



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

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



УДК 536.2

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕОВИУСА

¹Мустафин Р.М., ²Попов А.И., ³Брагин Д.М.

ФГБОУ ВО "САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ", Самара, Россия (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244), e-mail: ¹ ravil-bk211@mail.ru, ²pixinot@icloud.com, ³dimabragin2204@yandex.ru

В настоящей статье представлено исследование аэродинамических характеристик в элементарных ячейках трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS) Неовиуса, сгенерированных методом граничных условий (Surface Evolver). Целью исследования было изучение аэродинамических свойств этих элементарных ячеек. Исследование проводилось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS, и результаты включают поля распределения скоростей и давлений, а также зависимость перепада давления от скорости для разных моделей турбулентности. Выявлены оптимальные модели турбулентности для решения подобных задач.

Ключевые слова: TPMS, аэродинамика, метод конечных элементов, ANSYS.

ABOUT ONE MULTI-FACTOR CLUSTERING OBJECTS METHOD

¹Mustafin R.M., ²Popov A.I., ³Bragin D.M.

FEDERAL STATE EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION SAMARA STATE TECHNICAL UNIVERSITY, Samara, Russia (443100, Samara, st. Molodogvardeyskaya, 244), e-mail: ¹ ravil-bk211@mail.ru, ²pixinot@icloud.com, ³dimabragin2204@yandex.ru

This paper presents a study of the aerodynamic characteristics in unit cells of Neovius triply periodic minimal surfaces (TPMS) generated by the boundary condition method (Surface Evolver). The goal of the study was to study the aerodynamic properties of these unit cells. The study was carried out using the finite element method in the ANSYS software package, and the results include the velocity and pressure distribution fields, as well as the dependence of the pressure drop on the velocity for different turbulence models. Optimal turbulence models for solving such problems have been identified.

Keywords: TPMS, aerodynamics, finite element method, ANSYS.

Введение

Трижды периодические минимальные поверхности (или TPMS от англ. triply periodic minimal surface) – это класс поверхностей, которые обладают тремя периодами симметрии и имеют минимальную площадь среди всех поверхностей, удовлетворяющих определенным условиям.

Трижды периодические минимальные поверхности являются не только генерируемыми человеком они также встречаются и в природе. К примеру, в листьях растений, панцирях

жуков и ракообразных и т.д. [1]. Также они давно исследуются и еще начале 19 века были проведены первые исследования TPMS, и с тех пор они не утрачивают актуальность для исследователей по всему миру [2,3]. Такую актуальность TPMS структуры получили за счет уникальных особенностей: способность делить пространство на два и более непересекающихся объема, создавая высокое отношение площади поверхности к объему [4], высокая удельная прочность [5], высокая пористость материалов с TPMS архитектурой [6].

Трижды периодических минимальных поверхностей нашли широкое применение в физике, химии, материаловедении, биологии и других науках. TPMS могут использоваться при разработке дизайна поверхностей для каталитических процессов [7], создании мембранных фильтров [8] и изготовлении различного теплообменного оборудования [9]. Это дает импульс ученым исследовать различные свойства этих поверхностей: теплофизических [10], гидродинамических [11] и других свойств материалов на основе TPMS структур.

Целью настоящей работы является исследование аэродинамических свойств трижды периодической минимальной поверхности. В качестве объекта исследования выбрана поверхность Неовиуса. Эта поверхность, первоначально обнаруженная финским математиком Эдвардом Рудольфом Неовиусом [12].

Поверхность имеет род 9 и делит пространство на два бесконечных неэквивалентных лабиринта. Подобно многим другим трижды периодическим минимальным поверхностям, она изучалась в связи с микроструктурами блок-сополимеров, ПАВ-водных смесей и в связи с кристаллографией мягких материалов [13].

Поверхность можно аппроксимировать поверхностью уровня

$$3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0$$

Методы исследования

В качестве метода исследования выбрано CFD-моделирование в программном комплексе Ansys в модуле Fluent. Ansys - универсальное программное средство для анализа методом конечных элементов (МКЭ), которое существует и развивается в течение последних 30 лет. Оно пользуется значительной популярностью среди специалистов в области автоматизированных инженерных расчетов (САПР, или CAE) и предоставляет возможность решать разнообразные задачи МКЭ, включая линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные пространственные задачи в области механики деформируемых тел и механики конструкций. Это также включает в себя задачи, связанные с нестационарными геометрическими и физическими нелинейностями в контактном взаимодействии элементов конструкций, а также задачи в области механики жидкостей и газов, теплообмена и теплопередачи, электродинамики, акустики, и механики связанных полей.

Первоначально архитектура TPMS Неовиуса создается в программе Surface Evolver [14], 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. Далее из облака точек получаем поверхность с помощью программного комплекса SolidWorks. После этого полученная поверхность загружается во встроенный в ANSYS редактор геометрий Space Claim. При помощи функции Thickness поверхности придается толщина. Элементарная ячейка TPMS Неовиуса обладает кубической симметрией и вписывается в куб.

Для исследования была построена геометрия, состоящая из 4, расположенных в ряд, элементарных кубических ячеек, а также входной и выходной зона стабилизации потока. Геометрические параметры исследуемой геометрии следующие: размеры элементарной ячейки 5x5x5 мм; входная и выходной зоны – 5x5x20 мм; толщина стенки элементарной ячейки 0,2 мм. Расчетная геометрия показана на Рисунке 1.

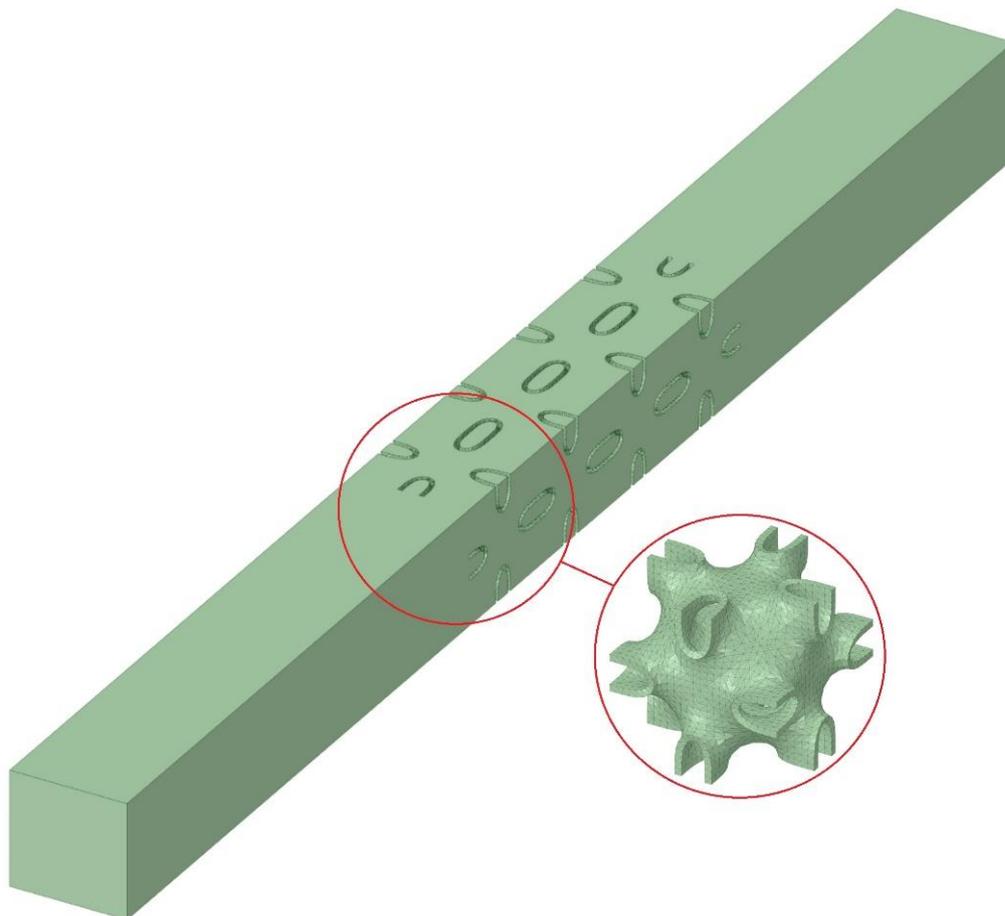


Рисунок 1 – Геометрия.

Сетка для численного моделирования методом конечных элементов выполнена в модуле Fluent Meshing (см. Рисунок 2).

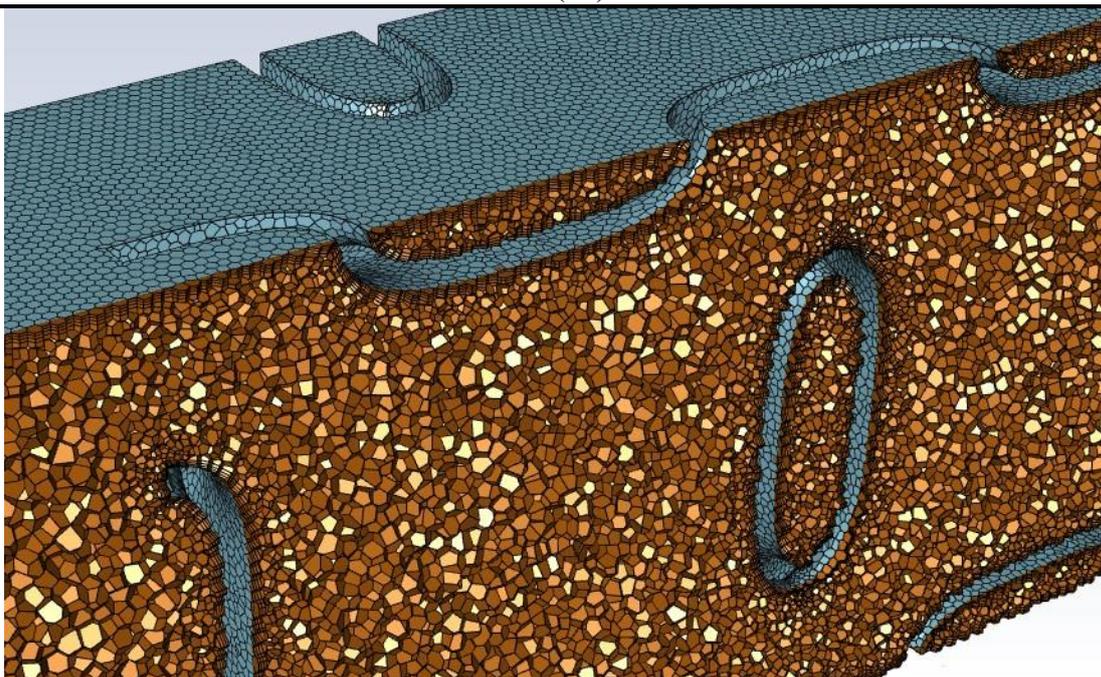


Рисунок 2 – Расчетная сетка.

В результате проведения сеточной сходимости (Рисунок 3) было выявлено, что сетка, состоящая из 4500000 элементов, удовлетворяет точность расчетов на 98%.

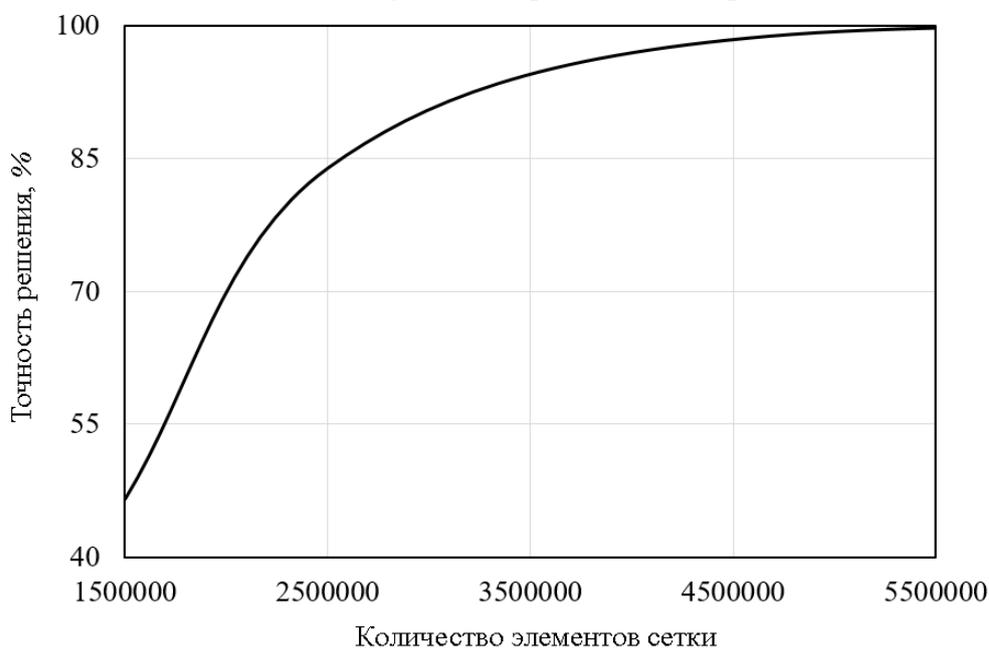


Рисунок 3 – Сеточная сходимость.

Результаты

Для анализа аэродинамических свойств трижды периодической минимальной поверхности Невюуса, изменялась начальная скорость и различные модели турбулентности. Исследуемый диапазон скорости – $0,001 < v < 0,1$ м/с, а в качестве моделей турбулентности были выбраны: Laminar, k-e, k-omega (standart), Transition k-kl-omega, Transition SST, Reynolds stress. Задача решалась в стационарной постановке.

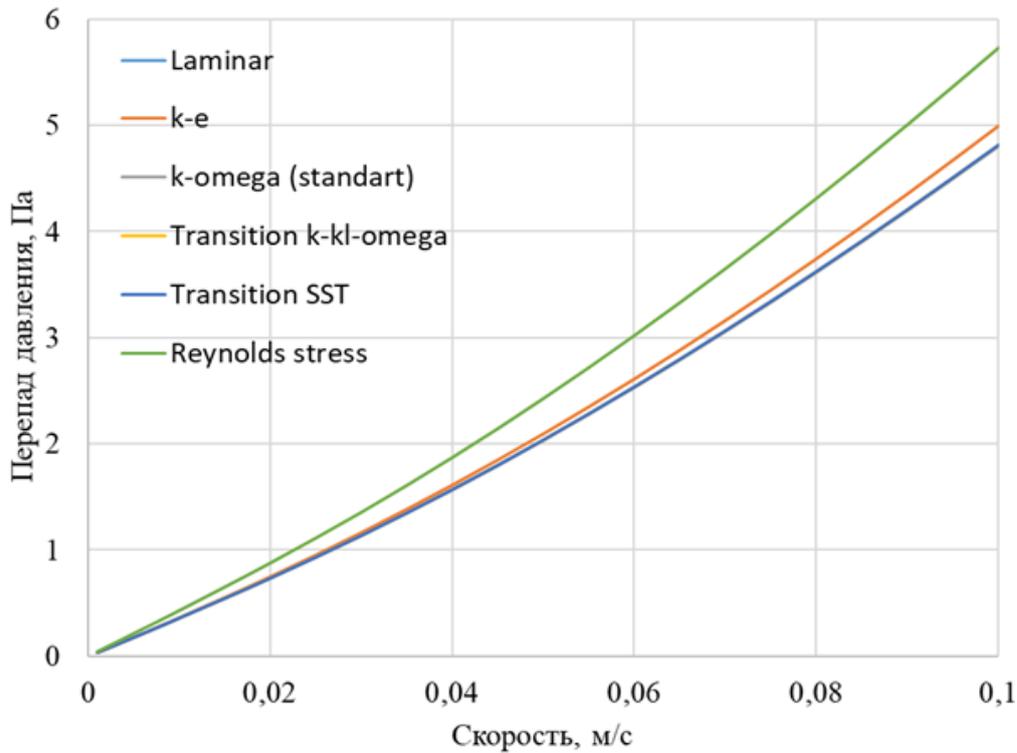


Рисунок 4 – График зависимости перепада давления от скорости потока для различных моделей турбулентности.

На Рисунок 4 показана зависимость перепада давления в канале от начальной скорости потока, для различных моделей турбулентности. Видно, что k-omega (standart), Transition k-kl-omega, Transition SST дают практически идентичные результаты. Максимальное отклонение показывают результаты при модели турбулентности Reynolds stress. Также отклонение имеет модель турбулентности k-e, именно эту модель турбулентности чаще всего используют исследователи при решении подобных задач.

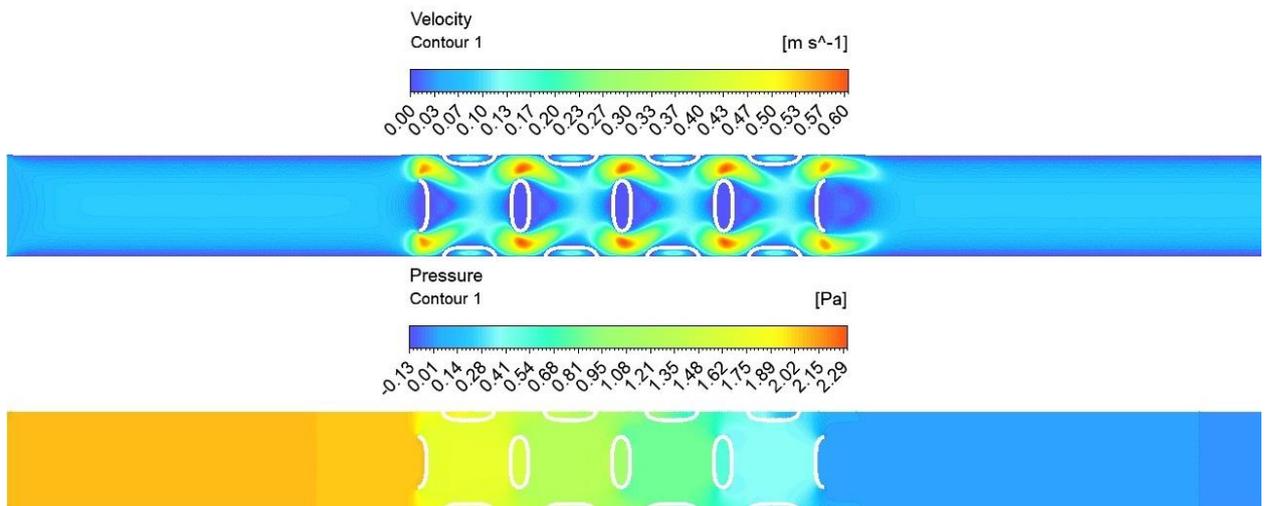


Рисунок 5 – Контур скорости и давления.

На Рисунке 5 показаны контуры скорости и давления в канале с TPMS Неовиуса для k-ε модели турбулентности при скорости 0,05 м/с. На контурах показано распределение скоростей и давлений, видно, что поток ускоряется в местах сужения. Это согласуется с физическими законами течения через каналы.

Выводы

При решении задач аэродинамики часто встает вопрос о выборе модели турбулентности. Исследование показало, что модели турбулентности Laminar, k-ε, k-ω (standart), Transition k-k1-ω, Transition SST дают практически идентичные результаты с максимальным отклонением 1%. Наибольшее отклонение наблюдается при использовании модели турбулентности Reynolds stress и достигает 16%.

Если погрешность в 1% является удовлетворительным для решения задачи аэродинамики в структурах, состоящих из трижды периодических минимальных поверхностей, то можно выбрать любую из исследуемых моделей турбулентности, кроме Reynolds stress.

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

Список литературы

1. 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. 1014-1017.
2. Cole F. N. The April meeting of the American Mathematical Society in New York. – 1914.
3. Koch E. On 3-Periodic Minimal Surfaces. I. Symmetry and Derivation. – 1939.
4. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R. K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices //Advanced Engineering Materials. – 2019. – Т. 21. – №. 10. – С. 1900524.
5. Cai Z. et al. The effect of porosity on the mechanical properties of 3D-printed triply periodic minimal surface (TPMS) bioscaffold //Bio-Design and Manufacturing. – 2019. – Т. 2. – С. 242-255.
6. Al-Ketan O. et al. Additive manufacturing of architected catalytic ceramic substrates based on triply periodic minimal surfaces //Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – Т. 102. – №. 10. – С. 6176-6193.
7. Evsevlev S. et al. X-ray computed tomography procedures to quantitatively characterize the morphological features of triply periodic minimal surface structures //Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 11. – С. 3002.
8. Lesmana L. A., Aziz M. Triply periodic minimal surface-based heat exchanger as metal hydride hydrogen storage reactor //Chemical Engineering Transactions. – 2021. – Т. 88. – С. 229-234.
9. Qureshi Z. A. et al. Heat transfer performance of a finned metal foam-phase change material (FMF-PCM) system incorporating triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 170. – С. 121001.

10. Брагин Д.М., Зинина С.А., Еремин А.В. Исследование теплоизоляционных свойств композиционного материала с структурой ТПМП // Наукосфера. – 2021. – № 11-2. – С. 120-124.
11. Eremin A. V. et al. 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. – С. 1030-1032.
12. Neovius, E. R. "Bestimmung Zweier Spezieller Periodischer Minimalflächen, Akad." Abhandlungen, Helsinki, Finland (1883).
13. Mackay, Alan L. "Flexicrystallography: Curved surfaces in chemical structures." Current Science (1995): 151-161.
14. Brakke K. A. The surface evolver //Experimental mathematics. – 1992. – Т. 1. – №. 2. – С. 141-165.

References

1. Dyachenko S.V. et al. Physico-mechanical properties of a model material with the topology of triply periodic surfaces of minimal energy of the Gyroid type in the shape of a cube // Journal of Technical Physics. – 2018. – Т. 88. – No. 7. – pp. 1014-1017.
 2. Cole F. N. The April meeting of the American Mathematical Society in New York. – 1914.
 3. Koch E. On 3-Periodic Minimal Surfaces. I. Symmetry and Derivation. – 1939.
 4. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R. K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices //Advanced Engineering Materials. – 2019. – Т. 21. – No. 10. – p. 1900524.
 5. Cai Z. et al. The effect of porosity on the mechanical properties of 3D-printed triply periodic minimal surface (TPMS) bioscaffold //Bio-Design and Manufacturing. – 2019. – Т. 2. – pp.. 242-255.
 6. Al-Ketan O. et al. Additive manufacturing of architected catalytic ceramic substrates based on triply periodic minimal surfaces //Journal of the American Ceramic Society. – 2019. – Т. 102. – No. 10. – pp. 6176-6193.
 7. Evsevlev S. et al. X-ray computed tomography procedures to quantitatively characterize the morphological features of triply periodic minimal surface structures //Materials. – 2021. – Т. 14. – No. 11. – p. 3002.
 8. Lesmana L. A., Aziz M. Triply periodic minimal surface-based heat exchanger as metal hydride hydrogen storage reactor // Chemical Engineering Transactions. – 2021. – Т. 88. – pp.. 229-234.
 9. Qureshi Z. A. et al. Heat transfer performance of a finned metal foam-phase change material (FMF-PCM) system incorporating triply periodic minimal surfaces (TPMS) //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Т. 170. – p. 121001.
 10. Bragin D.M., Zinina S.A., Eremin A.V. Study of the thermal insulation properties of a composite material with a TPMP structure // Naukosfera. – 2021. – No. 11-2. – pp. 120-124.
 11. Eremin A. V. et al. 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.
 12. Neovius, E. R. "Bestimmung Zweier Spezieller Periodischer Minimalflächen, Akad." Abhandlungen, Helsinki, Finland (1883).
-

13. Mackay, Alan L. "Flexicrystallography: Curved surfaces in chemical structures." *Current Science* (1995): pp. 151-161.
 14. Brakke K. A. The surface evolver // *Experimental mathematics*. – 1992. – Т. 1. – No. 2. – pp. 141-165.
-