Russian Technological Journal.
2025;13(5):95–103

ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

Математическое моделирование

Mathematical modeling

УДК 538.93
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-95-103
EDN YKAHQQ

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе гироида

А.И. Попов [@], **А.В. Еремин**

Самарский государственный технический университет, Самара, 443100 Россия
[@] *Автор для переписки, e-mail: popov.ai@samgtu.ru*

• **Поступила:** 27.12.2024 • **Доработана:** 10.03.2025 • **Принята к опубликованию:** 23.07.2025

Резюме

Цели. Трижды периодические минимальные поверхности – это непересекающиеся поверхности с нулевой средней кривизной, состоящие из повторяющихся в трех направлениях декартовой системы координат элементов. Использование конструкций, основанных на минимальных поверхностях, в теплотехническом оборудовании связано с их преимуществами перед классическими решетчатыми и сотовыми конструкциями, часто применяемыми на практике. Целью работы является исследование теплопереноса при фильтрационном течении несжимаемой жидкости в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе трижды периодической минимальной поверхности (гироида).

Методы. Для решения задачи теплопереноса в пористой среде применяется метод конечных разностей. Для реализации алгоритма метода конечных разностей разработано программное обеспечение *Heat Transfer Solver* на языке программирования Python.

Результаты. В рамках настоящего исследования разработано программное обеспечение на языке программирования Python для численного решения методом конечных разностей задачи теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой. Функционал программы позволяет исследовать динамику процесса теплопереноса и влияние различных параметров на распределение температуры. При помощи данной программы изучен процесс теплопереноса в пористой среде на основе гироида. Получены графические зависимости температуры твердотельного каркаса и жидкости, а также теплового потока от координаты в различные моменты времени. Определены характерные временные интервалы, в которых наблюдается наибольшее абсолютное значение градиента температур.

Выводы. Результаты работы, включающие как разработанное программное обеспечение, так и зависимости температур, могут найти применение в ряде инженерных задач, где важным является прогнозирование температурного распределения в пористых материалах при различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: пористая среда, течение жидкости, теплообмен, трижды периодическая минимальная поверхность, гироид, метод конечных разностей

© А.И. Попов, А.В. Еремин, 2025

Для цитирования: Попов А.И., Еремин А.В. Исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой на основе гироида. *Russian Technological Journal*. 2025;13(5):95–103. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-95-103, https://www.elibrary.ru/YKAHQQ

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Heat transfer in a porous medium having an ordered gyroid-based macrostructure

Andrey I. Popov [@], **Anton V. Eremin**

Samara State Technical University, Samara, 443100 Russia
[@] *Corresponding author, e-mail: popov.ai@samgtu.ru*

• **Submitted:** 27.12.2024 • **Revised:** 10.03.2025 • **Accepted:** 23.07.2025

Abstract

Objectives. Triply periodic minimal surfaces are non-intersecting surfaces with zero mean curvature, consisting of elements repeating in three directions of the Cartesian coordinate system. The use of structures based on minimal surfaces in heat engineering equipment is associated with their advantages over classical lattice and honeycomb structures, often used in practice. The aim of the work is to study heat transfer during filtration flow in a porous medium of an incompressible fluid having an ordered macrostructure based on gyroid triply periodic minimal surface.

Methods. In order to solve the problem of heat transfer in a porous medium, the finite difference method is used. As a means of implementing the finite difference method algorithm, the *Heat Transfer Solver* software was developed in the Python programming language.

Results. The described software program was used to obtain a numerical solution of the heat transfer problem in a porous medium with an ordered macrostructure using the finite difference method. The program functionality enables the investigation of the heat transfer process dynamics and the influence of various parameters on the temperature distribution. The program was used to study the heat transfer process in a porous medium based on gyroid triply periodic minimal surface. Graphical dependencies of the solid framework and fluid temperatures, as well as the heat flux on the coordinate at different time steps, were obtained. Characteristic time intervals with the highest absolute temperature gradient values were identified.

Conclusions. The results of the work, including both the developed software and the obtained temperature dependencies, can be used in a number of engineering problems where it is important to predict the temperature distribution in porous materials under various operating conditions.

Keywords: porous medium, fluid flow, heat transfer, triply periodic minimal surface, gyroid, finite difference method

For citation: Popov A.I., Eremin A.V. Heat transfer in a porous medium having an ordered gyroid-based macrostructure. *Russian Technological Journal.* 2025;13(5):95–103. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-5-95-103, https://www.elibrary.ru/YKAHQQ

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной задачей в теоретической и прикладной теплотехнике является повышение энергетической эффективности теплотехнического оборудования [1], которое широко используется в различных отраслях промышленности. Одним из методов интенсификации теплообмена является применение пористых материалов в конструкции теплообменных устройств [2], катализаторов [3] и т.д. Повышение площади поверхности теплообмена и турбулизация потока являются основными причинами использования пористых материалов в тракте теплообменников.

Большинство применяемых на практике пористых материалов обладают стохастической структурой, или, иными словами, случайной формой и размерами пор. Однако существуют целые классы пористых материалов с упорядоченной структурой, к которым, например, относятся решетчатые и сотовые конструкции [4, 5], а также конструкции на основе трижды периодических минимальных поверхностей (ТПМП). Такие поверхности являются предметом большого числа исследований [6–11] ввиду своих превосходных прочностных свойств при высоком значении пористости, что позволяет проектировать легкие, но при этом прочные конструкции. Одним из преимуществ пористых материалов с ТПМП-структурой также является возможность варьирования их свойств (теплофизических, механических и др.) путем изменения характерных геометрических параметров минимальных поверхностей [8].

Несмотря на вышеуказанные преимущества, при использовании пористых ТПМП-материалов в конструкции теплотехнического оборудования можно столкнуться с рядом трудностей ввиду отсутствия математических моделей, описывающих процессы переноса (тепла, массы, импульса), поскольку это влечет за собой большие затраты времени и ресурсов на изготовление опытных образцов и проведение натурных экспериментов. В связи с этим важной задачей является математическое моделирование тепломассопереноса в пористых средах, структура которых основана на ТПМП.

Для решения задач тепломассопереноса применяются как численные, так и аналитические методы [12–14]. Аналитические методы, например, метод разделения переменных и метод интегральных преобразований позволяют получать точные решения в частных случаях. Однако такие методы применимы только к ограниченному числу задач с определенными ограничениями и условиями. В связи с этим при решении сложных задач (с нелинейными свойствами или сложной геометрией) на практике часто применяются численные методы (метод конечных разностей, метод конечных элементов и др.) [15, 16], позволяющие находить приближенные решения с заданной точностью.

В настоящей работе при помощи метода конечных разностей решена одномерная задача теплопереноса в пористой среде, структура которой основана на ТПМП вида гироид, при течении несжимаемой жидкости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается теплообмен в пористой среде со структурой, основанной на гироиде [17, 18], при низкой скорости течения жидкости, характерной для фильтрационных течений. Схема задачи изображена на рис. 1. На рис. 1а изображена элементарная ячейка гироида, характерными геометрическим параметрами которой являются толщина стенки δ и длина ребра куба a, в который вписана ячейка. При варьировании данных параметров изменяется пористость материала, что оказывает влияние как на гидродинамические характеристики потока, так и на интенсивность теплоотдачи.

Пористая среда, через которую протекает жидкость, изображена на рис. 1б. Решетка ТПМП образуется путем копирования элементарной ячейки (рис. 1а) в ортогональных направлениях декартовой системы координат с периодом равным a.

Для описания теплообмена при течении жидкости через пористую среду воспользуемся двухтемпературной моделью, предложенной Wakao N. и Kagei S. [19]. Двухтемпературная модель позволяет описывать каждый компонент пористой среды (твердое тело и жидкость) с использованием отдельных уравнений энергии для каждой фазы, что дает возможность более точно описывать процесс теплообмена, в особенности при отсутствии локального равновесия.

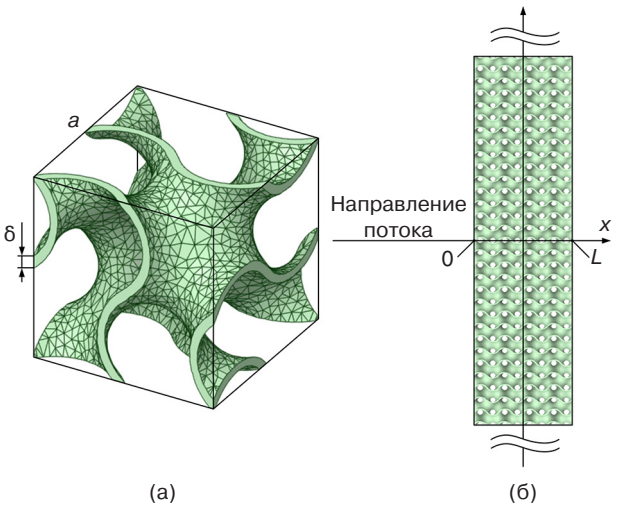

Рис. 1. Схема задачи: (а) элементарная ячейка гироида, (б) пористая ТПМП-среда.
x – координата, L – толщина пористого материала

Математическая постановка задачи, включающая основные дифференциальные уравнения, а также начальные и граничные условия, имеет вид:

$$(1-\phi)(\rho c_p)_т \frac{\partial T_т(x,t)}{\partial t} = \lambda_{эфф.т} \frac{\partial^2 T_т(x,t)}{\partial x^2} + \alpha_{т.ж}(T_ж(x,t) - T_т(x,t)), \quad (1)$$
$$(0 < x < L, t > 0);$$

$$\phi(\rho c_p)_ж \left[\frac{\partial T_ж(x,t)}{\partial t} + u\frac{\partial T_ж(x,t)}{\partial x}\right] = \lambda_{эфф.ж} \frac{\partial^2 T_ж(x,t)}{\partial x^2} + \alpha_{т.ж}(T_т(x,t) - T_ж(x,t)), \quad (2)$$
$$(0 < x < L, t > 0);$$

$$T_т(x,0) = T_ж(x,0) = T_0; \quad (3)$$

$$-\lambda_т \frac{\partial T_т(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=0} = \alpha_1(T_1 - T_т(0,t)); \quad (4)$$

$$\lambda_т \frac{\partial T_т(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=L} = \alpha_2(T_2 - T_т(L,t)); \quad (5)$$

$$T_ж(0,t) = T_1; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_ж(x,t)}{\partial x}\bigg|_{x=L} = 0, \quad (7)$$

где t – время; $T_т(x, t)$, $T_ж(x, t)$ – функции температур твердотельного каркаса и жидкости соответственно; ϕ – пористость; u – скорость потока жидкости; $(\rho c_p)_т$, $(\rho c_p)_ж$ – плотность и теплоемкость твердого материала и жидкости соответственно; $\lambda_{эфф.т}$, $\lambda_{эфф.ж}$ – эффективная теплопроводность твердотельного каркаса и жидкости; $\lambda_т$ – теплопроводность твердого материала; T_0 – начальная температура; T_1, T_2 – температуры окружающих сред до и после пористой зоны; $\alpha_{т.ж}$ – коэффициент теплоотдачи между жидкостью и твердотельным каркасом; α_1 – коэффициент теплоотдачи на границе твердотельного каркаса и окружающей среды в точке $x = 0$; α_2 – коэффициент теплоотдачи на границе твердотельного каркаса и окружающей среды в точке $x = L$.

Стоит отметить, что задача теплопереноса рассматривается отдельно от задачи переноса массы в пористой среде, и, соответственно, в систему уравнений не включены уравнения сохранения массы и импульса. Это связано с тем, что в некоторых частных случаях динамика течения может оказывать малое влияние на тепловые эффекты. Кроме того, свойства жидкости и твердого тела изменятся незначительно в диапазоне рассматриваемых температур, поэтому функции для описания зависимости свойств соответствующих фаз от температуры также не включены в постановку задачи.

В качестве начального условия как для твердого тела, так и для жидкости принята одинаковая температура T_0. На границах твердотельного каркаса (в точках $x = 0$ и $x = L$) задается граничное условие 3-го рода. Температура жидкости в точке $x = 0$ имеет постоянное значение, которое соответствует температуре окружающей среды на входе в пористую зону. Поскольку нет явных данных о температуре жидкости в точке $x = L$, предположим, что тепловой поток на границе равен нулю.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Решение задачи (1)–(7) осуществляется методом конечных разностей. Для этого введем в рассмотрение пространственно-временную сетку, где N – количество шагов по координате, а M – по времени:

$$x^i = i\Delta x, \quad i \in [0, N],$$
$$t^n = n\Delta t, \quad n \in [0, M],$$

где Δx, Δt – шаги по координате и времени соответственно.

Конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений (1), (2) и краевых условий (3)–(7) следующая:

$$(1-\phi)(\rho c_p)_т \left[\frac{T_т^{n+1,i} - T_т^{n,i}}{\Delta t}\right] = \lambda_{эфф.т}\left[\frac{T_т^{n,i-1} - 2T_т^{n,i} + T_т^{n,i+1}}{\Delta x^2}\right] + \alpha_{т.ж}(T_ж^{n,i} - T_т^{n,i}); \quad (8)$$

$$\phi(\rho c_p)_ж \left[\frac{T_ж^{n+1,i} - T_ж^{n,i}}{\Delta t} + u\frac{T_ж^{n,i+1} - T_ж^{n,i}}{\Delta x}\right] = \lambda_{эфф.ж}\left[\frac{T_ж^{n,i-1} - 2T_ж^{n,i} + T_ж^{n,i+1}}{\Delta x^2}\right] + \alpha_{т.ж}(T_т^{n,i} - T_ж^{n,i}); \quad (9)$$

$$T_т^{0,i} = T_ж^{0,i} = T_0; \quad (10)$$

$$-\lambda_т \frac{T_т^{n,1} - T_т^{n,0}}{\Delta x} = \alpha_1(T_1 - T_т^{n,0}); \quad (11)$$

$$\lambda_т \frac{T_т^{n,N} - T_т^{n,N-1}}{\Delta x} = \alpha_2(T_2 - T_т^{n,N}); \quad (12)$$

$$T_ж^{0,i} = T_1; \quad (13)$$

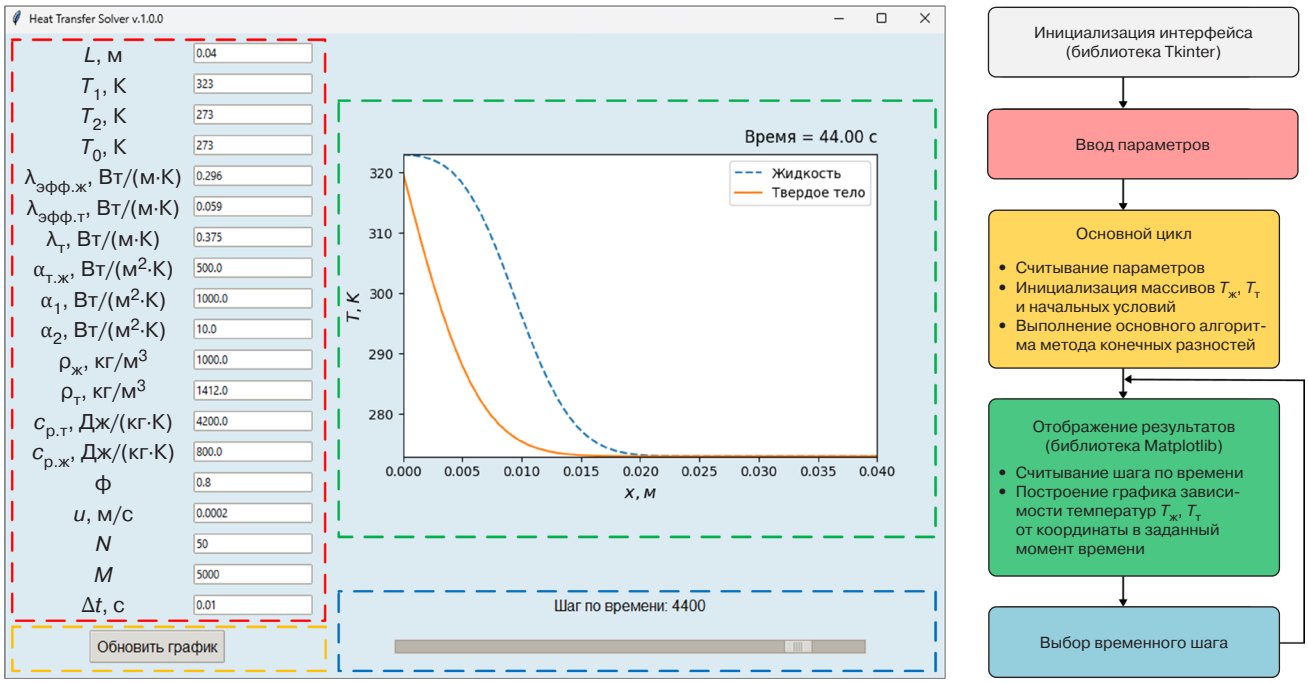

Рис. 2. Интерфейс и алгоритм разработанной программы

$$\frac{T_{ж}^{n,N} - T_{ж}^{n,N-1}}{\Delta x} = 0. \qquad (14)$$

Задача решается в соответствии с явной схемой для получения значений температур $T_{ж}$ и $T_{т}$ в каждом узле сетки на каждом временном шаге. Явная схема была выбрана благодаря ее простой реализации и достаточной точности для рассматриваемой задачи. При этом устойчивость решения обеспечивается подбором шага по времени Δt в зависимости от Δx в соответствии с критерием Куранта.

Для реализации алгоритма решения поставленной задачи методом конечных разностей разработано программное обеспечение на языке программирования Python. Графический интерфейс программы представлен на рис. 2. Для его построения использовалась библиотека Tkinter. В основном цикле программы можно выделить следующие этапы:

1. Ввод основных параметров задачи через специальные текстовые поля. Функционал программы позволяет вручную задавать как теплофизические свойства исследуемых материалов, так и размер пространственно-временной сетки.
2. Считывание параметров, инициализация массивов для $T_{ж}$, $T_{т}$ и выполнение основного цикла метода конечных разностей. Конечно-разностная схема для основных дифференциальных уравнений (8), (9) и граничных условий (11), (12), (14) на языке программирования Python представлена на рис. 3.
3. Визуализация результатов, включающая построение графика изменения температуры твердотельного каркаса и жидкости в пределах рассматриваемой области. Для отображения интерактивного графика изменения температуры в пористой среде использовалась библиотека Matplotlib.

```
for n in range(1, M):
    for i in range(1, N - 1):
        T_s[n, i] = ((1 / ((1 - phi) * p_s * co_s)) *
                     (((T_s[n - 1, i - 1] - 2 * T_s[n - 1, i] + T_s[n - 1, i + 1]) / dx ** 2) * k_es +
                     h_sf * (T_f[n - 1, i] - T_s[n - 1, i])) * dt + T_s[n - 1, i])

        T_f[n, i] = (((k_ef * ((T_f[n - 1, i - 1] - 2 * T_f[n - 1, i] + T_f[n - 1, i + 1]) / dx ** 2) +
                     h_sf * (T_s[n - 1, i] - T_f[n - 1, i])) / (phi * p_f * co_f)) - u * (T_f[n - 1, i] -
                     T_f[n - 1, i - 1]) / dx) * dt + T_f[n - 1, i]

    T_s[n, 0] = (h_ext1 * dx * T_ext1 + k_s * T_s[n, 1]) / (k_s + h_ext1 * dx)

    T_s[n, -1] = (k_s * T_s[n, -2] + h_ext2 * dx * T_ext2) / (k_s + h_ext2 * dx)

    T_f[n, -1] = T_f[n, -2]
```

Рис. 3. Конечно-разностная схема на языке программирования Python

Пользователь имеет возможность управлять отображением графика через слайдер, изменяя временной шаг и мгновенно обновляя графики температурных полей. Это позволяет исследовать динамику процесса теплопереноса и влияние различных параметров на распределение температуры.

Программа была протестирована на корректность путем сравнения численных решений с известными аналитическими решениями для частных случаев задачи. Исходный код, а также исполняемый файл программы представлены на платформе Mendeley Data[1] [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ

При помощи разработанной программы была решена задача теплопереноса в пористой среде, структура которой основана на гироиде. Получены графические зависимости изменения температуры твердотельного каркаса и жидкости. В частности, представлен график зависимости температуры жидкости и твердотельного каркаса от координаты в различные моменты времени (рис. 4). Данный график был получен при следующих константах и значениях теплофизических свойств твердотельного каркаса и жидкости, а также граничных и начальных условиях: $c_{р.т}$ = 800 Дж/(кг · К), $\rho_т$ = 1412 кг/м^3, $\lambda_т$ = 0.375 Вт/(м · К), $c_{р.ж}$ = 4200 Дж/(кг · К), $\rho_ж$ = 1000 кг/м^3, $\lambda_ж$ = 0.6 Вт/(м · К), $\lambda_{эфф.ж}$ = 0.296 Вт/(м · К), $\lambda_{эфф.т}$ = 0.059 Вт/(м · К), $\phi = 0.8$, $L = 0.04$ м, $T_0 = 273$ К, $T_1 = 323$ К, $T_2 = 273$ К, α_1 = 1000 Вт/(м^2 · К), α_2 = 10 Вт/(м^2 · К), $\alpha_{т.ж} = 500$ Вт/(м^2 · К), $u = 0.0002$ м/с. Коэффициенты эффективной теплопроводности твердой и жидкой фазы в пористом материале со структурой, основанной на гироиде, определялись в соответствии с методикой, представленной в [21].

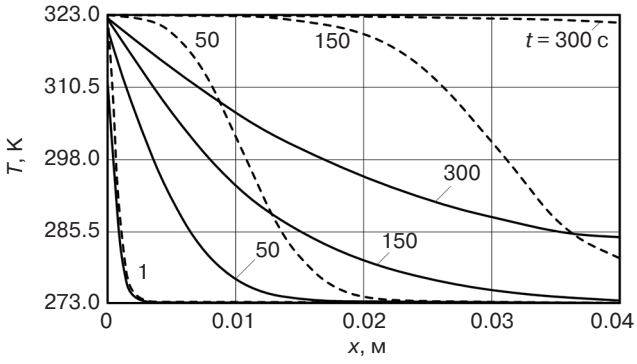

Рис. 4. График распределения температуры в пористой среде:
–––––– твердотельный каркас; – – – – жидкость

Из графика на рис. 4 видно, что при заданных условиях температуры жидкости и твердого каркаса значительно отличаются во всем диапазоне пространственной координаты, что подчеркивает важность использования двухтемпературной модели для точного описания распределения температур в пористых средах.

График на рис. 5 демонстрирует изменение температуры в различных точках пористого материала, а именно, в начале, в середине и в конце рассматриваемой области. Из анализа данного графика можно заключить, что при заданных условиях теплообмена температура жидкости значительно быстрее достигает максимального значения, заданного граничным условием (T_1 = 323 К). При $t > 300$ с температурные кривые жидкости и твердотельного каркаса начинают сближаться, что свидетельствует о снижении абсолютного значения градиента температур и приближении к термодинамическому равновесию в системе.

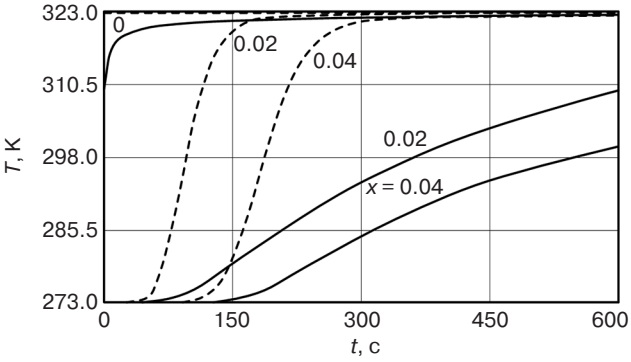

Рис. 5. График изменения температуры в пористой среде во времени:
–––––– твердотельный каркас; – – – – жидкость

На рис. 6 представлен график распределения теплового потока, определяемого в соответствии с законом Ньютона – Рихмана ($|q| = \alpha_{т.ж}(T_ж - T_т)$), в пористом материале по координате. На ранних этапах процесса ($t \approx 10$ с) распределение теплового потока имеет выраженный пик вблизи левой границы области, что связано с большим абсолютным значением градиента температуры, вызванным принятием граничного условия 1-го рода в точке $x = 0$. По мере увеличения времени (10 с < t < 200 с) наблюдается рост теплового потока со смещением пикового значения к правой границе области. Наибольшая эффективность процесса отмечается в момент времени $t \approx 200$ с, за которым следует постепенное снижение интенсивности теплообмена, поскольку температура жидкости к этому моменту имеет максимально возможное значение во всем диапазоне x, что также видно на рис. 3.

[1] https://data.mendeley.com/datasets/kcn33tr7sb/2. Дата обращения 23.07.2025. / Accessed July 23, 2025.

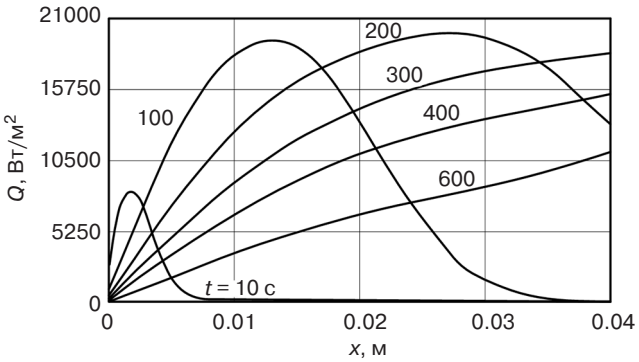

Рис. 6. График распределения теплового потока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлено исследование теплопереноса в пористой среде с упорядоченной макроструктурой, основанной на гироиде, при фильтрационном течении. Для математического моделирования исследуемого процесса использовалась двухтемпературная модель Wakao N. и Kagei S.

Для численного решения поставленной задачи теплопереноса в пористой среде (1)–(7) методом конечных разностей была разработана программа на языке программирования Python. Функционал разработанной программы предусматривает построение графика температуры твердотельного каркаса и жидкости, а встроенный в него слайдер временного шага позволяет визуализировать изменение температурных кривых, что важно для исследования динамики процесса теплопереноса. Главным преимуществом программы является возможность быстро, в отличие от прямых методов моделирования (например, методом конечных элементов в *ANSYS*[2]), получить решение поставленной задачи, что достигается за счет отсутствия необходимости в построении вычислительной геометрии и расчетной сетки.

Пористые материалы со структурой на основе ТПМП, таких как гироид, могут быть использованы в проектировании теплообменников, катализаторов и других устройств, где важно минимизировать массу конструкции без ущерба для ее прочности и эффективности. Моделирование теплопереноса в пористых ТПМП с использованием разработанной программы позволяет быстро прогнозировать их поведение в реальных условиях эксплуатации, что важно для ряда инженерных задач в энергетике, химической промышленности, машиностроении и других отраслях.

Результаты данной работы могут стать базисом для дальнейших научных исследований в области моделирования тепломассопереноса в пористых средах. В перспективе возможно расширение модели и программы за счет учета уравнения движения жидкости в пористой среде, что позволит определять как профиль скорости, так и потери давления. Также перспективным направлением может стать разработка аналогичных моделей для других видов минимальных поверхностей, что позволит подбирать структуры с необходимыми характеристиками по теплопередаче, прочности и массе в зависимости от поставленных инженерных задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-79-10044, https://rscf.ru/project/23-79-10044/.

Вклад авторов

А.И. Попов – проведение исследования, написание рукописи, разработка программы, оформление рисунков, редактирование статьи.

А.В. Еремин – постановка задачи, привлечение финансирования, редактирование статьи.

Authors' contributions

A.I. Popov – researching, writing the manuscript, developing of the program, visualization, and editing the article.

A.V. Eremin – task statement, funding acquisition, and editing the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.А., Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (Обзор). *Теплоэнергетика*. 2012;1:3–14.
2. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(1):165–194. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194

[2] https://www.cadfem-cis.ru/ (in Russ.). Дата обращения 21.07.2025. / Accessed July 21, 2025.

3. Кугатов П.В. Использование пористых углеродных материалов в качестве носителей для катализаторов. *Башкирский химический журнал*. 2011;18(1):98–105.
4. Тестоедов Н.А., Наговицин В.Н., Пермяков М.Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2016;17(1):200–211.
5. 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;25(1): 82–104. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104
6. Брагин Д.М., Еремин А.В., Попов А.И., Шульга А.С. Метод определения коэффициента эффективной теплопроводности пористого материала на основе минимальной поверхности типа Schoen's I-WP(R). *Вестник ИГЭУ*. 2023;2: 61–68. https://doi.org/10.17588/2072-2672.2023.2.061-068
7. Зинина С.А., Попов А.И., Еремин А.В. Численное решение нелинейной задачи теплопроводности в пористой пластине с упорядоченной макроструктурой. *Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика*. 2024;1:53–67. https://doi.org/10.26456/vtpmk702
8. Попов А.И. Разработка тепловой изоляции с упорядоченной структурой, основанной на ТПМП Неовиуса. *Вестник ИГЭУ*. 2022;6:58–68.
9. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Adv. Eng. Mater*. 2019;21(10):1900524. https://doi.org/10.1002/adem.201900524
10. Schoen A.H. Reflections concerning triply-periodic minimal surfaces. *Interface Focus*. 2012;2(5):658–668. https://doi.org/10.1098/rsfs.2012.0023
11. Abueidda D.W., Bakir M., Al-Rub R.K.A., Bergström J.S., Sobh N.A., Jasiuk I. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*. 2017;122(9):255–267. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018
12. Карташов Э.М. Математические модели теплопроводности с двухфазным запаздыванием. *Инженерно-физический журнал*. 2016;89(2):338–349.
13. Карташов Э.М., Кротов Г.С. Аналитическое решение однофазной задачи Стефана. *Математическое моделирование*. 2008;20(3):77–86.
14. Карташов Э.М. Аналитические подходы к исследованиям нестационарной теплопроводности для частично ограниченных областей. *Теплофизика высоких температур*. 2020;58(3):402–411. https://doi.org/10.31857/S0040364420030084
15. Коренченко А.Е., Жукова А.А. Испарение жидкой лежащей капли в условиях вынужденной конвекции. *Russ. Technol. J*. 2021;9(5):57–66. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-57-66
16. Глинский И.А., Зенченко Н.В., Мальцев П.П. Тепловое моделирование терагерцового квантового-каскадного лазера на основе наногетероструктуры GaAs/AlGaAs. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal*. 2016;4(3):27–36. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-27-36
17. Hayashi K., Kishida R., Tsuchiya A., Ishikawa K. Superiority of triply periodic minimal surface gyroid structure to strut-based grid structure in both strength and bone regeneration. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023;15(29):34570–34577. https://doi.org/10.1021/acsami.3c06263
18. Chouhan G., Bala Murali G. Designs, advancements, and applications of three-dimensional printed gyroid structures: A review. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024;238(2):965–987. https://doi.org/10.1177/09544089231160030
19. Wakao N., Kagei S. *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*. Taylor & Francis; 1982. 364 p.
20. Popov A.I. Heat Transfer Solver. V. 1. *Mendeley Data*. 2024. https://www.doi.org/10.17632/kcn33tr7sb.1
21. Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2024;231:125863. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863

REFERENCES

1. Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. Industrial application of heat transfer enhancement: The modern state of the problem (a Review). *Therm. Eng*. 2012;59(1):1–12. https://doi.org/10.1134/S0040601512010119
[Original Russian Text: Popov I.A., Gortyshov Yu.F., Olimpiev V.V. Industrial application of heat transfer enhancement: The modern state of the problem (a Review). *Teploenergetika.* 2012;1:3–14 (in Russ.).]
2. Solovev S.A., Soloveva O.V., Shakurova R.Z., Golubev Ya.P. Overview of the application of open cell foam heat exchangers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2024;26(1):165–194 (in Russ.). https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194
3. Kugatov P.V. Use of porous carbon materials as carriers for catalysts. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal = Bashkir Chemical Journal*. 2011;18(1):98–105 (in Russ.).
4. Testoedov N.A., Nagovitsin V.N., Permyakov M.Yu. Spacecraft application of three layer honeycomb structures. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal = Siberian Aerospace Journal*. 2016;17(1):200–211 (in Russ.).
5. Solovev S.A., Soloveva O.V., Shakurova R.Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI = Power Engineering: Research, Equipment, Technology.* 2023;25(1):82–104 (in Russ.). https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104

6. Bragin D.M., Eremin A.V., Popov A.I., Shulga A.S. Method to determine effective thermal conductivity coefficient of porous material based on minimum surface Schoen's I-WP(R) type. *Vestnik IGEU*. 2023;2:61–68 (in Russ.). https://doi.org/10.17588/2072-2672.2023.2.061-068
7. Zinina S.A., Popov A.I., Eremin A.V. Numerical solution of the nonlinear problem of thermal conductivity in a porous plate with an ordered macrostructure. *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya matematika = Herald of Tver State University. Ser.: Appl. Math*. 2024;1:53–67. https://doi.org/10.26456/vtpmk702
8. Popov A.I. Development of thermal insulation with ordered structure based on Neovius TPMS. *Vestnik IGEU*. 2022;6:58–68 (in Russ.).
9. Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices. *Adv. Eng. Mater*. 2019;21(10):1900524. https://doi.org/10.1002/adem.201900524
10. Schoen A.H. Reflections concerning triply-periodic minimal surfaces. *Interface Focus*. 2012;2(5):658–668. https://doi.org/10.1098/rsfs.2012.0023
11. Abueidda D.W., Bakir M., Al-Rub R.K.A., Bergström J.S., Sobh N.A., Jasiuk I. Mechanical properties of 3D printed polymeric cellular materials with triply periodic minimal surface architectures. *Materials & Design*. 2017;122(9):255–267. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.018
12. Kartashov E.M. Mathematical models of heat conduction with two-phase lag. *J. Eng. Phys. Thermophys*. 2016;89(2): 346–356. https://doi.org/10.1007/s10891-016-1385-9
[Original Russian Text: Kartashov E.M. Mathematical models of heat conduction with two-phase lag. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2016;89(2):338–349 (in Russ.).]
13. Kartashov E.M., Krotov G.S. Analytical solution of single-phase Stefan problem. *Math. Models Comput. Simul*. 2009;1(2):180–188. https://doi.org/10.1134/S2070048209020021
[Original Russian Text: Kartashov E.M., Krotov G.S. Analytical solution of single-phase Stefan problem. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2008;20(3):77–86 (in Russ.).]
14. Kartashov E.M. Analytical approaches to the analysis of unsteady heat conduction for partially bounded regions. *High Temp.* 2020;58(3):377–385. https://doi.org/10.1134/S0018151X20030086
[Original Russian Text: Kartashov E.M. Analytical approaches to the analysis of unsteady heat conduction for partially bounded regions. *Teplofizika vysokikh temperatur.* 2020;58(3):402–411 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S0040364420030084]
15. Korenchenko A.E., Zhukova A.A. Evaporation of a liquid sessile droplet subjected to forced convection. *Russ. Technol. J*. 2021;9(5):57–66 https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-5-57-66
16. Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Maltsev P.P. Thermal modelling of terahertz Quantum-cascade laser based on nanoheterostructures GaAs/AlGaAs. *Rossiiskii Tekhnologicheskii Zhurnal*. 2016;4(3):27–36 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-3-27-36
17. Hayashi K., Kishida R., Tsuchiya A., Ishikawa K. Superiority of triply periodic minimal surface gyroid structure to strut-based grid structure in both strength and bone regeneration. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2023;15(29):34570–34577. https://doi.org/10.1021/acsami.3c06263
18. Chouhan G., Bala Murali G. Designs, advancements, and applications of three-dimensional printed gyroid structures: A review. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024;238(2):965–987. https://doi.org/10.1177/09544089231160030
19. Wakao N., Kagei S. *Heat and Mass Transfer in Packed Beds*. Taylor & Francis; 1982. 364 p.
20. Popov A.I. Heat Transfer Solver. V. 1. *Mendeley Data*. 2024. https://www.doi.org/10.17632/kcn33tr7sb.1
21. Bragin D.M., Popov A.I., Eremin A.V. The thermal conductivity properties of porous materials based on TPMS. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2024;231:125863. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125863

Об авторах

Попов Андрей Игоревич, к.т.н., старший преподаватель, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244). E-mail: popov.ai@samgtu.ru. Scopus Author ID 57216363622, SPIN-код РИНЦ 5560-6869, https://orcid.org/0000-0001-5014-8167

Еремин Антон Владимирович, д.т.н., доцент, проректор по интеграционным проектам, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244). E-mail: a.v.eremin@list.ru. Scopus Author ID 56395547000, ResearcherID D-6936-2014, SPIN-код РИНЦ 3892-0775, https://orcid.org/0000-0002-2614-6329

About the Authors

Andrey I. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Industrial Heat Power Engineering, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya ul., Samara, 443100 Russia). E-mail: popov.ai@samgtu.ru. Scopus Author ID 57216363622, RSCI SPIN-code 5560-6869, https://orcid.org/0000-0001-5014-8167

Anton V. Eremin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Industrial Heat Power Engineering, Samara State Technical University (244, Molodogvardeyskaya ul., Samara, 443100 Russia). E-mail: a.v.eremin@list.ru. Scopus Author ID 56395547000, ResearcherID D-6936-2014, RSCI SPIN-code 3892-0775, https://orcid.org/0000-0002-2614-6329