

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

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: 2022 Issue: 10 Volume: 114

Published: 26.10.2022 <http://T-Science.org>

Issue



Article



Dmitriy Mihailovich Bragin
Samara State Technical University
assistant

Sofya Alekseevna Zinina
Samara State Technical University
assistant

Andrey Igorevich Popov
Samara State Technical University
research assistant

Alexander Sergeevich Shulga
Samara State Technical University
researcher

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

HEAT FLOW IN A POROUS ORDERED STRUCTURE BASED ON SCHOEN'S I-WP(R) TOPOLOGY

Abstract: The article presents a simulation of the distribution of the thermal field inside a porous material. The pores of the material are evenly distributed in accordance with the triple periodic minimal surface of Schoen's I-WP(R). Such a systematization of pores makes it possible to create materials with predictable thermophysical properties. An important feature of the material is the dependence of the thermal conductivity on the direction. The study considers the distribution of heat flows inside the material in one of the orthogonal directions. This study can be used to further study the thermophysical properties of porous materials with an ordered structure.

Key words: Heat flow, porosity, Schoen's I-WP(R), TPMS, PETG.

Language: Russian

Citation: Bragin, D. M., et al. (2022). Heat flow in a porous ordered structure based on schoen's I-WP(R) topology. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 10 (114), 145-150.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-10-114-26> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2022.10.114.26>

Scopus ASCC: 2500.

ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК В ПОРИСТОЙ УПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ ТОПОЛОГИИ SCHOEN'S I-WP(R)

Аннотация: В статье представлено моделирование распределения теплового поля внутри пористого материала. Поры материала распределены равномерно в соответствии с трижды периодической минимальной поверхностью Schoen's I-WP(R). Такая систематизация пор позволяет создавать материалы с прогнозируемыми теплофизическими свойствами. Важной особенностью материала является зависимость теплопроводности от направления. В исследовании рассмотрено распределение тепловых потоков внутри материала в одном из ортогональных направлений. Данное исследование может быть

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

использовано для дальнейшего изучения теплофизических свойств пористых материалов с упорядоченной структурой.

Ключевые слова: Тепловой поток, пористость, Schoen's I-WP(R), TPMS, PETG.

Введение

УДК 536.1

Изучение пористых материалов открывает все большие возможности развития науки и техники. Пористые материалы в сравнении с сплошными обладают меньшей плотностью, и как следствие, меньшей массой при одинаковом объеме. Внедрение пор по структуре снижает теплопроводность материала, однако пористые материалы могут превосходить сплошные по удельным прочностным характеристикам [1-5]. Более того, пустоты в пористой основе или каркасе могут быть заполнены другим материалом. Полученный таким образом композит может улучшить некоторые свойства в зависимости от прикладных задач [4]. Важно отметить, что пористые материалы, как правило, обладают анизотропией свойств. Это также может быть использовано при решении задач связанных с перераспределением тепловых потоков или деформацией материала в необходимом векторном направлении.

По структуре пористые материалы условно разделены на две большие группы:

1. Материалы со стохастическим распределением пор по объему
2. Материалы с равномерным распределением пор по объему

Пористые материалы с случайным размером и распределением пор по объему наиболее изучены и распространены в строительстве, медицине, машиностроении, легкой промышленности и других производственных технологиях [6].

Изготовление в промышленном масштабе пористых материалов с упорядоченным распределением и размером пор оставалось невозможным до недавнего времени. С появлением различных аддитивных технологий изготовление структурированных пористых материалов стало доступно [7-9]. Прикладное

применение таких материалов также находит свое место в космической отрасли, авиационной промышленности, медицине и т.д.

Пористый материал на основе упорядоченной структуры, в сравнении с материалами со случайным распределением пор по объему, обладает рядом преимуществ [1,3,5,10]. Первоначально стоит отметить возможность прогнозирования свойств, превосходящие удельные прочностные характеристики и т.д. Указанные качества подтверждают высокий потенциал прикладного применения пористых материалов с упорядоченной структурой.

Особое внимание заслуживают пористые материалы на основе трижды упорядоченных минимальных поверхностей (TPMS). Это обусловлено возможностью применения материалов на основе TPMS в медицине, аддитивных технологиях, энергетике и других сферах [3,5,10]. Поверхности TPMS описываются строгими математическими уравнениями. Сейчас уже известно большое количество TPMS, однако исследователи продолжают находить и выводить новые поверхности. Наиболее распространены TPMS описанные в 19-20 веке учеными такими учеными как К.Г.А. Шварц, Э.Р. Неовиус и А. Шён.

Для изучения теплофизических свойств пористых материалов существует множество CAE программных комплексов. Среди которых отдельно стоит отметить Ansys, FlowVision, LVMFlow, Siemens NX[5]. Изучение TPMS с точки зрения тепломассопереноса обладает большим потенциалом. Это связано с тем, что структура TPMS делит пространство на два не пересекаемых объема – лабиринта. Это означает, что подобные структуры могут использоваться в различных теплообменниках. В данной работе для исследования была выбрана поверхность Schoen's I-WP(R), представленная на рисунке 1.

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

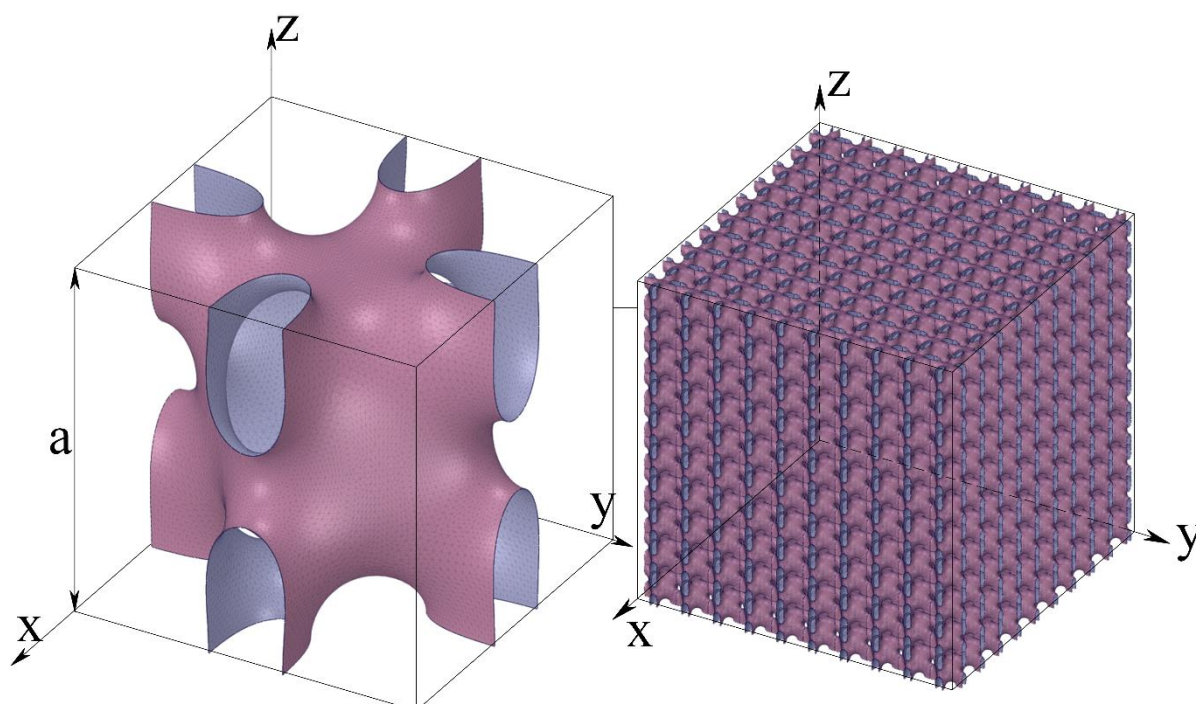


Рисунок 1. Единичная ячейка поверхности Schoen's I-WP(R). Структура Schoen's I-WP(R).

Постановка задачи

Исследуемый пористый материал получен путем придания толщины δ поверхности TPMS. Размеры структуры выбраны в границах $a \in [3-10]$ с шагом в 1 мм (Рис. 1). Толщина δ , придаваемая поверхности, выбрана в $\delta \in [0,05-0,5]$ с шагом в 0,05 мм. (Рис. 2)

Для изучения теплофизических свойств материалов на основе поверхности Schoen's I-WP(R) необходимо определить влияние геометрических размеров структуры на тепловые потоки.

Для обобщения результатов тепловой поток, проходящий через материал на основе Schoen's I-WP(R), заменен на эквивалентный приведенный тепловой поток через куб с размерами ребра куба

a . Таким образом возможно сравнение удельных тепловых потоков через структуры с различными размерами a и δ .

Для данной задачи используется граничные условия 1 рода (рис. 2). На одной из границ (синяя) задавалась температура 273K, а на другой (красная) 373K. Материал PETG выбран исходя из возможности дальнейшей верификации полученных результатов экспериментальным методом, а также прикладного применения структур. Свойства материала представлены в таблице 1.

Влияние воздуха в текущем исследовании не учитывается, внутри пор условно принят абсолютный вакуум.

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

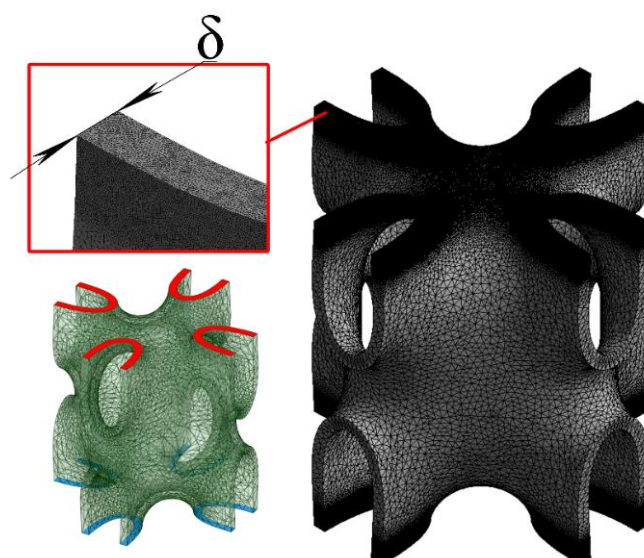


Рисунок 2. Сетка численного моделирования. Области задания граничных условий.

Таблица 1. Свойства материала PETG

Название материала	Свойства		
	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Теплоемкость, $\frac{Дж}{К \cdot кг}$	Плотность, $\frac{кг}{м^3}$
PETG	0,2	1050	1300

Для проведения текущего исследования выбрана модель Steady-State Thermal программного комплекса Ansys. Стоит отметить, что вблизи области задания граничных условий расчетная сетка была уменьшена до необходимых значений для повышения точности расчета (Рис.2).

Для изучения пористых материалов в текущем исследовании использовался метод минимального репрезентативного объема (RVE)[9]. В ходе проведения моделирования был выявлен RVE представленный на рисунке 2. Использование такого метода значительно

снизило необходимые компьютерные расчетные мощности, а также время необходимое на проведение исследования.

Результаты

Приведенные тепловые потоки через структуру представлены в таблице 2. Для удобства значения представлены в виде графика на рисунке 3. Полученные удельные тепловые потоки могут быть использованы для дальнейшего исследования теплофизических свойств структуры.

Таблица 2. Приведенный тепловой поток

a, мм	Удельный тепловой поток Вт/м ² для δ, мм									
	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
3	254,7	536,1	817,5	1098,9	1380,3	1661,7	1943,1	2224,4	2505,8	2787,2
4	138,3	296,6	454,8	613,1	771,4	929,7	1088,0	1246,3	1404,5	1562,8
5	85,3	186,6	287,9	389,2	490,5	591,8	693,1	794,4	895,7	997,0
6	57,0	127,4	197,7	268,1	338,4	408,8	479,1	549,4	619,8	690,1
7	40,3	91,9	143,6	195,3	247,0	298,7	350,4	402,0	453,7	505,4
8	29,6	69,1	108,7	148,3	187,9	227,4	267,0	306,6	346,1	385,7

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

9	22,4	53,6	84,9	116,2	147,4	178,7	210,0	241,2	272,5	303,8
10	17,3	42,7	68,0	93,3	118,6	144,0	169,3	194,6	219,9	245,3

Из графика наглядно видно, что с уменьшением размера ячейки и увеличением ее толщины тепловой поток увеличивается нелинейно. Это означает, что и теплопроводность структуры будет увеличиваться нелинейно. Для создания теплоизоляционных материалов необходимо увеличивать размер ячейки. Более

того, увеличение толщины на размерах ячейки более 8 мм не оказывает значительного влияния на теплопроводящие свойства в рамках рассматриваемой в текущем исследовании области. Максимальный приведенный тепловой поток составил 2787,2 Вт/м² в ячейках 3 мм с толщиной 0,5 мм.

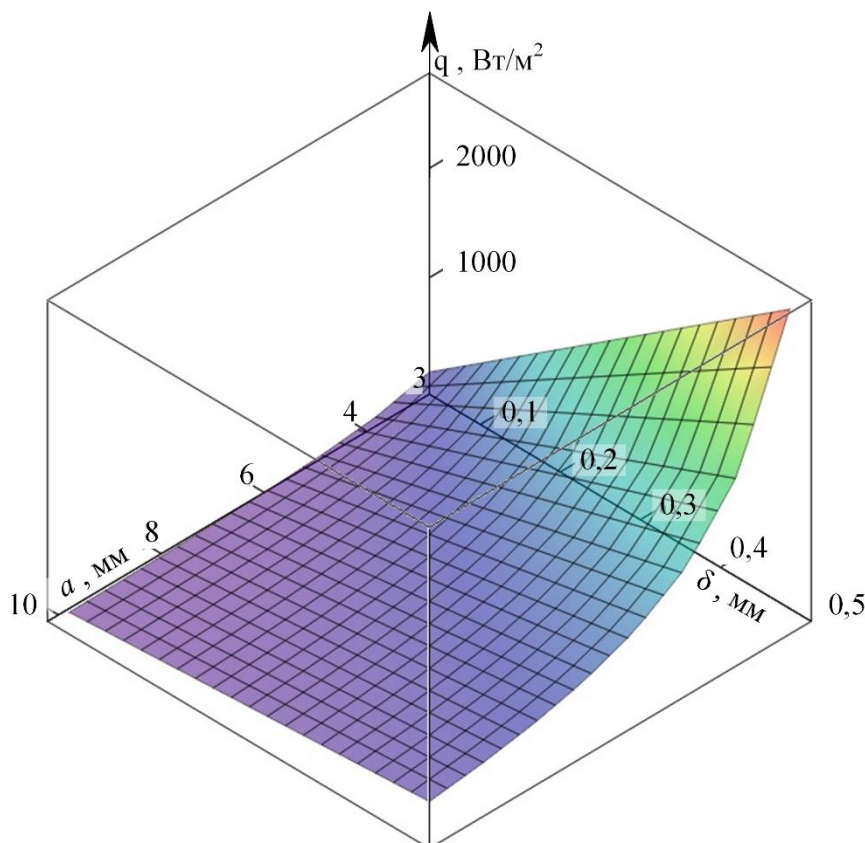


Рисунок 3. График распределения теплового потока параметров.

Также стоит отметить, что в рамках текущего исследования рассматривалось лишь направление Z (Рисунок 1). Теплопроводящие свойства в других направлениях могут существенно

отличаться в силу анизотропии свойств пористых материалов.

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

References:

1. Lee, S., et al. (2021). Enhanced mechanical strength of talc-containing porous kaolin prepared by a replica method. *Journal of the Korean Ceramic Society*, T. 58, №. 1, pp. 123-133.
2. Degefu, D. M., et al. (2021). Salient parameters affecting the performance of foamed

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИИ (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

- geopolymers as sustainable insulating materials. *Construction and Building Materials*, T. 313, p. 125400.
- Yan, C., et al. (2015). Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, T. 51, pp. 61-73.
 - Chen, Y., et al. (2021). Recent progress on nanocellulose aerogels: Preparation, modification, composite fabrication, applications. *Advanced Materials*, T. 33, №. 11, p. 2005569.
 - 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.
 - Shahzamanian, M. M., et al. (2022). Thermo-mechanical properties prediction of Ni-reinforced Al₂O₃ composites using micro-mechanics based representative volume elements. *Scientific Reports*, T. 12, №. 1, pp. 1-24.
 - Mostafaei, A., et al. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, T. 119, p. 100707.
 - Haghdadi, N., et al. (2021). Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. *Journal of Materials Science*, T. 56, №. 1, pp. 64-107.
 - (n.d.). *Rossijskaja inzhiniringovaja kompanija Total Z [Elektronnyj resurs]: 3D-printer AnyForm 250-G3(2X)*, Retrieved from <https://totalz.ru/products/equipment/universal-fdm/anyform-250-g3-2x-/>
 - Singh, R. K., et al. (2022). Hydrodynamics of countercurrent flow in an additive-manufactured column with triply periodic minimal surfaces for carbon dioxide capture. *Chemical Engineering Journal*, T. 450, pp. 138124.