



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 536.21

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА С УПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРОЙ, ОСНОВАННОЙ НА ТПМП I-WP

Попов А.И., Брагин Д.М., Зинина С.А., Еремин А.В., Олатуйи О.Д.

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), e-mail: pixinot@icloud.com

В работе рассматривается задача теплопроводности в пористом материале с упорядоченной структурой, основанной на трижды периодической минимальной поверхности (ТПМП) Шёна I-WP. ТПМП – это трижды периодические минимальные поверхности, которые обладают симметрией кристаллографической группы. Предложенный пористый материал с упорядоченной структурой может использоваться в качестве тепловой изоляции. Для определения его эффективного коэффициента теплопроводности применяется программный комплекс ANSYS. Для численного исследования взят материал, который используется при SLA методе 3D печати – фотополимерная смола «Phrozen». При численном решении данной задачи в модуле Steady-State Thermal были получены поля распределения температуры и теплового потока в элементарной ячейке поверхности I-WP. Анализ результатов показал, что эффективный коэффициент теплопроводности линейно зависит от толщины стенки ячейки.

Ключевые слова: эффективный коэффициент теплопроводности, ANSYS, компьютерное моделирование, тепловая изоляция.

DETERMINATION OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF A POROUS MATERIAL WITH AN ORDERED STRUCTURE BASED ON I-WP TPMS

Popov A.I., Bragin D.M., Zinina S.A., Eremin A.V., Olatuyi O.J.

Samara State Technical University, Samara, Russia (443100, Samara, st. Molodogvardeyskaya, 244), e-mail: pixinot@icloud.com

The paper considers the problem of heat conduction in a porous material with an ordered structure based on Schoen's I-WP Triple Periodic Minimum Surface (TPMS). TPMS are thrice periodic minimal surfaces that have the symmetry of the crystallographic group. The proposed porous material with an ordered structure can be used as thermal insulation. The ANSYS software package is used to determine its effective thermal conductivity. For a numerical study, the material used in the SLA 3D printing method, Phrozen photopolymer resin, was taken. When solving this problem numerically in the Steady-State Thermal module, the temperature and heat flux distribution fields in the unit cell of the I-WP surface were obtained. An analysis of the results showed that the effective thermal conductivity coefficient linearly depends on the thickness of the cell wall.

Keywords: effective thermal conductivity, ANSYS, computer simulation, thermal insulation.

В настоящее время с ростом мощности объектов генерации энергии (ТЭЦ, АЭС и т.д.) возникает необходимость в повышении энергетической эффективности и КПД систем теплоснабжения, теплообменных аппаратов и других объектов теплоэнергетики.

Одним из способов повышения энергетической эффективности вышеупомянутых объектов является применение современных теплоизоляционных материалов. В большинстве случаев в качестве тепловой изоляции применяются классические материалы, такие как: пенополиуретан, минеральная вата, эковата и т.д. Эти материалы в большинстве случаев имеют пористую структуру, причем со стохастическим характером расположения пор. Такие материалы, ввиду своей невысокой цены хорошо подходят для утепления участков тепловой сети, наружных стен домов и других мест, где требуется покрытие больших площадей. Но для теплоизоляции дорогостоящего теплообменного оборудования требуются более продвинутые методы. Стохастический характер расположения пор также не позволяет провести точный тепловой расчёт при помощи современных средств компьютерного моделирования (ANSYS, OpenFoam и т.д.). Исходя из вышесказанного ставится вопрос о разработке теплоизоляционного материала с упорядоченной структурой

Для исследования свойств теплоизоляционных материалов могут применяться различные численные [1-3] и аналитические методы [4,5].

В данной работе предлагается использовать в качестве тепловой изоляции пористый материал (Рисунок 1а), имеющий упорядоченную структуру, основанную на трижды периодической минимальной поверхности (ТПМП) [6,7].

Данный материал состоит из одинаковых повторяющихся ячеек/пор (Рисунок 1б). В качестве структуры для данного материала применяется трижды периодическая минимальная поверхность I-WP Шёна. Элементарная ячейка данной поверхности обладает кубической симметрией, что означает, что она строго вписывается в куб с длиной ребра a .

Данной поверхности придается толщина δ по нормали в обе стороны от каждого полигона, из которых непосредственно состоит ТПМП (Рисунок 2).

Таким образом в данной геометрии можно выделить два характерных размера: a – длина ребра куба и δ – толщина стенки ячейки.

Согласно закону Фурье плотность теплового потока определяется следующим выражением

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность; $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры. Предположим, что требуется определить тепловой поток через основание куба с длиной ребра a . Тепловой поток в данном случае будет равен:

$$Q_{\text{куб}} = \lambda_{\text{эфф}} \frac{(T_1 - T_2)}{a} F_{\text{куб}}, \quad (2)$$

где T_1, T_2 – граничные условия первого рода; $F_{\text{куб}}$ – площадь основания куба; $\lambda_{\text{эфф}}$ – эффективная теплопроводность элементарной кубической ячейки со структурой ТПМП I-WP.

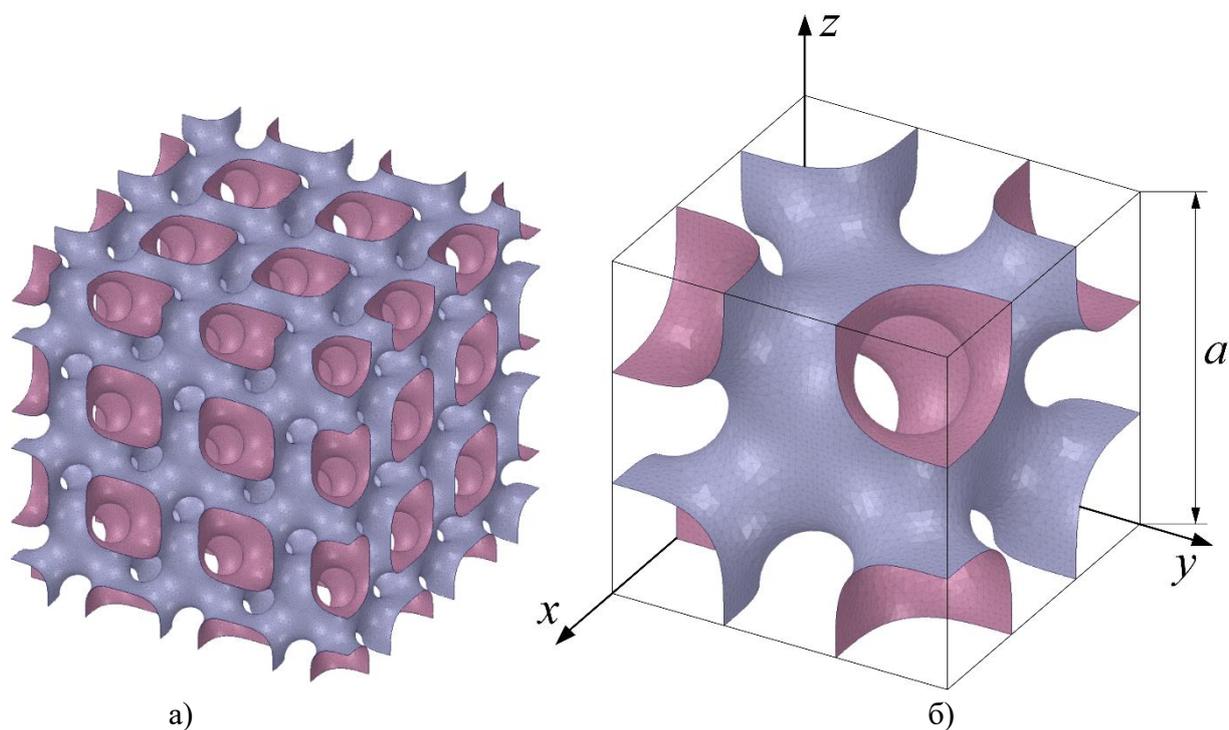


Рисунок 1 – Трижды периодическая минимальная поверхность I-WP

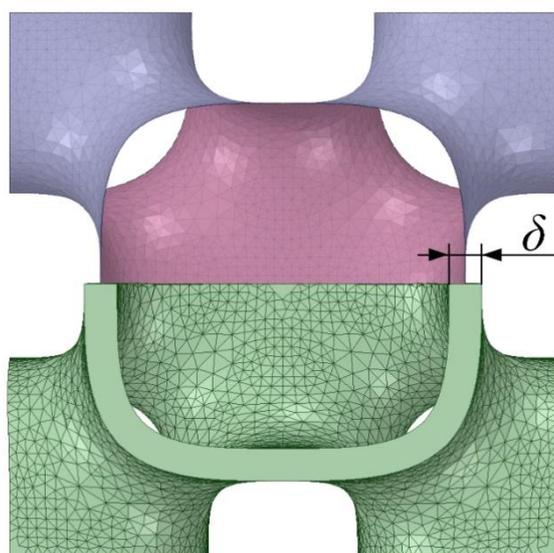


Рисунок 2 – Толщина стенки ячейки

Для определения теплового потока в основании элементарной ячейки поверхности Шёна I-WP, вписанной в куба с длиной ребра a , зададим на противоположных концах ячейки граничные условия первого рода (Рисунок 3).

Тогда тепловой поток через ячейку будет определяться выражением

$$Q_{ТПМП} = q_{ТПМП} F_{ТПМП}, \quad (3)$$

где $q_{ТПМП} = \lambda_m \frac{(T_1 - T_2)}{a}$; λ_m – теплопроводность материала, из которого изготовлена

элементарная ячейка. Если учитывать, что весь тепловой поток, который проходит через поверхность $F_{ТПМП}$, равномерно распределен по основанию куба $F_{куб}$, то получим:

$$Q_{ТПМП} = Q_{куб}; \quad (4)$$

$$\lambda_{эфф} = \frac{q_{ТПМП} F_{ТПМП}}{a(T_1 - T_2)}. \quad (5)$$

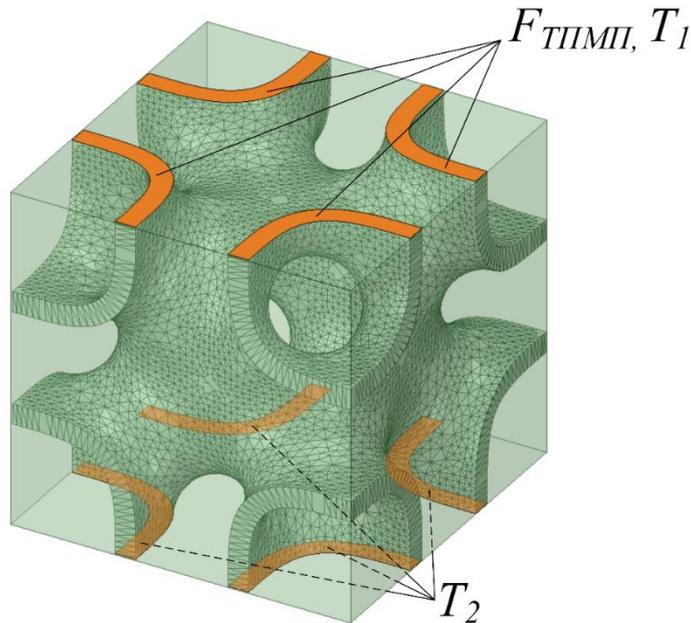


Рисунок 3 – Исходная геометрия для расчёта

Решение задачи теплопроводности осуществляется в модуле Steady-State Thermal. На построенную геометрию элементарной ячейки наносится сетка (Рисунок 4), приблизительно состоящая из 1 млн. ячеек.

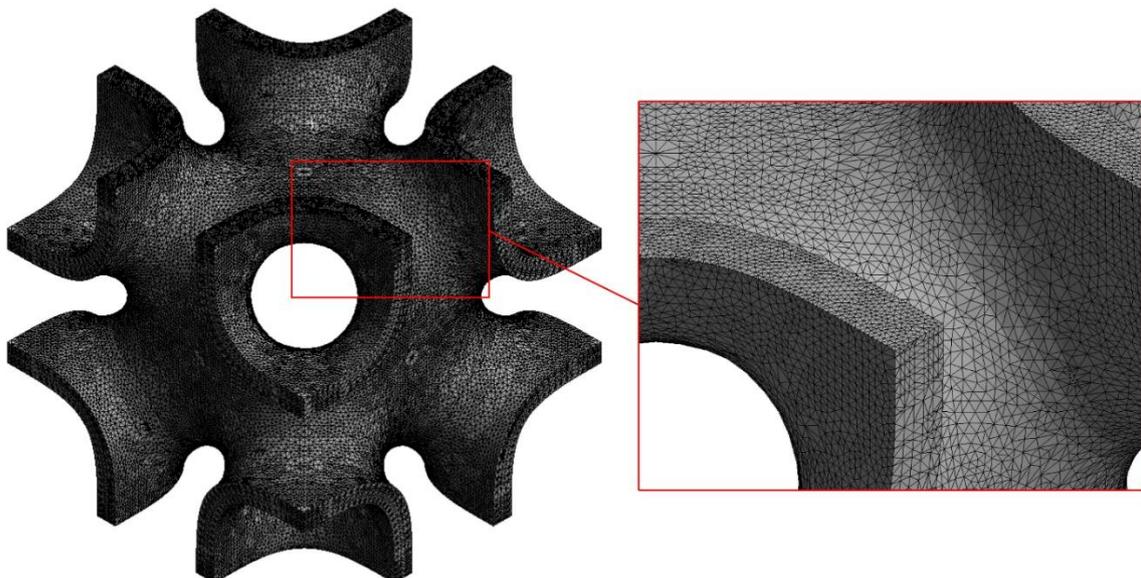


Рисунок 4 – Сетка

На противоположных торцах элементарной ячейки задаются граничные условия перового рода: $T_1 = 100^\circ C$ и $T_2 = 0^\circ C$. В качестве исходного материала с теплопроводностью λ_m выбрана фотополимерная смола, свойства которой представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Свойства фотополимерной смолы

Свойство	Фотополимер «Phrozen»	Единицы измерения
Теплопроводность	0.67	Вт/м ²
Плотность	1412	кг/м ³

В результате решения задачи были получены следующие поля распределения температуры и теплового потока.

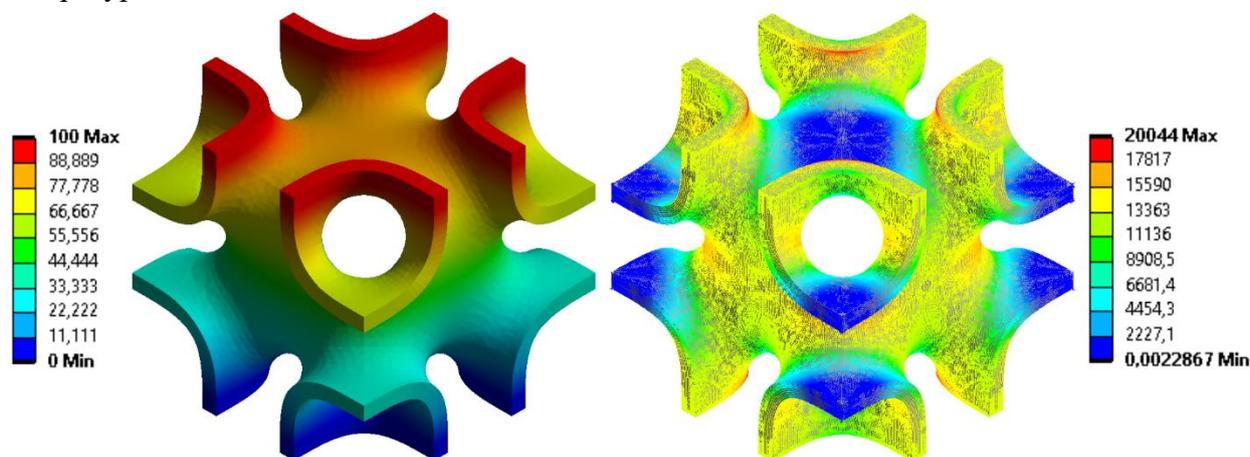


Рисунок 5 – Поля распределения температуры и теплового потока

Также получены значения плотности теплового потока $q_{ТПМП}$, представленные в таблице 2, при различных геометрических размерах элементарной ячейки.

Таблица 2 – Значения плотности теплового потока

	Толщина стенки ячейки δ , мм					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Длина ребра куба a , мм	1	0.05034	0.10138	0.15242	0.20346	0.25455
	2	0.02482	0.05034	0.07586	0.10138	0.12696
	3	0.01631	0.03332	0.05034	0.06735	0.08436
	4	0.01206	0.02482	0.03758	0.05034	0.06312
	5	0.00950	0.01971	0.02992	0.04013	0.05034
	6	0.00780	0.01631	0.02482	0.03332	0.04183
	7	0.00659	0.01388	0.02117	0.02846	0.03575
	8	0.00568	0.01206	0.01844	0.02482	0.03125
	9	0.00497	0.01064	0.01631	0.02198	0.02765
	10	0.00440	0.00950	0.01461	0.01971	0.02482

При помощи выражения (5) были рассчитаны значения эффективной теплопроводности материала. График на Рисунке 6 иллюстрирует зависимость эффективной теплопроводности от толщины стенки элементарной ячейки.

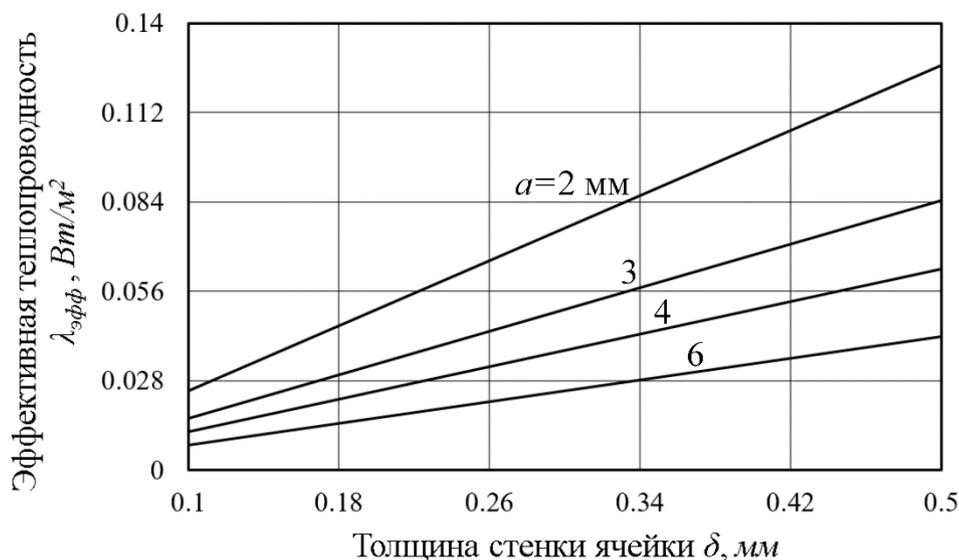


Рисунок 6 – График зависимости эффективной теплопроводности от толщины стенки ячейки

Из анализа графика следует, что эффективная теплопроводность пористого материала со структурой I-WP изменяется линейно при увеличении толщины стенки. Данный график позволяет как подобрать требуемое значение эффективной теплопроводности при заданных геометрических параметрах, так и определить размер и толщину стенки ячейки при известном значении теплопроводности.

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы при конструировании различного рода теплообменного оборудования или изготовлении уникальной тепловой изоляции.

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

Список литературы

1. Гапоненко С. О., Фазлиев Р. А., Калинина М. В. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения путем применения отражающего элемента //Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – №. 1. – С. 204-217.
2. Юша В. Л., Чернов Г. И., Калашников А. М. Влияние типов тепловой изоляции на эффективность работы теплообменного аппарата в системе рекуперации тепловых потерь МКУ //Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – №. 2. – С. 99-103.
3. Попов А. И., Зинина С. А., Еремин А. В. Исследование локально-неравновесной модели теплопроводности в плоской стенке при граничных условиях первого рода //Научный электронный журнал «Инновации. Наука. Образование\Отв. ред. Сафронов АИ–Тольятти:– 2021.– № 40 (август).– 908 с. – 2015.

4. Губарева К. В., Попов А. И., Шульга А. С. Получение аналитического решения задачи теплопроводности в пластине при граничных условиях третьего рода //Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. – 2020. – С. 777-779.
5. Губарева К. В. и др. Моделирование процесса теплообмена в пластине с переменными теплофизическими свойствами //Научное обозрение. Технические науки. – 2020. – №. 6. – С. 52-57.
6. Шевченко В. Я. и др. Полимерные структуры с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии //Физика и химия стекла. – 2017. – Т. 43. – №. 6. – С. 644-648.
7. Дьяченко С. В. и др. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба //Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88. – №. 7. – С. 1014.

References

1. Gaponenko S. O., Fazliev R. A., Kalinina M. V. Metod povysheniya jeffektivnosti teplovoj izoljacji truboprovodov sistem teplosnabzhenija putem primenenija otrazhajushhego jelementa //Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. – 2021. – Т. 13. – №. 1. – pp. 204-217.
 2. Jusha V. L., Chernov G. I., Kalashnikov A. M. Vlijanie tipov teplovoj izoljacji na jeffektivnost' raboty teploobmennogo apparata v sisteme rekuperacii teplovyh poter' MKU //Dinamika sistem, mehanizmov i mashin. – 2017. – Т. 5. – №. 2. – pp. 99-103.
 3. Popov A. I., Zinina S. A., Eremin A. V. Issledovanie lokal'no-neravnovesnoj modeli teploprovodnosti v ploskoj stenke pri granichnyh uslovijah pervogo roda //Nauchnyj jelektronnyj zhurnal «Innovacii. Nauka. Obrazovanie(Otv. red. Safronov AI–Tol'jatti:– 2021.– № 40 (avgust).– 908 p. – 2015.
 4. Gubareva K. V., Popov A. I., Shul'ga A. S. Poluchenie analiticheskogo reshenija zadachi teploprovodnosti v plastine pri granichnyh uslovijah tret'ego roda //Aktual'nye problemy prikladnoj matematiki, informatiki i mehaniki. – 2020. – pp. 777-779.
 5. Gubareva K. V. i dr. Modelirovanie processa teploobmena v plastine s peremennymi teplofizicheskimi svojstvami //Nauchnoe obozrenie. Tehnicheskie nauki. – 2020. – №. 6. – pp. 52-57.
 6. Shevchenko V. Ja. i dr. Polimernye struktury s topologiej trizhdy periodicheskikh poverhnostej minimal'noj jenerгии //Fizika i himija stekla. – 2017. – Т. 43. – №. 6. – pp. 644-648.
 7. D'jachenko S. V. i dr. Fiziko-mehaniicheskie svojstva model'nogo materiala s topologiej trizhdy periodicheskikh poverhnostej minimal'noj jenerгии tipa giroid v forme kuba //Zhurnal tehnicheckoj fiziki. – 2018. – Т. 88. – №. 7. – pp 1014.
-