571-579). Carbon, 2023, T. 203.
 - Merayo, D., Rodríguez-Prieto, A., & Camacho, A. M. (2020). Prediction of mechanical properties by artificial neural networks to characterize the plastic behavior of aluminum alloys. *Materials*, 2020, T. 13, №. 22, p. 5227.
 - Jain, D., Bhadauria, S. S., & Kushwah, S. S. (n.d.). Analysis and prediction of plastic waste composite construction material properties using machine learning techniques. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, p. e14094.
 - Yuan, K. Y., et al. (2013). Numerical predictions of viscoelastic properties and dynamic moduli of innovative pothole patching materials. *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2013, SPIE*, 2013, T. 8694, pp. 315-322.
 - Kundu B., Bhanja D., Lee K. S. (2012). A model on the basis of analytics for computing maximum heat transfer in porous fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, T. 55, №. 25-26, S. 7611-7622.
 - Tatsumi, H., & Nishikawa, H. (2022). Anisotropic highly conductive joints utilizing Cu-solder microcomposite structure for high-temperature electronics packaging. *Materials & Design*, 2022, T. 223, p. 111204.
 - Rosli, M. A., et al. (2020). The effectiveness of macrocomposite adsorbent for treatment of COD and suspended solid of car wash water effluent. *International Journal*, 2020, T. 8, №. 1.2.
 - Ma, Q., Chen, Z., & Xu, B. (2015). Numerical Simulation for Gas Diffusion in Fractal Reconstructed Anisotropic Porous Building Materials. *Procedia Engineering*, 2015, T. 121, pp. 240-247.
 - Popov, A. I., et al. (2022). *Effective Thermal Conductivity of Materials Reinforced with Bars: Analytical and Numerical Study*. 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE, 2022, pp. 849-851.
 - Ma, X., et al. (2022). A novel design method for TPMS lattice structures with complex contour based on moving elements method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, T. 123, №. 1-2, pp. 21-33.
 - Castro, A. P. G., et al. (2019). Numerical and experimental evaluation of TPMS Gyroid scaffolds for bone tissue engineering. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 2019, T. 22, №. 6, pp. 567-573.
 - Castro, A. P. G., et al. (2020). Micromechanical behavior of TPMS scaffolds for bone tissue engineering. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, T. 305, №. 12, p. 2000487.
 - Shi, J., et al. (2018). A TPMS-based method for modeling porous scaffolds for bionic bone tissue engineering. *Scientific reports*, 2018, T. 8, №. 1, pp. 1-10.
 - Raju, S. K. K., & Onkar, P. S. (2022). Lattice_Karak: Lattice structure generator for tissue engineering, lightweighting and heat exchanger applications. *Software Impacts*, 2022, T. 14, p. 100425.
 - Lin, C., et al. (2022). Revealing the sound insulation capacities of TPMS sandwich panels. *Journal of Sound and Vibration*, 2022, T. 540, p. 117303.
 - Karakoç, A. (2021). RegionTPMS—Region based triply periodic minimal surfaces (TPMS) for 3-D printed multiphase bone scaffolds with exact porosity values. *SoftwareX*, 2021, T. 16, p. 100835.
 - Yang, N., Wei, H., & Mao, Z. (2022). Tuning surface curvatures and young's moduli of TPMS-based lattices independent of volume fraction. *Materials & Design*, 2022, T. 216, p. 110542.
 - Weber, D., & Srinivas Sundarram, S. (2023). 3D-printed and foamed triply periodic minimal surface lattice structures for energy absorption applications. *Polymer Engineering & Science*, 2023.
 - Bragin, D. M., et al. (2022). Vektornoe raspredelenie skorosti v jelementarnoj jachejke poverhnosti shena i-wp. *ural'skij nauchnyj vestnik* Uchrediteli: Tovarishhestvo s ogranichennoj otvetstvennost' u Uralnauchkniga, 2022, T. 3, №. 1, pp. 66-72.
 - Yang, N., et al. (2023). Anisotropy and deformation of triply periodic minimal surface based lattices with skew transformation. *Materials & Design*, 2023, p. 111595.
 - Popov, A. I., et al. (2022). Opredelenie jeffektivnogo kojefficienta teploprovodnosti poristogo materiala s uporjadochennoj

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

- strukturoj, osnovannoj na TPMP I-WP. , *Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyh tehnologij i jenergojeffektivnosti*, T.7 №3(25) ch.1, 2022 g, S. 61-67.
28. Bragin, D. M., et al. (2021). *Thermal Conductivity of a Porous Material with an Ordered Structure*. 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), IEEE, 2022, S. 858-861. Qureshi Z. A. et al. Using triply periodic minimal surfaces (TPMS)-based metal foams structures as skeleton for metal-foam-PCM composites for thermal energy storage and energy management applications //International Communications in Heat and Mass Transfer, 2021, T. 124, p. 105265.
 29. Parittothok, P., et al. (2022). Performance Improvement of Glass Microfiber Based Thermal Transpiration Pump Using TPMS. *Micromachines*, 2022, T. 13, №. 10, p. 1632.
 30. Bragin, D. M., et al. (2021). Raspredelenie vektornogo polja skorosti vnutri jelementarnoj jachejki poverhnosti shvarca tipa P. *Naukosfera*, 2021, №. 7-2, p. 253-256.
 31. 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.
 32. Ma, Q., et al. (2021). Elastically-isotropic open-cell minimal surface shell lattices with superior stiffness via variable thickness design. *Additive Manufacturing*, 2021, T. 47, p. 102293.