

Научная статья
УДК 532.5+519.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180670>

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВАЛИДАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТОМ СЕТЧАТОМ МАТЕРИАЛЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТА

**Михаил Юрьевич Иванов¹, Анатолий Олегович Городнов²✉,
Игорь Вячеславович Лаптев³, Никита Юрьевич Сидоренко⁴,
Антон Сергеевич Малахов⁵, Георгий Фридрихович Реш⁶**

^{1,5,6}АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, Московская область, Россия

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва,
Россия

^{2,3,4}АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия

¹vpk@vpk.npomash.ru

²an.ol.gorodnov@gmail.com✉

³laptev.iv.kerc@gmail.com

⁴sidorenikita@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности создания физико-математической модели движения жидкости в пористой структуре (пористом сетчатом материале) гидравлического фильтроэлемента. Актуальность адекватного компьютерного моделирования функционирования фильтроэлемента обусловлена необходимостью разработки цифрового двойника гидравлической системы, содержащей такие

устройства. Приведено описание процедуры валидации компьютерной модели нестационарных физических процессов в рассматриваемой пористой структуре. При валидации использованы эмпирические данные, полученные из проливочных испытаний образца пористого сетчатого материала. Результаты моделирования пополняют фундаментальную теорию об изучении гидравлических свойств пористых проницаемых материалов.

Ключевые слова: компьютерная модель, коэффициент гидравлического сопротивления, метод контрольных объёмов, пористый сетчатый материал

Для цитирования: Иванов М.Ю., Городнов А.О., Лаптев И.В., Сидоренко Н.Ю., Малахов А.С., Реш Г.Ф. Особенности математического моделирования и валидации компьютерной модели физических процессов в пористом сетчатом материале гидравлического фильтроэлемента // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180670>

Original article

FEATURES OF MATHEMATICAL MODELING AND VALIDATION OF COMPUTER MODEL OF PHYSICAL PROCESSES IN THE POROUS MESH MATERIAL OF A HYDRAULIC FILTER ELEMENT

Mikhail Yu. Ivanov¹, Anatoly O. Gorodnov^{2✉}, Igor V. Laptev³,

Nikita Yu. Sidorenko⁴, Anton S. Malahov⁵, Georgy F. Resh⁶

^{1,5,6}JSC Military Industrial Corporation NPO Mashinostroyenia,
Reutov, Moscow region, Russia

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

^{2,3,4}Keldysh Research Center, Moscow, Russia

vpk@vpk.npomash.ru

an.ol.gorodnov@gmail.com✉

laptev.iv.kerc@gmail.com

sidorenikita@yandex.ru

Abstract. The paper considers the features of creating physical and mathematical model of spatial motion of viscous incompressible non-thermally conductive liquid in - a hydraulic filter element. Porous mesh materials are artificial porous media formed by several (more than two) flat sheets of metal grids, the fibers of which are rigidly interconnected. The relevance of adequate computer modeling of the functioning of the filter element is due to the need to develop a digital twin of hydraulic system containing such devices. Currently, Russian and foreign industrial enterprises are developing and using virtual analogues of physical processes, products and systems for the so-called predictive modeling of the development of processes and behavior of products and systems. This makes it possible to predict the nature of the features of the course of phenomena of various natures or the functioning of systems long before the occurrence of possible emergency situations throughout their entire life cycle. Based on the LOGOS Aero-Hydro engineering analysis system, theoretical method for determining the coefficient of hydraulic resistance of representative element (quasi-periodic cell) of porous mesh material of arbitrary configuration is proposed, implemented and confirmed in practice by solving the problem of liquid flowing around two-layer structure of the material. A computer model of virtual pouring tests of sample of porous mesh material has been developed, providing a relative error in determining the coefficient of hydraulic resistance of sample of porous mesh material of no more than 5%. The procedure for validating the computer model of

nonstationary physical processes in the considered porous structure is described. Validation spill tests of porous mesh material sample confirmed the required level of adequacy and provided the required degree of accuracy of the computer model of the sample under study. The validation uses empirical data obtained from spillage tests of sample of porous mesh material. The simulation results supplement the fundamental theory of studying the hydraulic properties of porous permeable materials. The possibility of using the classical phenomenological Darcy-Forchheimer model of a porous mesh material sample in development of digital twins of pneumohydraulic systems has been confirmed.

Keywords: computer model, hydraulic resistance coefficient, control volume method, porous mesh material

For citation: Ivanov M.Yu., Gorodnov A.O., Laptev I.V., Sidorenko N.Yu., Malahov A.S., Resh G.F. Features of Mathematical Modeling and Validation of Computer Model of Physical Processes in the Porous Mesh Material of a Hydraulic Filter Element. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180670>

Введение

Технология цифровых двойников, определяемая национальным стандартом Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения», интенсивно внедряется во многие отрасли науки и производства [1, 2]. Российские и зарубежные промышленные предприятия используют виртуальные аналоги физических

процессов, изделий и систем для так называемого предиктивного моделирования развития процессов и поведения изделий и систем [3]. Это позволяет прогнозировать характер особенностей протекания явлений различной природы или функционирования систем задолго до момента возникновения возможных нештатных ситуаций в течение всего их жизненного цикла.

Цифровые двойники создаются и для пневмогидравлических систем различного назначения, по которым осуществляется транспорт однокомпонентных газовых и жидких сплошных сред [4], а также их гомогенных и гетерогенных смесей [5]. Такие технические системы, как правило, имеют в своём составе фильтроэлементы для очистки рабочих сред от загрязняющих примесей [6, 7]. В качестве фильтрующего слоя может применяться многослойный проницаемый сетчатый материал (ПСМ), обладающий развитой системой пор микронного размера [8]. Как отмечается в работе [9] для достижения высокого уровня адекватности разрабатываемого цифрового двойника необходимо обеспечить требуемый уровень адекватности компьютерных моделей всех элементов, составляющих пневмогидравлическую систему. В частности, это требование относится и к компьютерной модели ПСМ. При этом необходимо отметить, что при проведении оценочных (или проектных) расчётов требования к точности такой модели могут быть снижены, но при разработке цифрового двойника ошибка в получаемых численных результатах должна быть минимальной.

Цель работы – разработать методику создания компьютерной модели ПСМ фильтроэлемента, которая описывает поведение пористого материала в набегающем потоке жидкости с требуемым уровнем адекватности и необходимой степенью

точности для возможности её использования в цифровых двойниках пневмогидравлических систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Задать структуру ПСМ и определить его коэффициент гидравлического сопротивления при обтекании свободным потоком жидкости методами вычислительной гидродинамики.

2. Разработать компьютерную модель для виртуальных проливочных испытаний образца ПСМ, основанную на использовании результатов численного моделирования обтекания ячейки квазипериодичности образца ПСМ и его классической феноменологической модели.

3. Разработать экспериментальную установку для валидации проливочных испытаний образца ПСМ, вычислить эмпирический коэффициент гидравлического сопротивления.

Геометрическая модель проницаемого сетчатого материала

Рассматривался ПСМ, состоящий из двух слоёв [10]. Сетка одного слоя смещена относительно другого слоя на угол $\pi/4$ в плоскости листа материала толщиной $120 \cdot 10^{-6}$ м. Микроструктура представительного объёма (ячейки квазипериодичности) ПСМ приведена на рисунке 1.

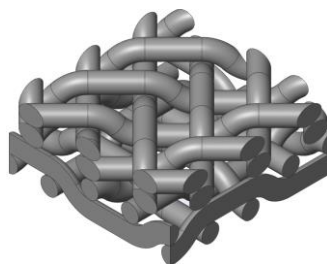


Рисунок 1. 3D-модель ячейки квазипериодичности ПСМ

Для описания пространственной структуры ячейки использовались следующие параметры [11]: d – диаметр волокна – основы и утка (предполагалось, что волокна основы и утка контактируют в точке); объём ячейки V определялся как сумма объёма пор V_g и объёма V_s , занятого волокнами; введён параметр, характеризующий объёмную площадь контакта волокон и жидкости:

$$a = \Sigma_s / V ,$$

где Σ_s – площадь поверхности волокон в ячейке, контактирующих с движущейся жидкостью; определены пористость ε и характерный размер пор D_e :

$$\varepsilon = V_g / V , D_e = \frac{4\varepsilon V_s}{\Sigma_s (1 - \varepsilon)} = \frac{4\varepsilon}{a} .$$

Получены следующие численные значения для указанных параметров:

$$d = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}, a = 4,59 \cdot 10^4 \text{ 1/м}, \varepsilon = 0,64, D_e = 56,1 \cdot 10^{-6} \text{ м} .$$

Определение коэффициента гидравлического сопротивления ячейки квазипериодичности

Для вычисления коэффициента гидравлического сопротивления ячейки квазипериодичности ПСМ фильтроэлемента изучалось пространственное движение вязкой несжимаемой нетеплопроводной жидкости в осесимметричном канале, в котором пористый материал устанавливался ортогонально оси симметрии области течения. Использована отечественная программная система инженерного анализа «ЛОГОС Аэро-Гидро» [12, 13] для реализации компьютерной модели физического процесса обтекания ячейки квазипериодичности жидкой средой.

Физико-математическая модель для описания гидродинамики жидкости в канале формулировалась на основе уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу [14]:

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, v_i – декартовы компоненты вектора скорости жидкости, p – давление жидкости, μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, $\overline{\rho v'_i v'_j}$ – компоненты тензора турбулентных напряжений. Для замыкания системы уравнений (1)-(2) использовалась модель турбулентности $k\omega$ -SST [15].

В работе [10] получены обобщающие результаты компьютерного моделирования для коэффициента гидравлического сопротивления рассматриваемой пористой структуры в зависимости от числа Рейнольдса по Армору (Armour, 1968):

$$\zeta = \alpha / \text{Re}_{Ar} + \beta, \quad (3)$$

где $\alpha = 4,32$, $\beta = 0,3$.

Феноменологическая модель проницаемого сетчатого материала

Поскольку образец ПСМ содержит не одну, а несколько тысяч ячеек квазипериодичности, то выполнять прямое численное моделирование процессов фильтрации жидкости в его структуре нецелесообразно из-за потребных значительных вычислительных и временных ресурсов. Поэтому вместо реального

образца определён его геометрический аналог, обладающий проницаемыми свойствами в рамках классической феноменологической модели. В качестве такой модели в системе «ЛОГОС Аэро-Гидро» используется модифицированное уравнение Дарси или двучленный закон сопротивления (модель Дарси-Форхгеймера) [16, 17]:

$$\nabla p = \alpha_{LOG} \mathbf{v} + \beta_{LOG} |\mathbf{v}| \mathbf{v}, \quad (4)$$

где ∇p – градиент давления жидкости, \mathbf{v} , $|\mathbf{v}|$ – вектор и модуль вектора скорости жидкости, α_{LOG} , β_{LOG} – вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости.

Коэффициенты α_{LOG} и β_{LOG} вычислялись по результатам компьютерного моделирования для ячейки квазипериодичности с использованием теоретической формулы (3) по следующим соотношениям:

$$\alpha_{LOG} = \alpha \mu a^2 Q B / (\varepsilon^2 \delta), \quad \beta_{LOG} = \beta Q B \rho / (\varepsilon^2 D_e \delta), \quad (5)$$

где Q – коэффициент извилистости пор, $Q = 1,285$, B – толщина образца пористого материала, δ – толщина геометрического аналога образца ПСМ, определяемого феноменологической моделью (4).

Компьютерное моделирование проливочных испытаний

Разработана компьютерная модель проливочных испытаний образца ПСМ. Для этого создана твердотельная CAD-модель оснастки, в которой образец пористого материала закрепляется на экспериментальной установке (рисунок 2). Линейный размер участка канала с расширением составляет $l = 0,1$ м. Диаметр центрального участка $d_1 = 0,043$ м. Длины участков канала с меньшим внутренним

диаметром одинаковы, причём $d_2 \approx 0,03$ м. Суммарная длина канала $L = 0,232$ м.

На левой границе (согласно рисунку 2) определялся постоянный массовый расход жидкости G_{in} .

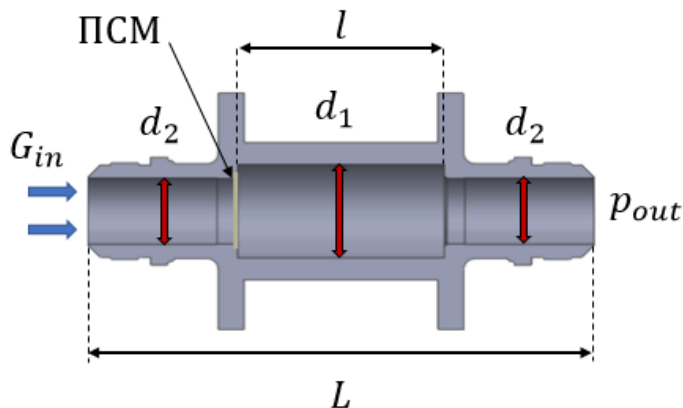


Рисунок 2. Расчётная схема оснастки для проливочных испытаний

Поле скорости на левой (входной) границе области движения жидкости полагалось однородным и определялось равенством:

$$v_{in} = 4G_{in} / (\pi \rho d_2^2).$$

На правой (выходной) границе поддерживалось постоянное значение давления:

$$p_{out} = const.$$

На внутренних стенках канала для вектора скорости жидкости определены граничные условия прилипания. Как и ранее, рассматривалось течение вязкой несжимаемой нетеплопроводной жидкости в осесимметричном канале с внезапным расширением. Физико-математическая модель для описания гидродинамики жидкости в канале также формулировалась на основе уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу (1)-(2). В пределах геометрического образца ПСМ параметры течения жидкости определялись по формулам (4)-(5).

В качестве среды моделирования также применялся отечественный CFD пакет «ЛОГОС Аэро-Гидро». Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений основывалось на неструктурированной расчётной сетке [18], вычислительном методе контрольных объёмов, а также классическом алгоритме SIMPLE [19-21]. Для аппроксимации конвективных потоков через грани контрольных объёмов применялась противопоточная схема второго порядка LUD, а диффузионных потоков - схема 2-го порядка с ограничителем. Временная производная аппроксимировалась также схемой второго порядка. Система алгебраических уравнений для вычисления компонент вектора скорости жидкости решалась методом Гаусса-Зейделя, а уравнение Пуассона для поправок давления - многосеточным методом [19]. Необходимо отметить, что используемые в «ЛОГОС Аэро-Гидро» подходы реализованы с поддержкой параллельных вычислений на CPU, что позволило существенно сократить время получения результата.

Сеточная модель области движения жидкости представлена на рисунке 3. При построении сетки выполнялось сгущение узлов в области расположения образца ПСМ, достраивался призматический слой ячеек у непроницаемых границ расчётной области для разрешения пограничного слоя. В силу осевой симметрии задачи рассматривалась только половина расчётной области.

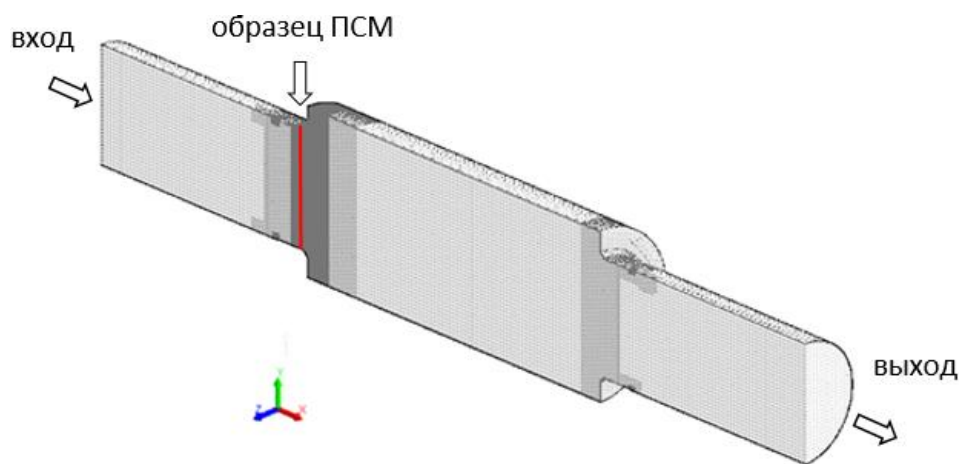
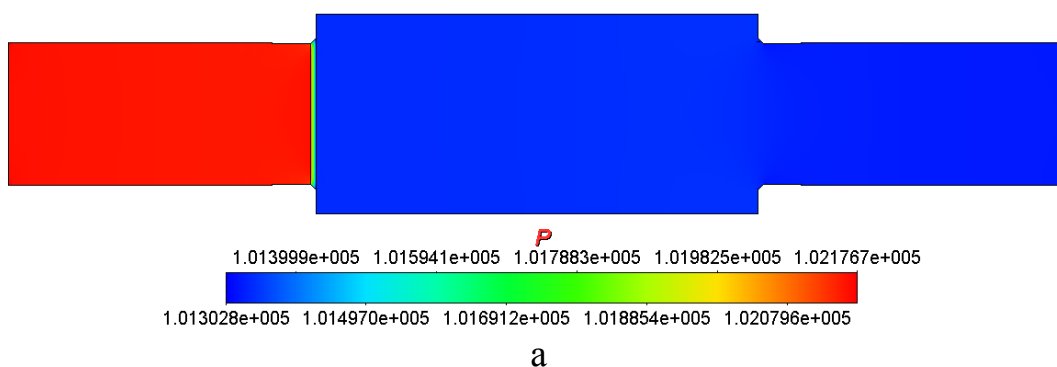


Рисунок 3. Сеточная модель области движения жидкости

Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование выполнялось до установления квазистационарного режима течения жидкости. Это означает, что осреднённые параметры изменяются только за счёт турбулентных пульсаций в заданном диапазоне чисел Рейнольдса по Армору – от 0,5 до 10.

Для проведения вычислительных экспериментов использовалась компьютерная система на основе 30-ти вычислительных ядер. Время, необходимое для решения различных вариантов задачи, составило ~ 2 часов в зависимости от особенностей каждого варианта. На рисунках 4-7 приведены результаты моделирования – поля давления и линии тока жидкости при различных числах Рейнольдса по Армору.



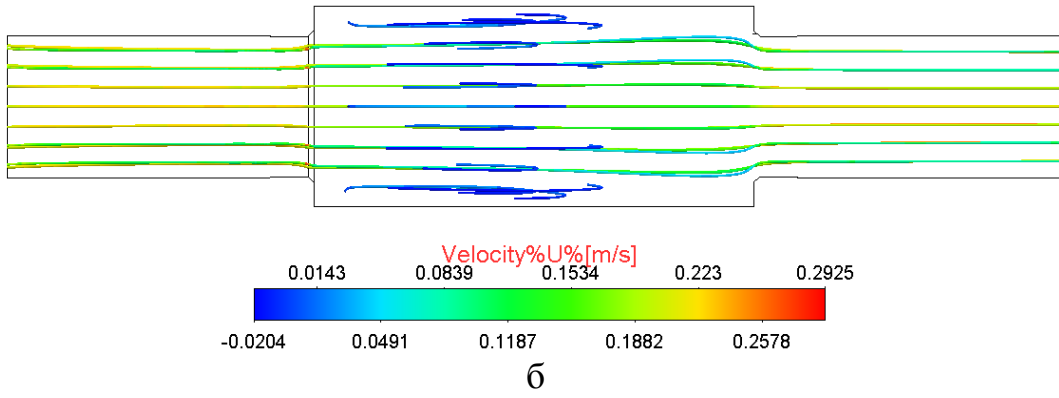


Рисунок 4. Поле давления (а) и линии тока (б) при $Re_{Ar} = 0,5$

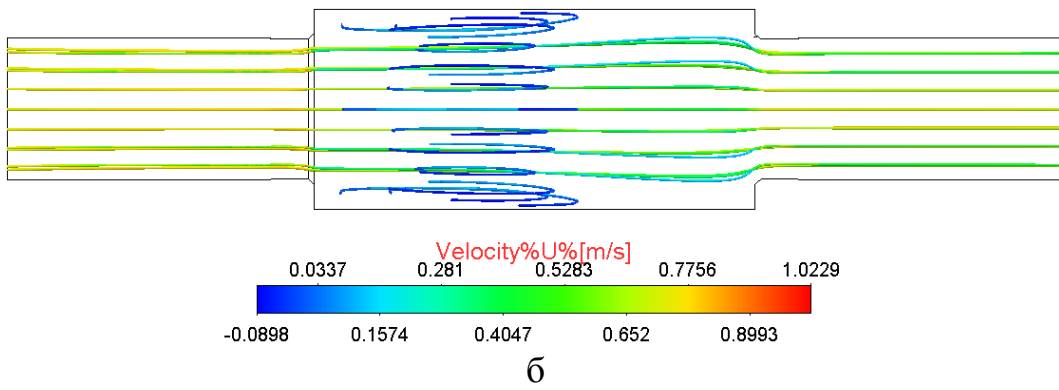
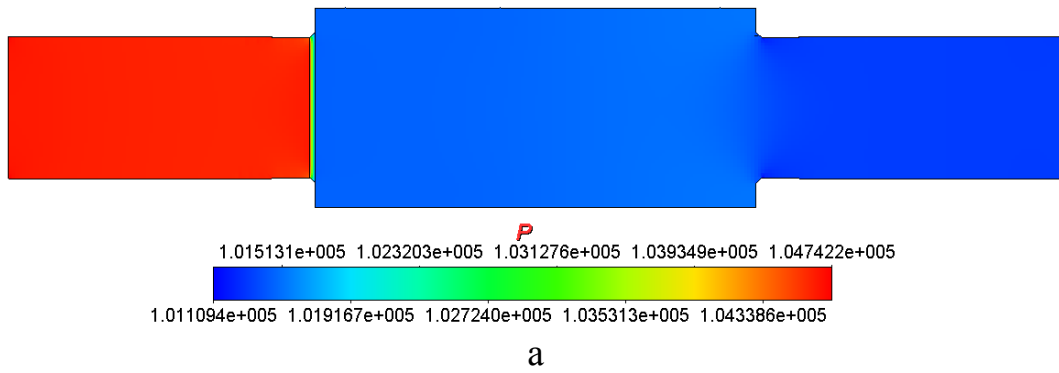
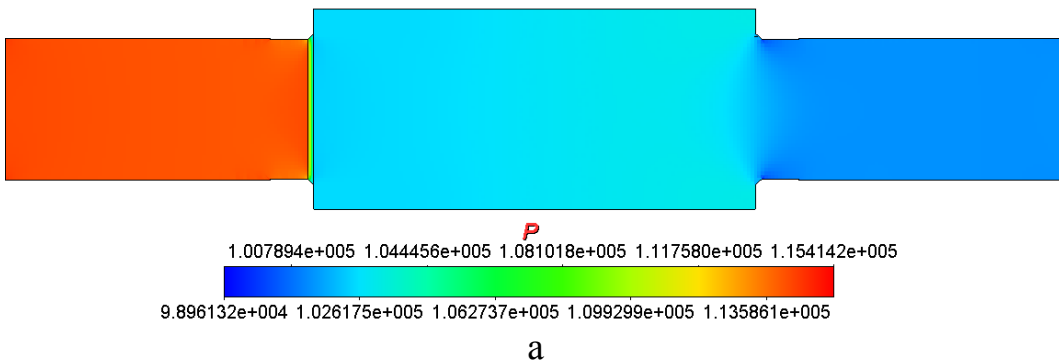


Рисунок 5. Поле давления (а) и линии тока (б) при $Re_{Ar} = 2$



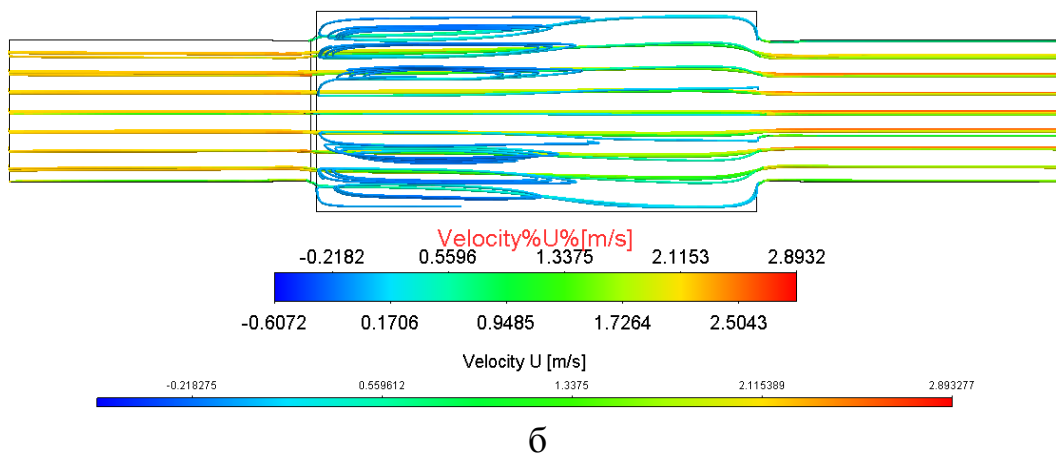


Рисунок 6. Поле давления (а) и линии тока (б) при $Re_{Ar} = 6$

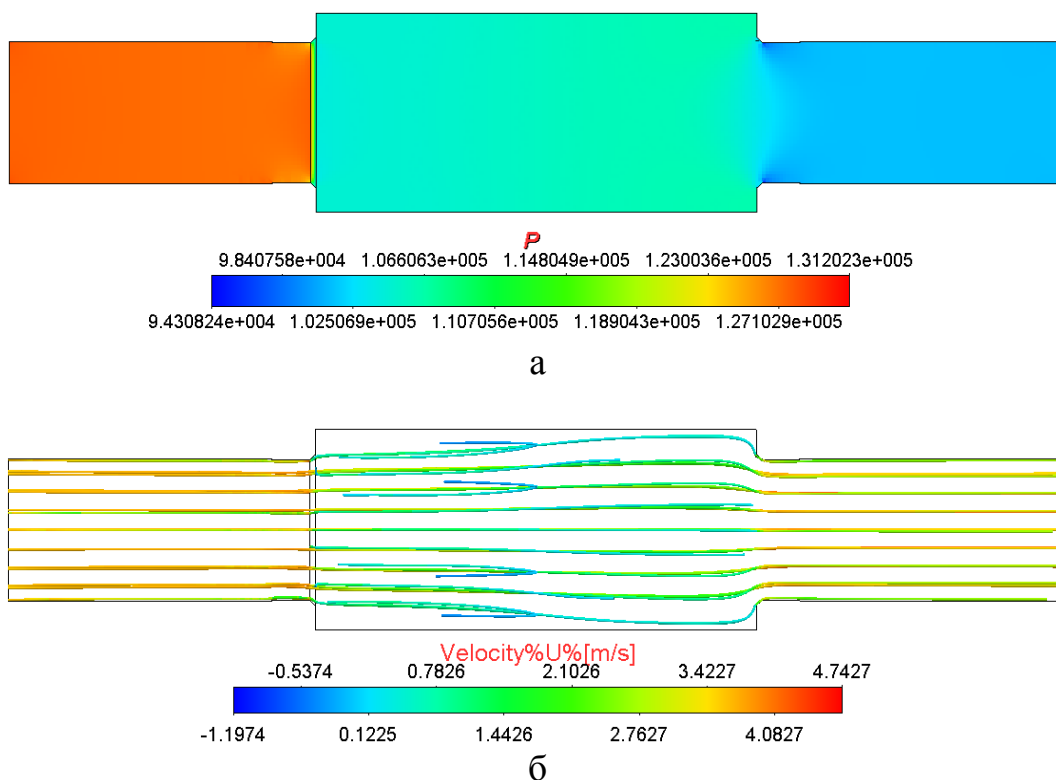


Рисунок 7. Поле давления (а) и линии тока (б) при $Re_{Ar} = 10$

На рисунке 8 представлены профили компоненты v_x вектора скорости \mathbf{v} жидкости на входе и выходе расчётной области, а также перед образцом ПСМ при $Re_{Ar} = 0,5$ (H – безразмерная координата, измеряемая вдоль диаметра входного сечения расчётной области в плоскости OXY , согласно рисунку 3).

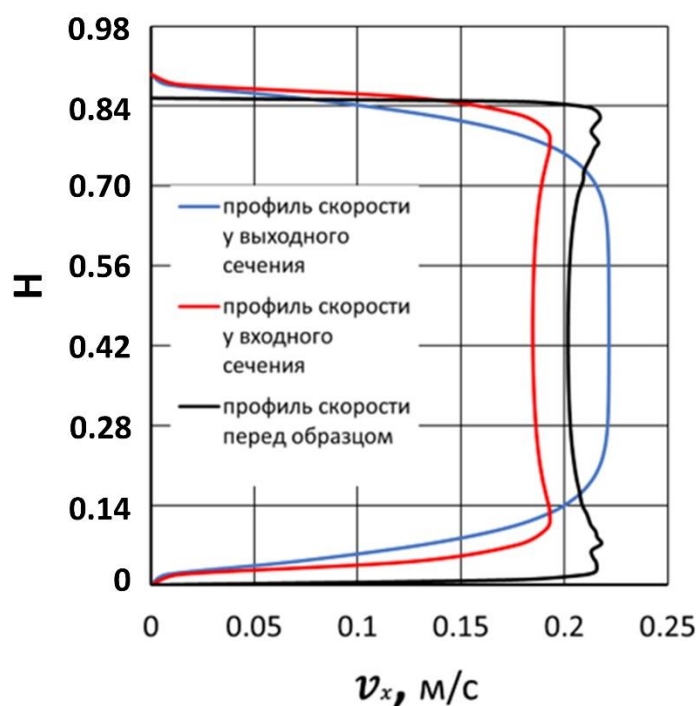


Рисунок 8. Профили компоненты v_x вектора скорости \mathbf{v} жидкости в различных сечениях расчётной области

Анализ характера изменения давления жидкости в расчётной области, геометрической формы линий тока жидких частиц на различных гидродинамических режимах (ламинарных или турбулентных), а также профилей декартовых компонент вектора скорости \mathbf{v} жидкости могут являться основанием для корректировки расчётной схемы оснастки для проливочных испытаний, которая представлена на рисунке 2. Кроме того, такой анализ может привести к изменению схемы натуральных испытаний для валидации компьютерной модели образца ПСМ, выбору степени чувствительности и диапазону измерения датчиков для регистрации давления, перепада давления и объёмного расхода жидкости. Стоит отметить, что в общем случае виртуальные испытания невозможно реализовать на практике в полном объёме. Однако такие испытания позволяют выполнить планирование экспериментальных проликов и определить режимы, на которых следует изучить

объект испытаний, до изготовления элементов оснастки. В настоящей работе после подробного исследования результатов виртуальных проливок принято решение не вносить изменения в САД-модель оснастки и приступить к сборке экспериментальной установки. Также из анализа имеющегося экспериментально-измерительного оборудования установлено, что достоверные проливочные испытания возможно выполнить только для чисел Рейнольдса по Армору $Re_{Ar} > 1$.

Экспериментальные исследования

Валидация компьютерной модели ПСМ фильтроэлемента выполнена на разработанной экспериментальной установке для проливочных испытаний образца ПСМ (рисунок 9). На рисунке изображено: 1 – фильтр, 2 – датчик температуры, 3 – объект испытаний (образец ПСМ, закреплённый в специальной технологической оснастке, эскиз которой приведён на рисунке 2), 4 – датчик расхода, 5 – датчик давления, 6 – датчик перепада давления, 7 – вентиль.

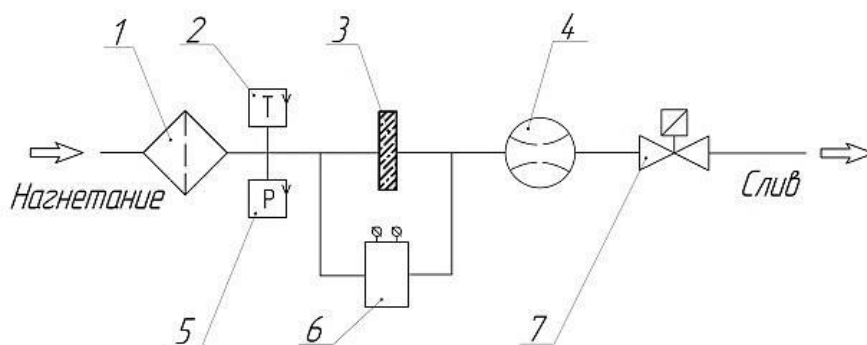


Рисунок 9. Экспериментальная установка

Обсуждение результатов компьютерного моделирования

Теоретический (полученный в результате компьютерного моделирования) и эмпирический (полученный в результате экспериментальных проливок)

коэффициенты гидравлического сопротивления ζ образца ПСМ и соответствующие числа Рейнольдса по Армору определялись по формулам:

$$\zeta = \frac{\varepsilon^2 D_e}{QB \rho v_{in}^2} (\Delta p_\Sigma - \Delta p_k), \quad Re_{Ar} = \frac{\rho v_{in}}{\mu a^2 D_e}, \quad (6)$$

где Δp_Σ – перепад давления жидкости между входным и выходным сечениями канала с установленным образцом, Δp_k – перепад давления жидкости между входным и выходным сечениями канала без образца.

Проанализированы ламинарные и турбулентные движения жидкости в диапазоне чисел Рейнольдса по Армору Re_{Ar} от 0,5 до 10. С использованием формул (6) построены графические зависимости теоретического и экспериментального коэффициента гидравлического сопротивления от Re_{Ar} , а также кривая, обобщающая экспериментальные значения, которые представлены на рисунке 10.

Установлено, что различие коэффициентов гидравлического сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса по Армору, полученных серией виртуальных проливочных испытаний и соответствующих натуральных экспериментов, составляет не более 5%, если $Re_{Ar} > 1$. В случае $Re_{Ar} \leq 1$, как отмечалось ранее, необходима модификация экспериментальной установки, поскольку получено значительное расхождение значений теоретического и экспериментального коэффициентов гидравлического сопротивления. Такая модификация возможна, например, в направлении замены рабочей жидкости на газ, как это реализовано в работе [11].

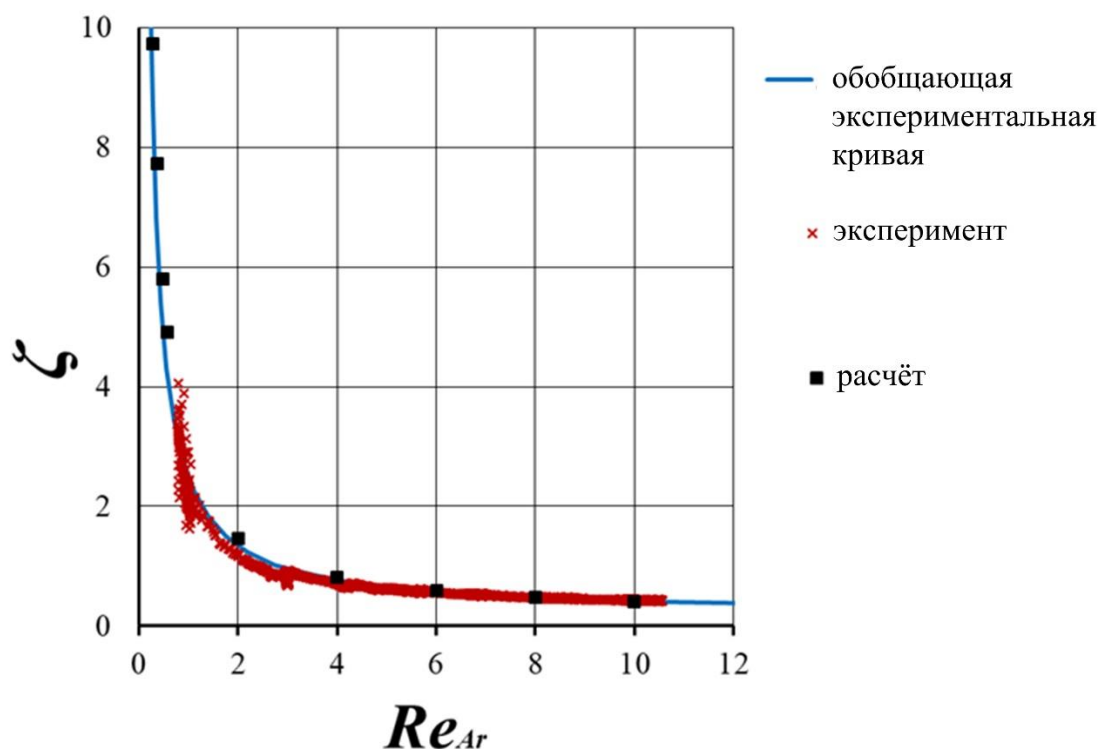


Рисунок 10. Расчётные и экспериментальные значения коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса по Армору

Выводы

По результатам выполненной работы сформулированы следующие выводы:

1. Предложена теоретическая методика определения коэффициента гидравлического сопротивления ячейки квазипериодичности пористого сетчатого материала произвольной конфигурации, реализованная и подтверждённая на практике решением задачи обтекания жидкостью двухслойной структуры материала.

2. Разработана компьютерная модель виртуальных проливочных испытаний образца пористого сетчатого материала, обеспечивающая относительную погрешность определения коэффициента гидравлического сопротивления образца пористого сетчатого материала не более 5%.

3. Выполнены валидационные проливочные испытания образца пористого сетчатого материала, которые подтвердили необходимый уровень адекватности и обеспечили требуемую степень точности компьютерной модели исследуемого образца.

4. Подтверждена возможность использования феноменологической модели образца пористого сетчатого материала при разработке цифровых двойников пневмогидравлических систем.

Список источников

1. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. С. 517–531. DOI: [10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531](https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531)

2. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Метод оценивания характеристик цифровых моделей киберфизических систем на основе множественного регрессионного анализа результатов их применения // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=175925>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-19)

3. Гусев П.Ю. Автоматизация планирования производственных процессов авиастроительного предприятия с использованием цифрового двойника // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=101190>.

4. Белевитин А.А., Бородуля Н.А., Рыжкова В.Г. Разработка цифрового двойника газотранспортной системы в целях моделирования и оптимизации гидравлических режимов // Газовая промышленность. 2021. № 7. С. 22–28.
5. Иванова Ю.П., Иванов М.Ю., Буряк А.К. Математические модели динамических процессов адсорбции и тепломассопереноса в многокомпонентных смесях. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. - 98 с.
6. Ivanov M.Yu., Resh G.F. Theoretical Justification of Experimental Investigation of Gravity-Capillary Method for Gas-Liquid Mixtures Intake // Journal of Physics: Conference Series, 2019, vol. 1391, pp. 012079. DOI: [10.1088/1742-6596/1391/1/012079](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012079)
7. Александров Л.Г., Константинов С.Б., Марков А.В., Платов И.В. О методике подтверждения работоспособности фазоразделителя внутрибакового устройства капиллярного типа // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=170335>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-07](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-07)
8. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы. - М.: Metallurgy, 1987. - 335 с.
9. Иванов М.Ю., Городнов А.О., Лаптев И.В. и др. Валидация компьютерной модели пористого сетчатого материала фильтроэлемента при создании цифрового двойника гидравлической системы // XLVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства (Москва, 23–26 января 2024 года): сборник тезисов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024.
10. Городнов А.О., Лаптев И.В., Сидоренко Н.Ю. и др. Математическое моделирование процессов ламинарной и турбулентной фильтрации жидкой

несжимаемой среды в пористых сетчатых материалах // Математическое моделирование и численные методы. 2023. № 2. С. 67–89.

11. Armour J.C., Cannon J.N. Fluid Flow Through Woven Screens // AIChE Journal, 1968, vol. 14, no. 3, pp. 415–420. DOI: [10.1002/AIC.690140315](https://doi.org/10.1002/AIC.690140315)

12. ЛОГОС Аэро-Гидро. Решатель задач аэро-, гидро-, газодинамики и акустики. URL: <https://logos-support.ru/logos/aero-hydro/>

13. Танненберг И.Д., Рамазанов Р.Ф. Валидация решения задачи движения твердого тела в набегающем потоке с использованием программного продукта ЛОГОС // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://www.trudymai.ru/published.php?ID=74873>

14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 6. Гидродинамика. - М.: Физматлит, 2001. 736 с.

15. Menter F.R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows // AIAA 24th Fluid Dynamics Conference, July 6-9, 1993, Orlando, Florida, no. AIAA 93-2906, 22 p. DOI: [10.2514/6.1993-2906](https://doi.org/10.2514/6.1993-2906)

16. Москалев П.В., Шитов В.В. Математическое моделирование пористых структур. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 120 с.

17. Hicks R.E. Pressure Drop in Packed Beds of Spheres // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1970, vol. 9, no. 3, pp. 500-502. DOI: [10.1021/I160035A032](https://doi.org/10.1021/I160035A032)

18. Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method, England: Longman Scientific & Technical, 1995, 257 p.

19. Ferziger J.H., Peric M., Street R.L. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Nature Switzerland AG, 2020, 596 p.

20. Лашкин С.В., Козелков А.С., Мелешкина Д.П., Ялозо А.В., Тарасова Н.В. Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости разделенным и совмещенным алгоритмом типа SIMPLE // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 6. С. 64-76.
21. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 214 p.

References

1. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2021, vol. 64, pp. 517–531. DOI: [10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531](https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531)
2. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaichenko P.Yu. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=175925>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-19)
3. Gusev P.Yu. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=101190>
4. Belevitin A.A., Borodulya N.A., Ryzhkova V.G. *Gazovaya promyshlennost'*, 2021, no. 7, pp. 22–28.
5. Ivanova Yu.P., Ivanov M.Yu., Buryak A.K. *Matematicheskie modeli dinamicheskikh protsessov adsorbtsii i teplomassoperenosa v mnogokomponentnykh smesyakh* (Mathematical Models of Dynamic Processes of Adsorption and Heat and Mass Transfer in Multicomponent Mixtures), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2022. 98 p.
6. Ivanov M.Yu., Resh G.F. Theoretical Justification of Experimental Investigation of Gravity-Capillary Method for Gas-Liquid Mixtures Intake, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1391, pp. 012079. DOI: [10.1088/1742-6596/1391/1/012079](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012079)

7. Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Markov A.V., Platov I.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/published.php?ID=170335>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-07](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-07)
8. Belov S.V. *Poristye pronitsaemye materialy* (Porous Permeable Materials), Moscow, Metallurgiya, 1987, 335 p.
9. Ivanov M.Yu., Gorodnov A.O., Laptev I.V. et al. *XLVIII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyashchennye pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisov*. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2024.
10. Gorodnov A.O., Laptev I.V., Sidorenko N.Yu. et al. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody*, 2023, no. 2, pp. 67–89.
11. Armour J.C., Cannon J.N. Fluid Flow Through Woven Screens, *AICHE Journal*, 1968, vol. 14, no. 3, pp. 415–420. DOI: [10.1002/AIC.690140315](https://doi.org/10.1002/AIC.690140315)
12. *LOGOS Aero-Gidro. Reshatel' zadach aero-, gidro-, gazodinamiki i akustiki*. URL: <https://logos-support.ru/logos/aero-hydro/>
13. Tannenbergh I.D., Ramazanov R.F. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://www.trudymai.ru/eng/eng/published.php?ID=74873>
14. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika. Tom 6. Gidrodinamika* (Theoretical Physics. Volume 6. Hydrodynamics), Moscow, Fizmatlit, 2001, 736 p.
15. Menter F.R. Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, *AIAA 24th Fluid Dynamics Conference*, July 6-9, 1993, Orlando, Florida, no. AIAA 93-2906, 22 p. DOI: [10.2514/6.1993-2906](https://doi.org/10.2514/6.1993-2906)

16. Moskalev P.V., Shitov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie poristykh struktur* (Mathematical Modeling of Porous Structures), Moscow, FIZMATLIT, 2007, 120 p.
17. Hicks R.E. Pressure Drop in Packed Beds of Spheres, *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1970, vol. 9, no. 3, pp. 500-502. DOI: [10.1021/I160035A032](https://doi.org/10.1021/I160035A032)
18. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*, England: Longman Scientific & Technical, 1995, 257 p.
19. Ferziger J.H., Peric M., Street R.L. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer Nature Switzerland AG, 2020, 596 p.
20. Lashkin S.V., Kozelkov A.S., Meleshkina D.P., Yalozo A.V., Tarasova N.V. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2016, vol. 28, no. 6, pp. 64-76.
21. Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 214 p.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024

Одобрена после рецензирования 25.04.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 25.03.2024; approved after reviewing on 25.04.2024; accepted for publication on 27.06.2024