



ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Брагин Д.М., Мустафин Р.М., Попов А.И., Зинина С.А., Еремин А.В.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

dimabragin2204@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ работы заключается в исследовании новых пористых материалов для применения в компактных высокоэффективных теплообменных устройствах. ЦЕЛЬ. Изучить гидро-аэродинамические свойства потоков, проходящих через пористые вставки на основе топологий трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП). Разработать методику исследования пористых материалов с упорядоченной пространственной структурой. Определить потенциально пригодные для применения в теплообменном оборудовании пористые материалы на основе ТПМП. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач были использованы численные (CFD) и экспериментальные методы. Для численного моделирования использовалось программное обеспечение Ansys Fluent 2019 R3. Опытные образцы для натурного эксперимента, проводимого на лабораторной установке ВЕНТ-08-7ЛР-01, были изготовлены при помощи аддитивных технологий SLA. Пористость образцов варьировалась от 0,73 до 0,89. Эксперимент проводился при скорости на входе в трубку от 0,3 до 4,5 м/с. РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам исследования получены новые эмпирические зависимости потерь давления от скорости потока для вставок на основе поверхностей: Primitive (P), Fischer Koch S (FKS), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP). Воздушный поток при прохождении через структуру N демонстрировал наибольшие потери давления, в то время как через структуру P потери при той же скорости были меньше в 8 раз. В пористых вставках выявлены застойные области, которые могут оказывать отрицательное воздействие на теплопередачу. Определены изменения локальной скорости потока в пористых вставках, коррелирующие с просветностью вставки. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования могут быть использованы для проектирования систем охлаждения с оребрением на основе ТПМП. Исходя из проведенного анализа распределения векторного поля скоростей и потерь давления, структуры FKS и IWP могут потенциально быть использованы в теплообменном оборудовании.

Ключевые слова: потери давления; пористый материал; оребрение; Primitive; Fischer Koch S; Neovius; Schoen's I-WP; трижды периодические минимальные поверхности.

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

Для цитирования: 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.

INVESTIGATION OF AERODYNAMIC PROCESSES IN POROUS MATERIALS BASED ON TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACES

Bragin D.M., Mustafin R.M., Popov A.I., Zinina S.A., Eremin A.V.

Samara State Technical University, Samara, Russia

dimabragin2204@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE: The relevance of this work lies in the study of new porous materials for use in compact, highly efficient heat exchange devices. **PURPOSE:** To investigate the hydro-aerodynamic properties of flows passing through porous inserts based on triply periodic minimal surface (TPMS) topologies. To develop a methodology for studying porous materials with ordered structures. To identify potentially suitable TPMS-based porous materials for application in heat exchange equipment. **METHODS:** Numerical (CFD) and experimental methods were used to address the research objectives. Ansys Fluent 2019 R3 software was utilized for numerical modeling. Experimental samples for the physical experiments conducted on the VENT-08-7LR-01 laboratory setup were fabricated using SLA additive technologies. The porosity of the samples ranged from 0.73 to 0.89. The experiment was conducted with inlet velocities ranging from 0.3 to 4.5 m/s. **RESULTS:** New empirical dependencies of pressure drop on flow velocity were obtained for inserts based on the surfaces: Primitive (P), Fischer Koch S (FKS), Neovius (N), and Schoen's I-WP (IWP). The airflow through the N structure showed the highest pressure drop, while the P structure had 8 times less pressure drop at the same velocity. Stagnation zones, which can negatively impact heat transfer, were identified in the porous inserts. Changes in local flow velocity in the porous inserts were determined to correlate with the insert's transparency. **CONCLUSION:** The research results can be used for designing cooling systems with TPMS-based ribbing. Based on the analysis of the velocity vector field distribution and pressure drops, the FKS and IWP structures have potential applications in heat exchange equipment.

Keywords: Pressure Drop; Porous Material; Ribbing; Primitive; Fischer Koch S; Neovius; Schoen's I-WP; Triply periodic minimal surface.

Acknowledgments: This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 23-79-10044, rscf.ru/project/23-79-10044/.

For citation: Bragin D.M., Mustafin R.M., Popov A.I., Zinina S.A., Eremin A.V. Investigation of aerodynamic processes in porous materials based on triply periodic minimal surfaces. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 66-78. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-66-78.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

Компактное теплообменное оборудование находит применение в различных областях энергетики, машиностроения и т. д. Переход к компактным теплообменным аппаратам вызван необходимостью снижения их веса, объема и повышения мощности. Несмотря на развитие традиционного теплообменного оборудования, достижение оптимальных массогабаритных характеристик, низкого гидравлического сопротивления при высокой мощности ограничено их конструктивными особенностями [1]. В этой связи активно разрабатываются конструкции высокопроизводительных теплообменных устройств на основе новых методов проектирования теплообменных трактов [2]. В частности, для интенсификации теплообмена в теплообменных устройствах используются пористые материалы. Внедрение таких материалов повышает интенсивность теплообмена [3] и энергоэффективность [4, 5] с увеличением пористости.

Одними из наиболее перспективных пористых материалов для применения в теплообменных устройствах являются структуры на основе ТПМП (трижды периодических минимальных поверхностей). По сравнению с традиционными пористыми материалами структуры ТПМП обладают большей площадью поверхности [6], коэффициентами теплопередачи [7] и структурной прочностью [8] при аналогичных массогабаритных характеристиках. Так, например, тепловые свойства гироидной решетки на 55-136% превосходили аналогичные характеристики ребренного теплообменника [9].

По сравнению с другими пористыми структурами ТПМП также имеет ряд преимуществ. Структуры ТПМП описываются строгими математическими уравнениями, что позволяет регулировать теплопередающие свойства, изменяя геометрические параметры структуры, включая размер конструкций, период поверхности уровня, толщину стенки, пористость, площадь поверхности. Кривизна ТПМП равна нулю, что исключает резкие изменения направлений потока внутри структуры и соответственно снижает потери давления [10]. Особенность ТПМП делить пространство на два и более непересекающихся объема/лабиринта позволяет использовать такую структуру в рекуперативных теплообменниках с большой площадью теплообмена [11].

Наиболее перспективными среди исследованных на данный момент структур ТПМП являются поверхности Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP) и Fischer Koch S (FKS). Использование структуры «P» в системе управления температурой аккумулятора с жидкостным охлаждением увеличивает рассеивания тепла на 25,2%, по сравнению с однородными листовыми конструкциями [12]. Структуры «N» и «IWP» интенсифицирует теплообмен за счет периодического ускорения и замедления потока, сопровождаемого вихрями, генерируемыми для улучшения перемешивания жидкости [13]. Структура «FKS» обладает наибольшей удельной площадью поверхности среди других ТПМП, описанных выше [14]. Конвективная составляющая теплопередачи в «FKS» больше, чем в «IWP» и «P» на 78% и 96% соответственно.

Предыдущие исследования демонстрируют значительное увеличение эффективности при сокращении массы и объема теплообменного оборудования. Однако на данный момент не в полной мере исследованы гидродинамические процессы в ТПМП структурах, в частности, остаются неопределенными потери давления при прохождении через пористую вставку. Более того, любое изменение структурных параметров (пористость, размер и геометрия пор) оказывают влияние на гидродинамические процессы [15].

Определение потерь давления является одной из важнейших задач расчета теплообменного оборудования. Цель настоящего исследования заключается в определении потерь давления потока при прохождении через пористую вставку на основе четырех ТПМП топологии Primitive (P), Neovius, Schoen's I-WP и Fischer Koch S (FKS). Исследование выполнялось на основе численного моделирования и натуральных экспериментов. Научная значимость исследования заключается в определении зависимостей потерь давления в пористых вставках на основе ТПМП и выявлении застойных зон. Практическая значимость заключается в определении потенциально пригодных для применения в теплообменном оборудовании пористых материалов на основе ТПМП. Ожидается, что данное исследование станет основой для будущей разработки компактных и эффективных теплообменников для прикладного применения в системах терморегулирования.

Материалы и методы (Materials and methods)

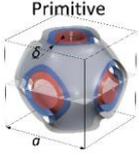
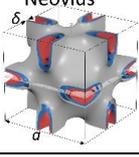
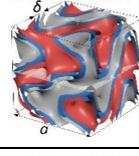
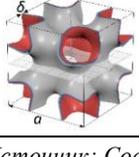
Формирование каналов и стенки ТПМП.

Таблица 1

Table 1

Уравнения ТПМП

TPMP equations

Название и изображение ТПМП	Общее уравнение нулевой поверхности уровня [16]	Частное уравнения поверхностей уровня $f(x, y, z, a) = \delta$ при $a = 10$ мм и $\delta = 0,5$ мм
 <p>Primitive</p>	$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0$	$\cos(2\pi x/10) + \cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi z/10) = \pm 0,25$
 <p>Neovius</p>	$3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4\cos(x)\cos(y)\cos(z) = 0$	$3[\cos(2\pi x/10) + \cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi z/10)] + 4\cos(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) = \pm 0,25$
 <p>Fischer Koch S</p>	$\cos(2x)\sin(y)\cos(z) + \cos(x)\cos(2y)\sin(z) + \sin(x)\cos(y)\cos(2z) = 0$	$\cos(4\pi x/10)\sin(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) + \cos(2\pi x/10)\cos(4\pi y/10)\sin(2\pi z/10) + \sin(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10)\cos(4\pi z/10) = \pm 0,25$
 <p>Schoen's I-WP</p>	$2[\cos(x)\cos(y) + \cos(y)\cos(z) + \cos(z)\cos(x)] - [\cos(2x) + \cos(2y) + \cos(2z)] = 0$	$2[\cos(2\pi x/10)\cos(2\pi y/10) + \cos(2\pi y/10)\cos(2\pi z/10) + \cos(2\pi z/10)\cos(2\pi x/10)] - [\cos(4\pi x/10) + \cos(4\pi y/10) + \cos(4\pi z/10)] = \pm 0,25$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Решетка ТПМП описывается поверхностями уровня, представленными в таблице 1. Величина δ является параметром смещения эквидистантных поверхностей от нулевой поверхности уровня ТПМП. Область, ограниченная эквидистантными поверхностями, образует стенку. Такие конструкции с конечной толщиной стенок δ из однородного материала известны как «листовые конструкции ТПМП» или «структуры ТПМП». Таким образом, вся геометрия структуры ТПМП с жидкостью в межпоровом пространстве может быть описана выражением:

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

где $\delta/2$ – константа уровня, определяющая параметр смещения эквидистантной поверхности и, соответственно, область Ω пористой вставки. Области Ω_1 и Ω_3 соответствуют полному набору извилистых путей в пористой вставке. Далее эти области будут называться каналами. Таким образом в ТПМП пористой вставке формируются два отдельных непересекающихся канала разделенных структурой ТПМП.

Размеры стенки и каналов могут быть изменены путем регулировки периода a , а также значения параметра смещения δ . Эти параметры напрямую влияют на другие характерные размеры, например, гидравлический диаметр, пористость. Для исследования пористых вставок на основе различных топологий ТПМП были выбраны постоянные одинаковые периоды $a = 10$ мм, а также одинаковые смещения $\delta = 0,5$ мм.

CFD моделирование.

В статье падение давления и форма течения в пористых вставках на основе ТПМП исследовалась с применением численного моделирования в программном комплексе Ansys Fluent 2019 R3. Воздушный поток внутри пористой вставки является турбулентным из-за высокого числа Рейнольдса и постоянного изменения сечения канала потока [17]. Для моделирования выбрана широко используемая модель турбулентности k-omega SST, поскольку она позволяет точно прогнозировать перепад давления. Чтобы поддерживать равный массовый расход на входе и выходе модели, уравнение неразрывности решается для установившегося потока:

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

Уравнение сохранения импульса в декартовой тензорной форме записывается как:

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

В этой модели не исследовались теплопередающие свойства структур ТПМП. Однако уравнение энергии было использовано для реализации свойств воздуха (вязкости и плотности) со значениями, соответствующими рабочей температуре 301 К. Уравнение энергии для турбулентного потока имеет следующий вид:

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

Скорость на входе варьировалась от 0,9 м/с до 5 м/с. Температура воздуха выбрана постоянной и составляет 301 К.

Сетка для геометрий создается в модуле Ansys Fluent и представлена на рисунке 16. Выбор вида сетки был основан на исследованиях теплообменных аппаратов с оребрением [18]. Сетка состоит из многогранных элементов с пограничным слоем вблизи структур ТПМП. Анализ чувствительности сетки проводился для измерения точности моделирования в отношении количества ячеек сетки. Были приняты и сравнены пять размеров ячеек для каждой геометрии ТПМП. Перепад давления, полученный на самой мелкой сетке, сравнивался с результатами, полученными на других сетках, и оценивалась процентная разница. Результаты исследования независимости сетки представлены на рисунке 2. Таким образом, для расчета использовались модели, процентное расхождение потерь давления которых было меньше 1% для экономии вычислительного времени и сохранения точности расчета.

Натурный эксперимент.

Для проведения натуральных экспериментов были использованы опытные образцы, представленные на рисунке 2а.

Изготовление экспериментальных образцов структур ТПМП возможно с

использованием аддитивных технологий селективного лазерного плавления (SLM), а также стереолитографии (SLA) [9]. Для текущего исследования были изготовлены 4 опытных образца с параметрами, представленными в таблице 2. После изготовления каждого опытного образца выполняются этапы последующей обработки с удалением остатков материалов, поддержек для 3D-печати, и т. д.

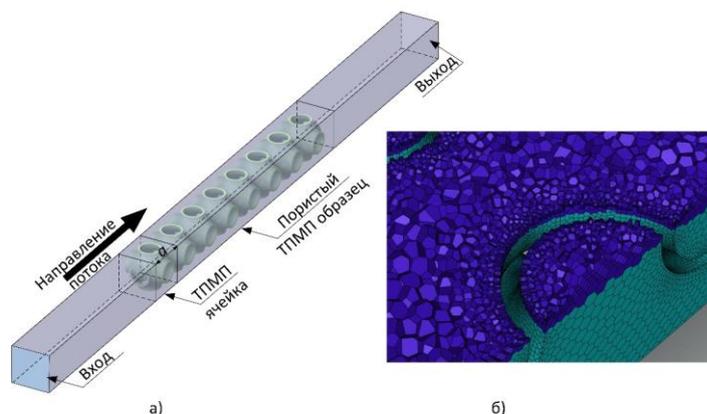


Рис. 1. а) схема проводимого эксперимента; Fig. 1. a) schematic of the conducted experiment; б) расчетная сетка для CFD моделирования b) computational mesh for CFD modeling

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2

Table 2

Опытные образцы

Test samples

Наименование	Количество ячеек, шт	Размеры образца, мм	Пористость	Площадь поверхности, мм ²	Толщина стенки, мм
Primitive	5x5x10	50x50x100	0,89	457	0.5
Neovius	5x5x10	50x50x100	0.83	649	0.5
Schoen's I-WP	5x5x10	50x50x100	0.83	671	0.5
Fischer Koch S	5x5x10	50x50x100	0,73	984	0.5

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эксперимент проводился на Лабораторной установке ВЕНТ-08-7ЛР-01 (рис. 3). Установка состоит из следующего оборудования: воздухозаборник, осевой вентилятор № 1, сотовый выпрямитель потока № 2, воздухонагреватель № 3, воздуховод № 4, переходник воздуховода с квадратного на круглый № 5, опытный образец № 6, манометр дифференциального давления № 7, трубка Пито № 8 и панель управления № 9. Сотовый выпрямитель используется для подавления осевой составляющей потока, нагнетаемого осевым вентилятором. Постоянная температура, а соответственно, постоянная плотность и вязкость поддерживается воздухонагревателем. В квадратном воздуховоде размещен опытный образец на базе ТПМП таким образом, чтобы весь поток проходил через внутреннее пространство образца. Расстояние между опытным образцом и переходником № 5 составляет 400 мм, чтобы исключить влияние переходных процессов. При прохождении воздушного потока через опытный образец поток теряет давление из-за высокого местного сопротивления. Манометр дифференциального давления измеряет падение давления. Скорость потока измеряется трубкой Пито рядом с выходным отверстием воздуховода. Дифференциальный манометр и трубка Пито подключены к панели управления, которая преобразует данные в цифровой формат и отображает их на дисплее. Частота вращения вентилятора варьировалась от 700 до 3000 об/мин, изменяя скорость воздушного потока от 0,3 до 4,5 м/с. Каждый эксперимент повторялся пять раз при одних и тех же рабочих и граничных условиях для определения диапазона неопределенности.

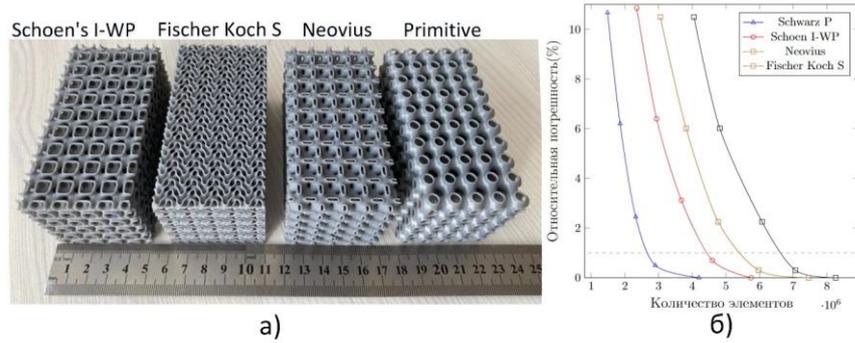


Рис. 2. а) фото опытных образцов структур Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP) и Fischer Koch S (FKS) б) анализ независимости сетки

Fig. 2. a) photos of test samples with Primitive (P), Neovius (N), Schoen's I-WP (IWP), and Fischer Koch S (FKS) structures; b) grid independence analysis

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

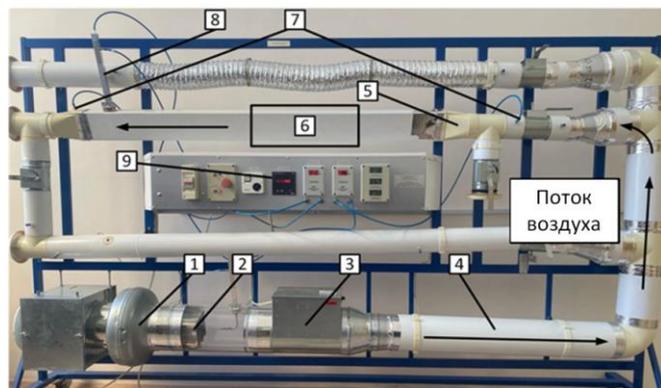


Рис. 3. Лабораторная установка ВЕНТ-08-7ЛР-01

Fig. 3. Laboratory setup VENT-08-7LR-01

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты численного моделирования потока, проходящего через структуры ТПМП, представлены на рисунке 4.

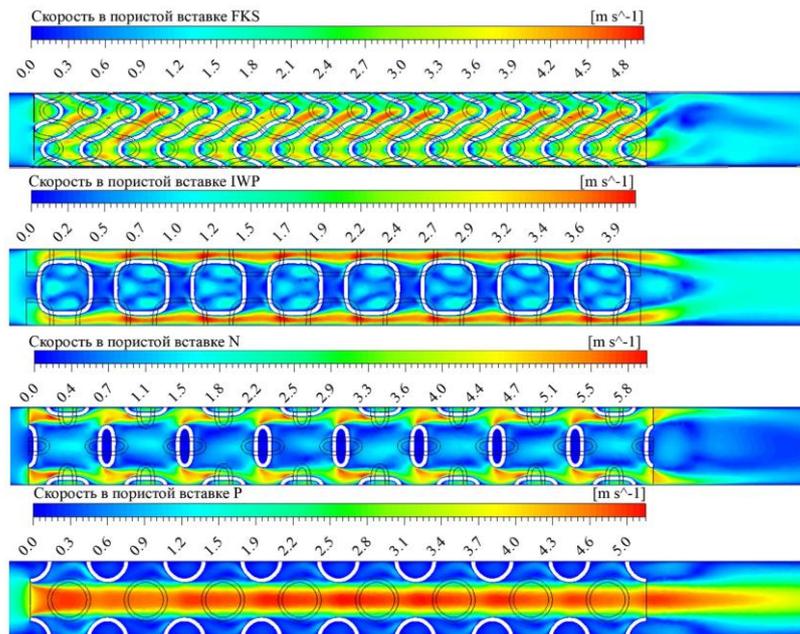


Рис. 4. Векторное поле распределения скорости потока в пористых вставках ТПМП при скорости на входе 0,9 м/с

Fig. 4. Vector field distribution of flow velocity in TPMS porous inserts at an inlet velocity of 0.9 m/s

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из распределения скорости, выявлены застойные (мертвые зоны), которые могут оказывать отрицательное влияние на теплоотдачу в пористых вставках. Форма потока во всех пористых вставках для первых двух ячеек незначительно отличается от последующих, что может увеличивать интенсивность теплообмена на начальной области пористой вставки [19]. У вставки FKS застойные области между ячейками практически отсутствуют, распределение скорости равномернее по сравнению с другими рассмотренными вставками. Важно отметить, что основной поток контактирует практически со всей поверхностью пористой вставки FKS, что важно для интенсификации теплоотдачи. Площадь теплообмена структуры FKS больше, чем у структуры P [14], N [20], IWP на 186,52 и 46% соответственно.

Во вставке IWP и N внутри ячеек наблюдаются зоны обратного течения и, соответственно, дополнительная турбулизация потока, что согласуется с аналогичным исследованием [13]. Обратные течения и турбулентность потока играют доминирующую роль в усилении теплоотдачи, что необходимо учитывать при расчете теплообменных аппаратов [21]. Обратные течения вызваны ударами основного потока в стенку ячейки, что приводит к дополнительным потерям давления. В пористой вставке IWP по краям ячейки имеются области со скоростью до 4 раз выше, чем средняя скорость потока. В пористой вставке P основной поток имеет трубчатую форму. На выходе из ячейки поток имеет форму сопла с максимальной скоростью до 5 раз выше, чем средняя по сечению. Вне трубчатого потока наблюдаются незначительные завихрения и застойные области. Площадь контакта основного потока и структуры P имеет минимальное значение по сравнению с другими рассмотренными ТПМП.

Кроме изменений направлений потока во всех ТПМП вставках также наблюдается локальная изменчивость скорости, которая коррелируется с просветностью структуры (рис. 5). У вставки Primitive количество экстремумов локальной скорости и средняя скорость (1,08 м/с) по сравнению с другими вставками минимальны. Изменение локальной скорости более плавны/сглажены. У вставок IWP и N наблюдаются наибольшие максимумы производной локальной скорости, а графики изменения скорости схожи. Максимальное количество экстремумов (16) и наибольшая средняя скорость (1,25 м/с) наблюдаются во вставке FKS.

На рисунке 6 представлены контуры падения давления в различных пористых вставках. Для всех пористых вставок наблюдается дифференциация потерь давления при переходе из одной ячейки в другую. Соответственно, целесообразно рассматривать падение давления в пористой вставке как сумму потерь в каждой ячейке по ходу движения потока (рис. 7). Таким образом, общее уравнение потерь давления потока в пористой вставке может быть представлено эмпирической зависимостью:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{c v^{1.75}}{a}, \quad (1)$$

где L – длина пористой вставки; c – коэффициент, зависящий от заданной температуры потока, вязкости, плотности, размера пор и пористости, представлен в таблице 3. В дальнейших работах планируется определить коэффициент « c » как функцию от этих параметров.

Таблица 3
Table 3

Коэффициент « c » для уравнения потерь давления (1)
Coefficient “ c ” for pressure loss equation (1)

Primitive	Neovius	Schoen's I-WP	Fischer Koch S
3.9	32	6	13.8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

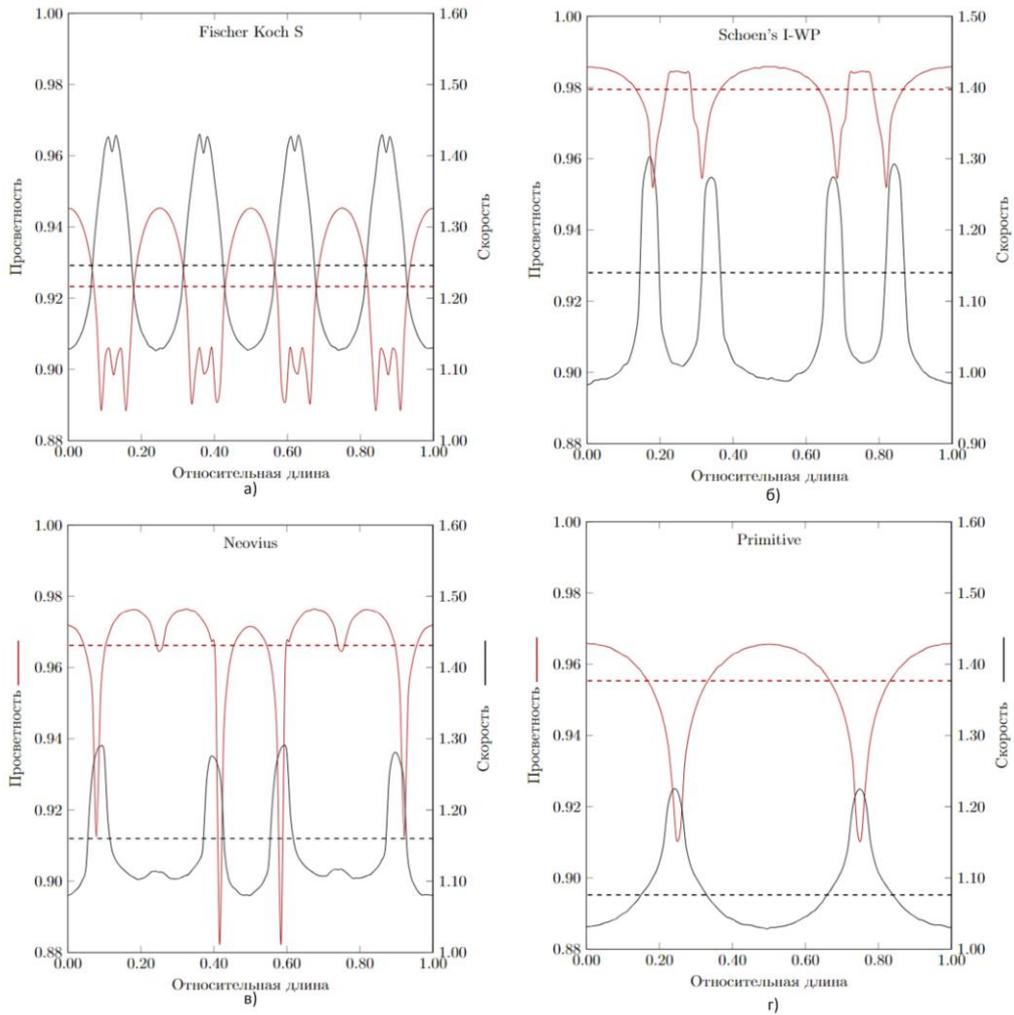


Рис. 5. Локальная изменчивость средней скорости в направлении движения потока в ячейке ТПМП в зависимости от просветности: а) вставка FKS; б) вставка IWP; в) вставка N; г) вставка P

Fig. 5. Local variability of mean velocity in the flow direction in a TPMS cell depending on porosity: a) FKS insert; b) IWP insert; c) N insert; d) P insert

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Воздушный поток, проходя через пористую вставку Primitive, теряет наименьшее давление среди исследуемых структур. Это объясняется наибольшей пористостью, минимальной средней скоростью потока и прямолинейной трубчатой формой основного потока с минимальным количеством сужений/расширений, что препятствует возникновению обратных течений, снижает влияние ударов основного потока о структуру. Также трубчатая форма потока в пористых материалах сокращает извилистость течения, что приводит к сокращению пути и, соответственно, снижению потерь давлений [22].

Поток воздуха, проходящий через пористую вставку IWP, теряет давление на 54% больше, чем через вставку P. Это связано с большей извилистостью, средней скоростью и количеством экстремумов изменений локальной скорости по сравнению с вставкой P. Несмотря на схожесть форм пористых вставок IWP и N, потери в последней больше в 5 раз. Это объясняется тем, что во вставке N основной поток ударяется в стенку, что способствует возникновению значительных обратных течений по всему объему ячейки и соответственно дополнительным потерям давления. Более того, у вставки N наблюдается четыре области с максимальным, среди рассмотренных вставок, изменением просветности (0,05-0,085), что приводит к изменениям локальной скорости и направлению потока.

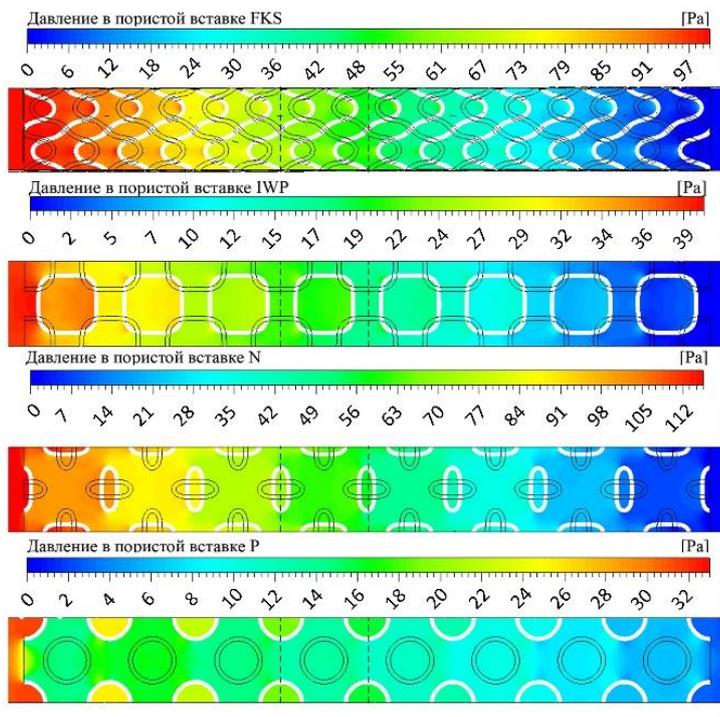


Рис. 6. Падение давления в пористой вставке при скорости 0,9 м/с *Fig. 6. Pressure drop in the porous insert at a velocity of 0.9 m/s*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

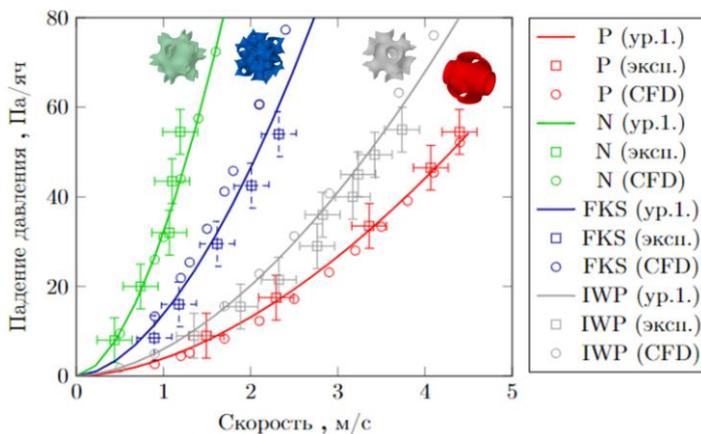


Рис. 7. Падение давления на 1 ячейку ТПМП от скорости. Численные (CFD) и натурные (эксп.) эксперименты, эмпирическая зависимость *Fig. 7. Pressure drop per unit TPMS cell as a function of velocity. Numerical (CFD) and experimental results, empirical relationship (Eq. 1) (ур. 1)*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Несмотря на наибольшую извилистость потока и максимальное количество экстремумов во вставке FKS, потери давления в ней меньше, чем в N на 130%. Это объясняется плавными поворотами основного потока и минимальными застойными областями по сравнению с другими пористыми вставками. Также у вставки FKS большинство экстремумов просветности не приводят к значительным изменениям скорости и направления потока, что согласуется с другими аналогичными исследованиями [13].

Закключение (Conclusions)

В настоящей работе были исследованы характеристики воздушного потока в пористых вставках на основе четырех поверхностей ТПМП: Primitive, Neovius, Schoen I-WP, Fischer Koch S. Численный и экспериментальный методы были использованы для определения эмпирического уравнения потерь давления от скорости в различных пористых вставках при различных граничных условиях.

Основные результаты, следующие:

1. Определены формы воздушного потока, проходящего через пористые вставки.

Выявлены застойные области, которые могут отрицательно сказываться на теплопередачу в пористых вставках.

2. Представлены графики изменения локальной скорости потока в пористых вставках, коррелирующие с просветностью. Минимальные изменения локальной скорости по сравнению с другими пористыми вставками наблюдаются в вставке Primitive.

3. Получено эмпирическое уравнения потерь давления потока от скорости при прохождении через различные пористые вставки.

4. Максимальное падение давления потока демонстрирует вставка Neovius, в то время как вставка Primitive при этой же скорости имеет падение давления в 8 раз меньше.

Результаты исследования могут стать основой для будущей разработки компактных и эффективных теплообменников. Структура Primitive имеет ряд недостатков для применения в теплообменном оборудовании, в частности обширные (более 30% объема) застойные области и меньшая по сравнению с другими ТППП площадь контакта основного потока со структурой. Структура N может потенциально быть использована в тепломасообменном оборудовании, однако потери давления, вызванные ударами потока и обратными течениями, снижают безразмерный коэффициент Кольберна. Исходя из проведенного анализа распределения векторного поля скоростей и потерь давления, структуры FKS и IWP могут потенциально быть использованы в теплообменном оборудовании. Вставка FKS имеет максимальные среди рассмотренных площадь контакта и минимальные застойные области. Вставка IWP обладает большей площадью поверхности и меньшими потерями давления в 5 раз по сравнению с вставкой N.

В дальнейшем планируется проведение расширенного исследования структур FKS и IWP, в которых будет учтено влияние переменной вязкости, пористости и других факторов, влияющих на безразмерный коэффициент Кольберна.

Литература

1. Gürel B. et al. Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern //Applied Thermal Engineering. – 2020. – Т. 175. – С. 115309. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115309
2. 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. – Т. 212. – С. 118448. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118448
3. Рыдалина Н.В., Аксенов Б.Г., Степанов О.А., Антонова Е.О. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3 С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13
4. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Талипова А.Р., Шакурова Р.З., Гилязов А.И. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №1 (53). С. 56-64.
5. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Ваньков Ю.В., Ахметова И.Г., Шакурова Р.З., Талипова А.Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 55-69. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-69
6. 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. – Т. 15. – №. 23. – С. 8994. doi.org/10.3390/en15238994
7. Alteneiji M. et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers //Energy Storage and Saving. – 2022. – Т. 1. – №. 3. – С. 153-161. doi.org/10.1016/j.enss.2022.04.005
8. Qiu N. et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures //International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Т. 261. – С. 108657. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108657
9. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова Р.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 82-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104.
10. 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. – Т. 152. – С. 107292. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292
11. Dharmalingam L. K., Aute V., Ling J. Review of triply periodic minimal surface (TPMS) based heat exchanger designs. – 2022.

12. 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. – Т. 194. – С. 123090. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123090
13. Wang J. et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) //Energy Conversion and Management. – 2023. – Т. 283. – С. 116955. doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116955
14. Knödler P., Dreissigacker V. Fluid Dynamic Assessment and Development of Nusselt Correlations for Fischer Koch S Structures //Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 3. – С. 688. doi.org/10.3390/en17030688
15. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.
16. Hsieh M. T., Valdevit L. Minisurf–A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing //Software Impacts. – 2020. – Т. 6. – С. 100026. doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100026
17. Yeranee K. et al. Turbulent Flow Heat Transfer and Thermal Stress Improvement of Gas Turbine Blade Trailing Edge Cooling with Diamond-Type TPMS Structure //Aerospace. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 37. doi.org/10.3390/aerospace11010037
18. Бадретдинова Г.Р., Калимуллин И.Р., Зинуров В.Э., Дмитриев А.В. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 176-186. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.
19. Соловьева О. В., Яфизов Р. Р., Соловьев С. А. Определение эффективной длины пористой структуры при конвективном теплообмене //Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. №. 3 (47). С. 113-122.
20. Iyer J. et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces //Applied Thermal Engineering. – 2022. – Т. 209. – С. 118192. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118192
21. Фарахов Т.М., Лаптев А.Г. Моделирование температурных профилей и эффективности теплообменных аппаратов с интенсификаторами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 12-18. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-12-18
22. Sauermoser-Yri M. et al. On the porosity-dependent permeability and conductivity of triply periodic minimal surface based porous media //journal of materials research and technology. – 2023. – Т. 27. – С. 585-599. doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.242

Авторы публикации

Брагин Дмитрий Михайлович – мл. науч. сотр. кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: dimabragin2204@yandex.ru.

Мустафин Равиль Мансурович – ст. преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика». Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0003-3784-2829>. Email: ravil-bk211@mail.ru.

Попов Андрей Игоревич – ст. преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: popov.ai@samgtu.ru.

Зинина Софья Алексеевна – мл. науч. сотр. кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0009-0002-9104-1336>. Email: sofazinina4@gmail.com.

Еремин Антон Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Самарский государственный технический университет. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>. Email: a.v.eremin@list.ru.

References

1. Gürel B. et al. Investigation on flow and heat transfer of compact brazed plate heat exchanger with lung pattern //Applied Thermal Engineering. – 2020. – Т. 175. – С. 115309. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115309

2. 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. – Т. 212. – С. 118448. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118448
3. Rydalina NV, Aksenov BG, Stepanov OA, Antonova EO. Application of porous materials in heat exchangers of heat supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.
4. Soloveva OV, Solovev SA, Talipova AR, Shakurova RZ, Gilyazov AI. Study of the influence of the porosity of a fibrous material on the energy efficiency value. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022;14;1(53):56-64.
5. Soloveva OV, Solovev SA, Vankov YuV, Akhmetova IG, Shakurova RZ, Talipova AR. Determination of the effect of the open cell foam material geometry on the value of energy efficiency. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(3):55-69. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-69
6. 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. – Т. 15. – №. 23. – С. 8994. doi.org/10.3390/en15238994
7. Alteneiji M. et al. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers // *Energy Storage and Saving*. – 2022. – Т. 1. – №. 3. – С. 153-161. doi.org/10.1016/j.enss.2022.04.005
8. Qiu N. et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2024. – Т. 261. – С. 108657. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108657
9. Soloveva OV, Solovev SA., Shakurova RZ. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(1): 82-104. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104.
10. 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. – Т. 152. – С. 107292. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107292
11. Dharmalingam L. K., Aute V., Ling J. Review of triply periodic minimal surface (TPMS) based heat exchanger designs. – 2022.
12. 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. – Т. 194. – С. 123090. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123090
13. Wang J. et al. Investigation on flow and heat transfer in various channels based on triply periodic minimal surfaces (TPMS) // *Energy Conversion and Management*. – 2023. – Т. 283. – С. 116955. doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116955
14. Knödler P., Dreissigacker V. Fluid Dynamic Assessment and Development of Nusselt Correlations for Fischer Koch S Structures // *Energies*. – 2024. – Т. 17. – №. 3. – С. 688. doi.org/10.3390/en17030688
15. Solovev SA., Soloveva OV., Shakurova RZ., Golubev YaP. OVERVIEW OF THE APPLICATION OF OPEN CELL FOAM HEAT EXCHANGERS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (1): 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.
16. Hsieh M. T., Valdevit L. Minisurf—A minimal surface generator for finite element modeling and additive manufacturing // *Software Impacts*. – 2020. – Т. 6. – С. 100026. doi.org/10.1016/j.simpa.2020.100026
17. Yeranee K. et al. Turbulent Flow Heat Transfer and Thermal Stress Improvement of Gas Turbine Blade Trailing Edge Cooling with Diamond-Type TPMS Structure // *Aerospace*. – 2023. – Т. 11. – №. 1. – С. 37. doi.org/10.3390/aerospace11010037
18. Badretdinova GR, Kalimullin IR, Zinurov VE, Dmitriev AV. Evaluation of turbulence models in the external flow around the heated pipe. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(2): 176-186. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.
19. Soloveva OV, Yafizov RR, Solovev SA. THE POROUS STRUCTURE EFFECTIVE THICKNESS DETERMINATION IN THE CASE OF CONVECTIVE HEAT EXCHANGE // *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. – 2020;12;3(47):113-122.
20. Iyer J. et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – Т. 209. – С. 118192. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118192
21. Farakhov TM, Laptev AG. Modeling of temperature profiles and efficiency of heat transfer equipment with intensifiers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):12-18. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-12-18.
22. Sauer Moser-Yri M. et al. On the porosity-dependent permeability and conductivity of triply

Authors of the publication

Dmitry M. Bragin – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: dimabragin2204@yandex.ru.

Ravil M. Mustafin – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3784-2829>. Email: ravil-bk211@mail.ru.

Andrey I. Popov – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9835-0206>. Email: popov.ai@samgtu.ru.

Sofia A. Zinina – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9104-1336>. Email: sofazinina4@gmail.com.

Anton V. Eremin – Samara State Technical University, Samara, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2614-6329>. Email: a.v.eremin@list.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **01.07.2024 г.**

Отредактировано **29.08.2024 г.**

Принято **02.09.2024 г.**