



А. В. ЕРЕМИН  
Д. М. БРАГИН

## ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В КАНАЛЕ С ОРЕБРЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИПА SCHOEN'S IWP

HEAT AND MASS TRANSFER IN A CHANNEL WITH FINNS BASED  
ON A TRIPLY PERIODIC SURFACE OF THE SCHOEN'S IWP TYPE

В исследовании рассмотрен теплоперенос в каналах теплообменного устройства с оребрением, основанным на трижды периодических минимальных поверхностях типа Schoen's IWP. Решена взаимосвязанная задача переноса массы и тепла при помощи численных методов, реализованных в программном комплексе Ansys 2019 R3 модуле Fluid Flow (Fluent). Результаты работы сравниваются с оребрением на основе поверхности Primitive. Определены зависимости потерь давления потока, температуры теплоносителя на выходе из теплообменника от скорости потока и геометрических характеристик оребрения. Полученные результаты демонстрируют увеличение эффективности теплопереноса при внедрении TPMS конструкции Schoen's IWP в теплообменное устройство до 18 % по сравнению с оребрением на основе Primitive.

**Ключевые слова:** TPMS, тепломассоперенос, оребрение, теплообменное устройство Schoen's IWP

### Введение

Материалы на основе трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS, от англ. triply periodic minimal surface) находят применение в конструкциях с требуемой высокой прочностью и жесткостью [1], конструкциях для поглощения энергии [2], катализаторах [3], мембранах [4] и т. д. Исследования в области переноса массы и импульса также демонстрируют потенциал внедрения таких материалов в теплообменные оборудования [5–7]. Это объ-

The current study examines heat transfer in the channels of a heat exchanger with fins based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) of the Schoen's IWP type. A coupled heat and mass transfer problem is solved using numerical methods implemented in the software package Ansys 2019 R3, specifically in the Fluid Flow (Fluent) module. The results are compared with fins based on the Primitive surface. Dependencies are identified between pressure drop, the outlet temperature of the heat carrier, and the flow rate and geometric characteristics of the fins. The findings demonstrate a 18 % increase in heat transfer efficiency when using the Schoen's IWP TPMS design in the heat exchanger compared to the Primitive-based fins.

**Keywords:** TPMS, heat and mass transfer, fins, heat exchanger, Schoen's IWP

ясняется рядом преимуществ TPMS конструкций перед другими ячеистыми решетками.

Среди ключевых преимуществ исследователи отмечают возможность регулировки типа поверхности [8], толщины и длины ячейки [9], пористости материала под требования каждой уникальной задачи [10]. TPMS решетки обладают большей суммарной площадью теплообмена при минимальном объеме [11], а сама решетка делит пространство на два и более непересекающихся объема/лабиринта, что позволяет использовать такую структуру в ре-

куперативных теплообменниках [12]. Поскольку средняя кривизна TPMS равна нулю, поток через решетку TPMS может свободно двигаться в любом направлении без значительных гидравлических сопротивлений [13].

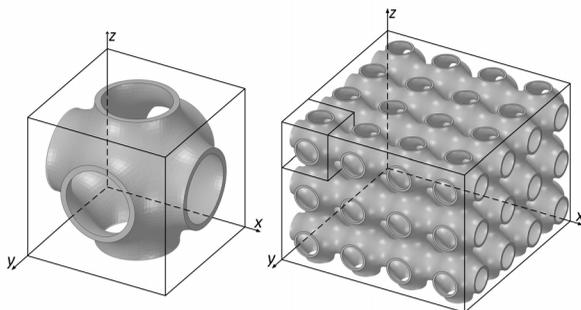


Рис. 1. Решетка, основанная на элементарных ячейках TPMS типа Primitive  
Fig. 1. Lattice based on TPMS Primitive-type unit cells

На данный момент в качестве оребрения была рассмотрена конструкция Primitive, которая продемонстрировала потенциал внедрения в теплообменное оборудование [14]. Однако в ходе углубленного исследования гидродинамических характеристик структуры было выявлено, что оребрение на основе Primitive (рис. 1) может приводить к возникновению застойных областей до 30 % от общего объема [15]. Площадь поверхности и эффективная теплопроводность конструкции Primitive [16] демонстрирует минимальные значения по сравнению с другими типами TPMS. Так, конструкции на основе Schoen’s IWP и Neovius обладают большей эффективной теплопроводностью на 50–53 % и на 42–46 % большей площадью поверхности по сравнению с оребрением Primitive [15]. Возникновению застойных зон в структурах Schoen’ WP и Neovius препятствуют постоянные изменения направления, завихрений, перемешивания и турбулизации потока теплоносителя [17]. Однако это приводит к увеличению потери давления для Neovius в 8 раз, что в свою очередь приводит к значительным дополнительным затратам электроэнергии на перенос жидкости в теплообменном устройстве. Увеличение потерь давления потока при прохождении через конструкцию Schoen’ WP составляет не более 50 %. Поток в структуре Primitive имеет прямолинейную трубчатую форму, в то время как поток в структуре Schoen’s IWP обладает извилистостью, которая позволяет увеличивать путь потока и, соответственно, время взаимодействия между жидкостью и твердой стенкой [18].

В связи с этим в рамках текущего исследования предлагается рассмотреть другую модель

оребрения, основанную на TPMS типа Schoen’s IWP, которая может продемонстрировать увеличение эффективности переноса тепла в теплообменном устройстве по сравнению с TPMS типа Primitive. Это исследование должно обеспечить прямое сравнение, предлагая новые сведения о факторах, которые влияют на эффективность переноса тепла в конструкциях на основе TPMS. Ожидается, что результаты исследования будут использоваться при проектировании оребрения на основе TPMS, способствуя разработке более эффективных решений для охлаждения. Для решения поставленной задачи планируется использовать численный эксперимент, реализованный в программном комплексе Ansys 2019 R3 модуле Fluid Flow (Fluent).

## Методология

### Формирование геометрии

TPMS поверхности описываются строгими тригонометрическими уравнениями. Так, решетка типа Schoen’s IWP может быть описана функцией

$$2\left[\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi y}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right) + \cos\left(\frac{2\pi z}{a}\right)\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)\right] - \left[\cos\left(\frac{4\pi x}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi y}{a}\right) + \cos\left(\frac{4\pi z}{a}\right)\right] = \pm \frac{\delta}{2}. \quad (1)$$

Вся решетка может быть разбита на повторяющиеся элементы – элементарные ячейки. Характерными размерами, исходя из функции (1) и предыдущих исследований [17], является длина «а», равная периоду поверхности уровня, и толщина ячейки «δ», равная разности параметров смещения двух уравнений поверхности уровня  $f(x,y,z,a)$ . Область, ограниченная эквидистантными поверхностями, образует стенку. Таким образом, вся геометрия структуры TPMS с жидкостью в межпоровом пространстве может быть описана следующим выражением:

$$f(x, y, z, a) = \begin{cases} f > \delta / 2 \forall f \in \Omega_1 (\text{Теплоноситель}) \\ |f| \leq \delta / 2 \forall f \in \Omega_2 (\text{Оребрение}) \\ f < \delta / 2 \forall f \in \Omega_3 (\text{Теплоноситель}) \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 2 представлена решетка и элементарная ячейка, основанные на поверхности типа Schoen’s IWP с учетом жидкости в межпоровом пространстве.

На основе неявных функций TPMS поверхностей созданы различные программные продукты для формирования расчетной геометрии. Одним из таких продуктов является Surface Evolver [19], широко используемый для

исследований в области тканевой инженерии. Раджагопалан [20] связал клеточную теорию Шванна (1838 г.) с открытием Шварца в 1865 г. В результате он получил развитую жизнеспособную морфологию, которая глубоко повлияла на миграцию клеток и репликацию роста тканей на макроуровне. Впоследствии Колкен [21] продолжил работу в этом направлении, также используя Surface Evolver для поиска материалов с превосходными механическими свойствами.

Первым шагом процесса формирования геометрии является импортирование файла с информацией о неявной функции из библиотеки Кена Бракке в Surface Evolver. В программе выполняется построение фасетированной поверхности и запись точек триангуляции в виде облака точек. Затем облако точек обрабатывается и формируется CAD модель фасетированной поверхности TPMS с нулевой толщиной. С помощью встроенных функций Ansys модуля SpaceClaim Direct Modeler из поверхности формировалась твердотельная структура TPMS, ограниченная двумя эквидистантными поверхностями, удаленными друг от друга на величину  $\delta$ . После получения твердотельной геометрической модели оребрения в среде CAD моделирования формируется канал теплоносителя и греющие пластины. Исследование течения жидкости в канале выполняется при комбинациях геометрических параметров элементарной ячейки:  $a = 20$  мм,  $\delta = 1$  мм и  $a = 20$  мм,  $\delta = 2$  мм. Выбор таких размеров обусловлен возможностью сравнения результатов текущего исследования с оребрением на основе Primitive, рассмотренным ранее [14]. Переменная толщина ячейки позволяет оценить влияние параметров смещения двух уравнений поверхности уровня на характеристики потока. На рис. 3 представлена CAD модель, рассматриваемая в текущем исследовании.

### CAE моделирование

Несмотря на то, что TPMS конструкции описываются строгими математическими уравнениями, применение традиционных аналитических методов [22, 23] вызывает ряд сложностей, в том числе описание турбулентного потока, застойных зон с завихрениями и обратными течениями, нелинейность уравнений переноса, многообразие масштабов потоков теплоносителя. Применение компьютерного моделирования может использоваться для решения таких задач посредством численных методов конечных элементов. Соответственно для исследования теплопереноса в рамках текущего исследования выбран программный комплекс Ansys 2019 R3 модуль Fluid Flow (Fluent).

Чтобы поддерживать равный массовый расход на входе и выходе модели, решается уравнение неразрывности для установившегося потока:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0. \tag{3}$$

Уравнение сохранения импульса в декартовой тензорной форме записывается как

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i' u_j'}). \tag{4}$$

Уравнение энергии для турбулентного потока имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)](\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff} \right). \tag{5}$$

Набор граничных условий соответствует предложенной ранее методике исследования [14] полей температуры и скорости в канале с TPMS-ребрением на основе вычислительно-

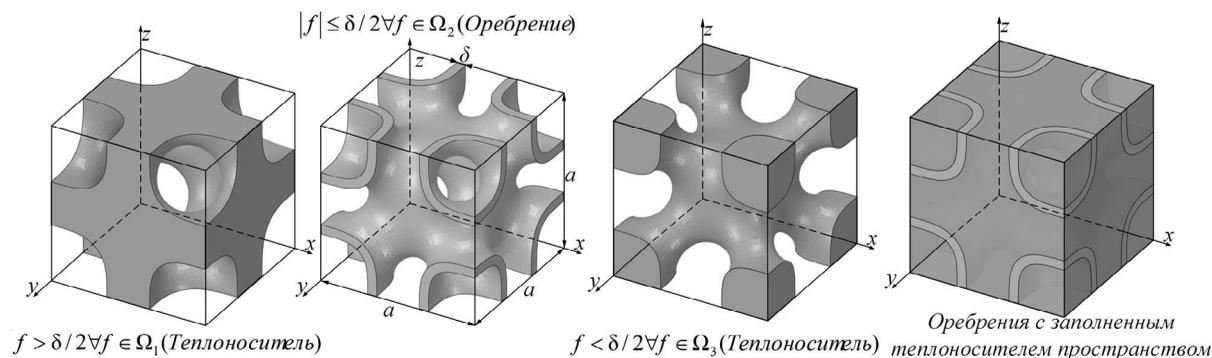


Рис. 2. Решетка, основанная на элементарных ячейках TPMS типа Schoen's IWP, с заполненным межпорным пространством  
 Fig. 2. Lattice based on TPMS Schoen's IWP-type unit cells, with filled inter-pore space

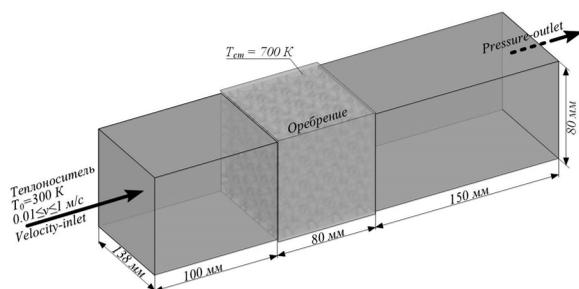


Рис. 3. Модель оребрения основанного на TPMS с граничными условиями  
Fig. 3. Finned model based on TPMS with boundary conditions

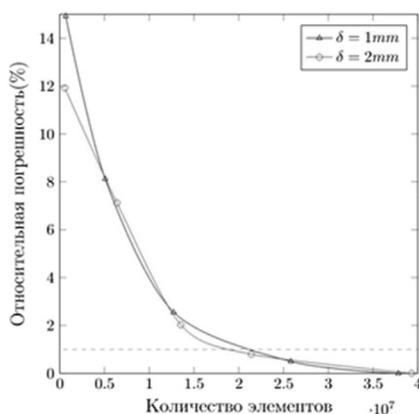


Рис. 4. Анализ независимости сетки  
Fig. 4. Mesh independence analysis

го эксперимента в ANSYS Fluent. Так, в теплообменное устройство с оребрением TPMS подается теплоноситель с скоростью от 0,01 до 1 м/с.

Температура подаваемого теплоносителя составляет 300 К. Ко всем боковым границам канала в области оребрения подводится тепло от пластины с температурой  $T_{ст} = 700$  К. Свойства теплоносителя и материала, из которого изготовлено оребрение и греющая пластина, представлены в таблице.

Однако численные методы конечных элементов при решении поставленной задачи имеют проблемы стабильности и сходимости расчетной модели. Мелкие численные ошибки могут быстро накапливаться в связи с нелинейностью рассматриваемого процесса, особенно в присутствии турбулентных режимов течения. В связи с этим проводится анализ чувствительности сетки для измерения точности моделирования в отношении количества ячеек сетки по температуре на выходе теплообменника. Расчетная сетка для компьютерного моделирования формировалась в модуле Ansys Fluent. Выбор вида сетки был основан на исследованиях теплообменных аппаратов с оребрением [24]. Сетка состоит из многогранных элементов с пограничным слоем

вблизи структур TPMS. Были приняты и сравнены пять размеров ячеек для двух геометрий TPMS оребрения с толщинами  $\delta = 1$  мм и  $\delta = 2$  мм. Разница температур на выходе из теплообменника, полученная на самой мелкой сетке, сравнивается с результатами, полученными на других сетках, и оценивается процентная разница. Результаты исследования независимости сетки двух моделей представлены на рис.4. Таким образом, для расчета использовались модели, процентное расхождение температур потока на выходе из теплообменника которых было меньше 1 % для экономии вычислительного времени и сохранения точности и стабильности расчета.

## Результаты

В ходе численного эксперимента переноса тепла в канале с оребрением на основе TPMS типа Schoen's IWP были получены профили скорости для различных скоростей теплоносителя. Исходя из рис. 5 толщина  $\delta$  незначительно влияет на форму потока при прохождении через оребрение. Так, увеличение толщины структуры смещает области завихрения и обратного тока, увеличивая кривизну основного потока, а также среднюю скорость потока. Повышение скорости в пористой вставке объясняется уменьшением пористости. В центрах ячейки наблюдаются завихрения, перемешивания и зоны обратного течения, которые препятствуют возникновению застойных областей и увеличивают теплоотдачу, что согласуется с другими исследованиями [15,17]. Также завихрения основного потока могут создавать винтовые движения по потоку, которые разрушают пограничный слой у поверхности оребрения, что улучшает коэффициент теплоотдачи.

Результаты текущего исследования теплопереноса в канале с оребрением на основе TPMS типа Schoen's IWP сравнены с результатами аналогичной задачи оребрения теплообменного устройства конструкцией TPMS Primitive[14] при равных характерных размерах:  $a = 20$  мм,  $\delta = 1$  мм и  $a = 20$  мм,  $\delta = 2$  мм. Результаты потерь давления и температуры на выходе из теплообменника с оребрением на основе поверхности Schoen's IWP и Primitive[14] представлены на рис. 6.

При скорости до 0,1 м/с теплообменное устройство с оребрением на основе Schoen's IWP демонстрирует увеличение переданной энергии до 18 % по сравнению с оребрением на основе Primitive. Увеличение потерь давления при этом составляет 42–48 % и, как отмечалось ранее, вызвано более сложной структурой потока, наличием завихрений, зон обратного течения, винтовых движений потока теплоно-

Свойства материалов, используемых в текущем исследовании  
 Properties of materials used in the current study

Область	Плотность, кг м <sup>-3</sup>	Теплопроводность, Вт м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	Теплоемкость, Дж кг <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	Вязкость, кг м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>
Теплоноситель	998,2	4182	998,2	1,003·10 <sup>-6</sup>
Оребрение	2719	871	2719	—

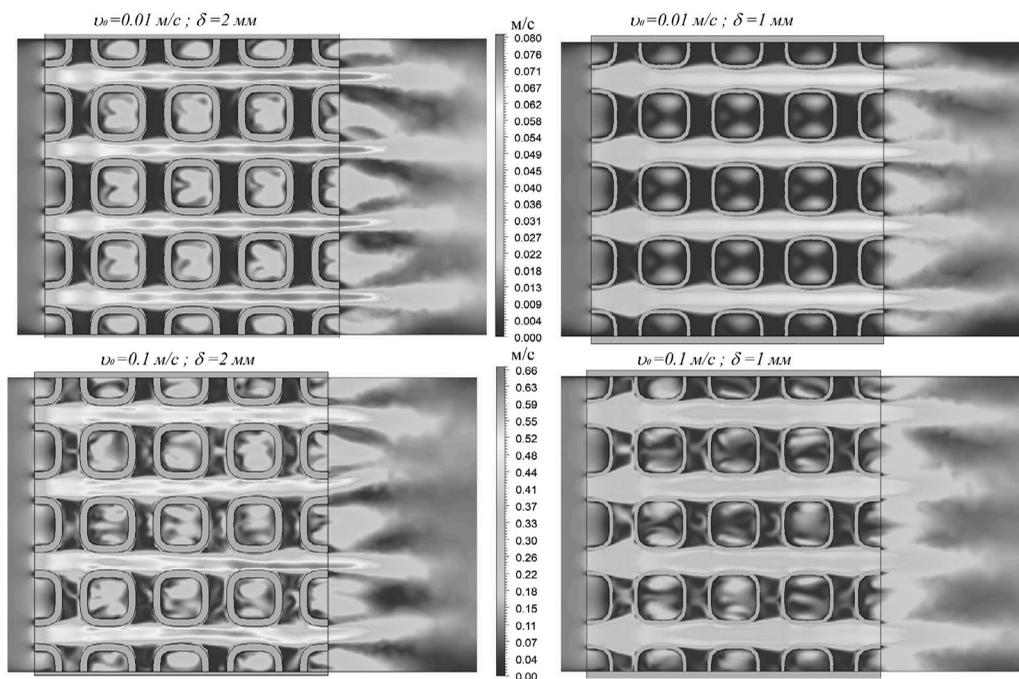


Рис. 5. Контуры распределения скорости теплоносителя в канале с оребрением  
 Fig. 5. Contours of coolant velocity distribution in the finned channel

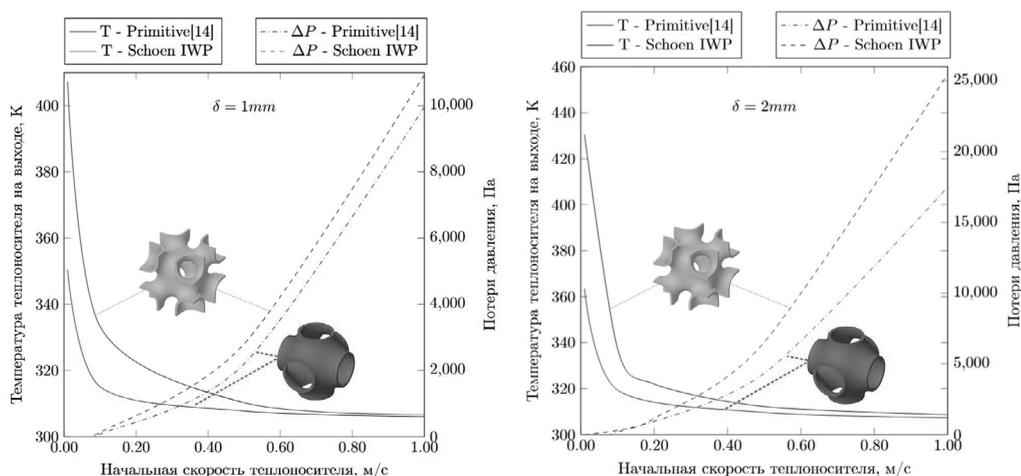


Рис. 6. Графики зависимости температуры и потерь давления от начальной скорости потока для канала с оребрением на основе Schoen's IWP и Primitive при геометрических характеристиках  $a = 20$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $\delta = 2$  мм

Fig. 6. Graphs of temperature and pressure loss dependence on initial flow velocity for the finned channel based on Schoen's IWP and Primitive with geometric characteristics  $a = 20$  mm,  $\delta = 1$  mm,  $\delta = 2$  mm

сителя. Увеличение эффективности теплопередачи может объясняться большей теплопроводностью конструкции, большей площадью поверхности, большей извилистостью потока, что, соответственно, увеличивает время взаимодействия между жидкостью и твердой стенкой.

При скорости более 0,1 м/с разность количества переданной энергии обеих моделей незначительна. Высокая скорость потока приводит к интенсификации перемешивания и турбулизации, а соответственно и увеличению теплообмена в обеих конструкциях. Однако при уменьшении скорости влияние застойных зон увеличивается, что приводит к заметному снижению эффективности теплоотдачи в теплообменном устройстве на основе Primitive. Трубочатая форма потока вставки Primitive при низких скоростях потока способствует переходу потока в ламинарный режим, в то время как структура Schoen's IWP турбулизирует поток за счет закручиваний даже на низких скоростях потока.

Несмотря на линейное влияние теплопроводности от толщины стенки при совмещенной задаче, увеличение толщины стенки не приводит к значительному росту переданной энергии. В первую очередь это можно объяснить большим влиянием коэффициента теплоотдачи на термическое сопротивление по сравнению с теплопроводностью. Таким образом, для повышения эффективности переноса тепла большее внимание необходимо уделять гибридным

оребрения, снижению объема застойных зон, дополнительной турбулизации потока.

На рис. 7 представлены профили распределения температуры теплоносителя при установившемся режиме при применении оребрения на основе Schoen's IWP и Primitive [14]. Исходя из рис. 6 при скорости 0,1 м/с в передаче тепловой энергии задействовано меньшее количество рядов оребрения в вставке Schoen's IWP по сравнению с Primitive и потенциал оребрения Schoen's IWP в таком случае раскрыт не полностью. Это также является причиной равенства температур теплоносителя на выходе из теплообменника при больших начальных скоростях потока. Таким образом, увеличение объема оребрения Schoen's IWP при тех же граничных условиях будет приводить лишь к росту гидравлического сопротивления. Однако при использовании материалов оребрения с большей теплопроводностью модель Schoen's IWP может демонстрировать значительное увеличение эффективности оребрения за счет увеличения количества задействованных в теплоотдаче рядов и, соответственно, эффективной площади теплообмена.

Исходя из полученных результатов при проектировании теплообменных систем, для увеличения количества переданной энергии рекомендуется использование структуры Schoen's IWP. При необходимости минимизировать потери давления применение оребрения на основе Primitive может быть использовано для интенсификации теплообмена.

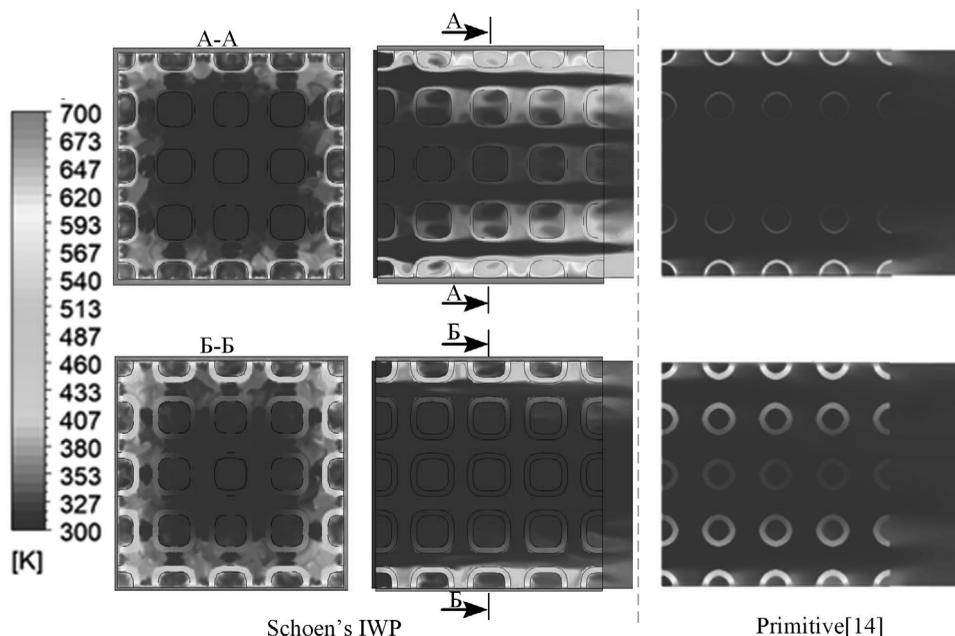


Рис. 7. Контуры распределения скорости теплоносителя в канале с оребрением на основе Schoen's IWP и Primitive при начальной скорости 0,1 м/с

Fig. 7. Velocity distribution contours of the heat carrier in a finned channel based on Schoen's IWP and Primitive at an flow velocity of 0.1 m/s

## Заключение

В работе представлено исследование тепломассопереноса в каналах с оребрением, основанным на трижды периодических минимальных поверхностях типа Schoen's IWP. Исследование проводилось при помощи численного эксперимента, реализованного в программном комплексе Ansys. Численные модели были разработаны с использованием ячеек различной толщины и сравнены с другим типом TPMS. Основные результаты следующие:

1. Увеличение толщины структуры приводит к изменениям формы потока, кривизны и турбулизации. Толщина стенки ячейки значительно изменила тепловые характеристики теплообменника.

2. Количество рядов оребрения необходимо прогнозировать в зависимости от скорости потока и граничных условий. В рамках текущего исследования продемонстрировано, что часть оребрения не задействовано в теплообмене при скоростях потока более 0,1 м/с.

3. Наблюдалось непрерывное затухание обратного потока внутри оребрения с уменьшением толщины стенки.

4. В работе определены зависимости потерь давления потока, температуры теплоносителя на выходе из теплообменника от скорости потока и геометрических характеристик оребрения.

5. Увеличение эффективности теплопереноса при внедрении TPMS конструкции Schoen's IWP в теплообменное устройство до 18 % по сравнению с оребрением на основе Primitive.

6. Использование конструкции Schoen's IWP увеличивает потери давления на 42–48 % по сравнению с конструкцией Primitive

Результаты исследования демонстрируют потенциал применения оребрения на основе TPMS поверхностей Primitive и Schoen's IWP. Однако для совершенствования оребрения необходимо рассмотреть и другие поверхности TPMS, которые могут повысить эффективность теплопередачи или снижение потерь давления потока, что является целью дальнейших исследований.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10044, [rscf.ru/project/23-79-10044/](https://rscf.ru/project/23-79-10044/).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Eremín A.V. et al. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2024. P. 1–17. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724
- Дьяченко С.В. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба / Л.А. Лебедева, М.М. Сычёва, Л.А. Нефёдова // *Журнал технической физики*. 2018. Т.88, №.7. С. 1014–1017. DOI: 10.1134/S1063784218070101.
- Gado M.G. et al. Adsorbent beds packed in triply periodic minimal surface-derived structures and their performance in adsorption desalination/cooling systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. V. 150. P. 107205. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107205
- Thomas N. et al. 3D printed triply periodic minimal surfaces as spacers for enhanced heat and mass transfer in membrane distillation. *Desalination*. 2018. V. 443. P. 256–271. DOI: 10.1016/j.desal.2018.06.009
- Gado M.G. Thermal management and heat transfer enhancement of electronic devices using integrative phase change material (PCM) and triply periodic minimal surface (TPMS) heat sinks. *Applied Thermal Engineering*. 2024. P. 124504. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124504
- Cheng Z. et al. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 170. P. 120902. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120902
- Fan Z., Gao R., Liu S. A novel battery thermal management system based on P type triply periodic minimal surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. V. 194. P. 123090. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123090
- Hsieh M.T., Valdevit L. *Minisurf A*. Minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing. *Software Impacts*. 2020. V. 6. P. 100026. DOI: 10.1016/j.simpa.2020.100026
- Attarzadeh R., Attarzadeh-Niaki S.H., Duwig C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 212. P. 118448. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118448
- Yeranee K., Rao Y. A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS). *Energies*. 2022. V. 15. N. 23. P. 8994. DOI: 10.3390/en15238994
- Брагин Д.М., Еремин А.В. Исследование тепловых свойств пористых полимерных материалов на основе минимальных поверхностей Шварца // *Инженерный вестник Дона*. 2023. №. 9 (105). С. 36.
- Брагин Д.М. Метод определения коэффициента эффективной теплопроводности пористого материала на основе минимальной поверхности типа Schoen's I-WP (R) / А.В. Еремин, А.И. Попов, А.С. Шульга // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. 2023. №. 2. С. 61–68.
- Qian C. et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of copper heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces (TPMS). *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. V. 152. P. 107292. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292
- Попов А.И., Еремин А.В., Кечин Н.Н. Исследование тепломассопереноса в канале с оребрением на

основе трижды периодической минимальной поверхности // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 49–56. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.07.

15. Брагин Д.М., Мустафин Р.М., Попов А.И., Зинина С.А., Еремин А.В. Исследование аэродинамических процессов в пористых материалах на основе трижды периодических минимальных поверхностей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 5. С. 66–78. DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-66-78.

16. Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. V. 231. P. 125863. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863

17. Bragin D., Karpilov I., Pashchenko D. Flow dynamics through cellular material based on a structure with triply periodic minimal surface. *Chemical Engineering Science*. 2024. P. 120291. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120291

18. Liang D. et al. Design, flow characteristics and performance evaluation of bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. V. 201. P. 123620. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123620

19. Brakke K.A. The surface evolver. *Experimental mathematics*. 1992. V. 1. N. 2. P. 141–165. DOI: 10.1080/10586458.1992.10504253

20. Rajagopalan S., Robb R.A. Schwarz meets Schwann: design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds. *Medical image analysis*. 2006. V. 10. N. 5. P. 693–712. DOI: 10.1016/j.media.2006.06.001

21. Kolken H.M.A. et al. Merging strut-based and minimal surface meta-biomaterials: Decoupling surface area from mechanical properties. *Additive Manufacturing*. 2022. V. 52. P. 102684. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102684

22. Курганова О.Ю., Кудинов И.В., Клеблеев Р.М., Стефанюк Е.В., Гаврилова Т.Е. Аналитический метод определения толщины отложений на внутренних поверхностях теплообменников // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 1. С. 20–24. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.4.

23. Курганова О.Ю. Применение дополнительных искомым функций и локальных систем координат в задачах теплопроводности для многослойных строительных конструкций // Градостроительство и архитектура. 2018. Т.8, № 3. С. 29–32. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.7.

24. Marcinkowski M. et al. Advancements in analyzing air-side heat transfer coefficient on the individual tube rows in finned heat exchangers: Comparative study of three CFD methods. *Energy*. 2024. V. 307. P. 132754. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132754

## REFERENCES

1. Eremin A.V. et al. Mechanical properties of porous materials based on new triply periodic and minimal surfaces. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2024. P. 1–17. DOI: 10.1080/15376494.2024.2303724

2. Dyachenko S.V., Lebedeva L.A., Sycheva M.M., Neyfodova L.A. Physical and mechanical properties of model material with topology of triplicate periodic surfaces of minimum energy of gyroid type in the form of cube. *Zhurnal tehnichej fiziki* [Journal of Technical Physics], 2018, vol. 88, no. 7, pp. 1014–1017. (in Russian) DOI: 10.1134/S1063784218070101

3. Gado M.G. et al. Adsorbent beds packed in triply periodic minimal surface-derived structures and their performance in adsorption desalination/cooling systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. V. 150. P. 107205. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107205

4. Thomas N. et al. 3D printed triply periodic minimal surfaces as spacers for enhanced heat and mass transfer in membrane distillation. *Desalination*. 2018. V. 443. P. 256–271. DOI: 10.1016/j.desal.2018.06.009

5. Gado M.G. Thermal management and heat transfer enhancement of electronic devices using integrative phase change material (PCM) and triply periodic minimal surface (TPMS) heat sinks. *Applied Thermal Engineering*. 2024. P. 124504. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124504

6. Cheng Z. et al. Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 170. P. 120902. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120902

7. Fan Z., Gao R., Liu S. A novel battery thermal management system based on P type triply periodic minimal surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. V. 194. P. 123090. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123090

8. Hsieh M.T., Valdevit L. Minisurf A. Minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing. *Software Impacts*. 2020. V. 6. P. 100026. DOI: 10.1016/j.simpa.2020.100026

9. Attarzadeh R., Attarzadeh-Niaki S.H., Duwig C. Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 212. P. 118448. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118448

10. Yeranee K., Rao Y. A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS). *Energies*. 2022. V. 15. N. 23. P. 8994. DOI: 10.3390/en15238994

11. Bragin D.M., Eremin A.V. Study of thermal properties of porous polymer materials based on minimal Schwartz surfaces. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Don Engineering Gazette], 2023, no. 9 (105), P. 36. (in Russian)

12. Bragin D.M., Eremin A.V., Popov A.I., Shulga A.S. Method for determining the coefficient of effective thermal conductivity of a porous material based on the minimum surface type Schoen's I-WP (R). *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Energy University], 2023, no. 2, pp. 61–68. (in Russian)

13. Qian C. et al. Experimental investigation on heat transfer characteristics of copper heat exchangers

based on triply periodic minimal surfaces (TPMS). International Communications in Heat and Mass Transfer. 2024. V. 152. P. 107292. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292

14. Popov A.I., Eremin A.V., Kechin N.N. Study of heat and mass transfer in a finned channel based on a three-time periodic minimum surface. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban planning and architecture], 2023, vol. 13, no.4, pp. 49–56. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.07

15. Bragin D.M., Mustafin R.M., Popov A.I., Zinina S.A., Eremin A.V. Study of aerodynamic processes in porous materials based on three periodic minimal surfaces. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki* [News of higher educational institutions. Energy challenges], 2024, vol. 26, no. 5, pp. 66–78. (in Russian) DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-66-78

16. Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. V. 231. P. 125863. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863

17. Bragin D., Karpilov I., Pashchenko D. Flow dynamics through cellular material based on a structure with triply periodic minimal surface. Chemical Engineering Science. 2024. P. 120291. DOI: 10.1016/j.ces.2024.120291

18. Liang D. et al. Design, flow characteristics and performance evaluation of bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. V. 201. P. 123620. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123620

19. Brakke K.A. The surface evolver. Experimental mathematics. 1992. V. 1. N. 2. P. 141–165. DOI: 10.1080/10586458.1992.10504253

20. Rajagopalan S., Robb R.A. Schwarz meets Schwann: design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds. Medical image analysis. 2006. V. 10. N. 5. P. 693–712. DOI: 10.1016/j.media.2006.06.001

21. Kolken H.M.A. et al. Merging strut-based and minimal surface meta-biomaterials: Decoupling surface area from mechanical properties. Additive Manufacturing. 2022. V. 52. P. 102684. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102684

22. Kurganova O.Yu., Kudinov I.V., Klebleev R.M., Stefanyuk E.V., Gavrilova T.E. Analytical method for determining the thickness of deposits on the internal surfaces of heat exchangers. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban planning and architecture], 2019, vol. 9, no. 1, pp. 20–24. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.01.4

23. Kurganova O.Yu. Application of additional desired functions and local coordinate systems in thermal conductivity problems for multilayer building structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban planning and architecture], 2018, vol. 8, no. 3, pp. 29–32. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.03.7

24. Marcinkowski M. et al. Advancements in analyzing air-side heat transfer coefficient on the individual tube rows in finned heat exchangers: Comparative study of three CFD methods. Energy. 2024. V. 307. P. 132754. DOI: 10.1016/j.energy.2024.132754

Об авторах:

#### **ЕРЕМИН Антон Владимирович**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой промышленной  
теплоэнергетики  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: a.v.eremin@list.ru

#### **EREMIN Anton V.**

Doctor of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
Head of the Industrial Thermal Power Engineering Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244  
E-mail: a.v.eremin@list.ru

#### **БРАГИН Дмитрий Михайлович**

ассистент, младший научный сотрудник кафедры  
промышленной теплоэнергетики  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: dimabragin2204@yandex.ru

#### **BRAGIN Dmitry M.**

Assistant, Junior Researcher of the Industrial Thermal  
Power Engineering Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244  
E-mail: dimabragin2204@yandex.ru

Для цитирования: *Еремин А.В., Брагин Д.М. Тепломассоперенос в канале с оребрением на основе трижды периодической поверхности типа SCHOEN'S IWP // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 1. С. 18–26. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.03.*

For citation: Eremin A.V., Bragin D.M. Heat and mass transfer in a channel with fins based on a triply periodic surface of the SCHOEN'S IWP type. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 1, pp. 18–26. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.01.03.