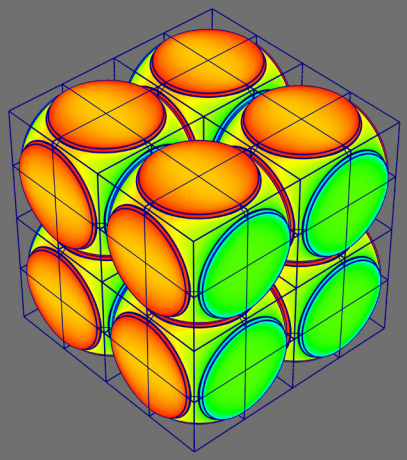
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Королева А.П., Минин С.В., Городнов А.О., Лаптев И.В., Петрова С.В. Численное моделирование гидравлических характеристик пористых сетчатых материалов. Математическое моделирование и численные методы, 2026, № 1, с. 22–48.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/397/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.217.22
18.11.2026 12:59:43

УДК 621.454.2 DOI: 10.18698/2309-3684-2026-1-2248

Численное моделирование гидравлических характеристик пористых сетчатых материалов

© А. П. Королева[1], С.В. Минин[1], А.О. Городнов[1,2], И.В. Лаптев[1,2], С.В. Петрова[1,2,3]

[1]Научно-технологический университет «Сириус», федеральная территория «Сириус», 354340, Россия
[2]АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия
[3]Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская область, 141701, Россия

В работе представлена автоматизированная методика определения гидравлических характеристик пористых сетчатых материалов (ПСМ) методами компьютерного моделирования. Предложенный подход включает параметризованные геометрические модели ПСМ различного типа плетения, способ формирования дискретной модели, расчетного варианта, а также автоматизацию проведения гидродинамических расчетов и обработку результатов. Проведено исследование корректности допущений, принятых в рамках методики, включая анализ типов и параметров пятен контакта нитей идеализованной геометрии, размера представительных элементов. Выполнено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными из открытой литературы. Показано, что для различных типов ПСМ разработанная методика обеспечивает точность расчёта перепада давления в пористом сетчатом материале на уровне 6–17 % в диапазоне чисел Рейнольдса, соответствующем вязкостному и инерционному режимам течения и 35 % на переходных режимах течения. Проведено сопоставление результатов моделирования по предложенной методике с расчетами по известным из литературы обобщающими опытные данные зависимостями и теоретическими моделями. Показано, что максимальное относительное отклонение от валидационных данных в рамках предложенных подходов более чем в два раза ниже, чем при расчете с применением аналитических соотношений. Результаты исследования подтверждают применимость и эффективность предложенных в работе подходов для решения как исследовательских, так и практических задач.

Ключевые слова: *математическое моделирование, пористые сетчатые материалы, гидравлическое сопротивление, автоматизация расчетов*

Введение. Пористые сетчатые материалы (ПСМ) представляют собой один из наиболее востребованных классов высокопроницаемых пористых структур, применяемых в фильтрах, теплообменных устройствах и фазоразделительных элементах ракетно-космической техники [6]-[10]. Конструктивной основной ПСМ служат металлические тканые сетки, различающиеся по типу плетения и геометрии ячеек на просвет [1]-[2] (рис. 1).

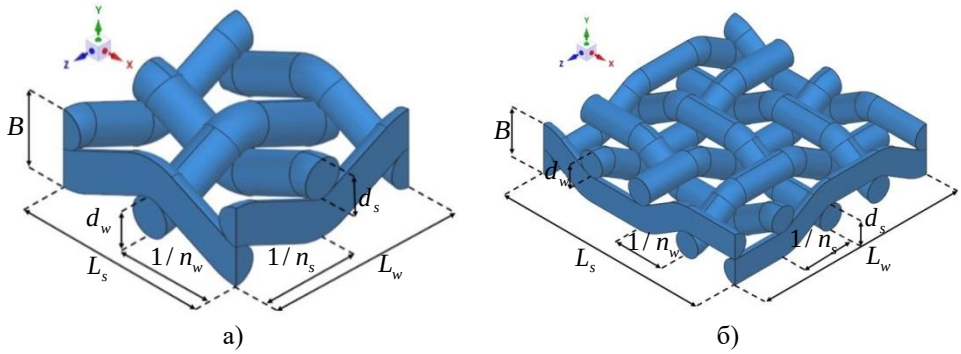


Рис. 1. Геометрические модели ПСМ различных типов плетения:
а) — сетка полотняного плетения с квадратными ячейками (plain square);
б) — сетка саржевого плетения с квадратными ячейками (full twill)

В отечественной литературе принято выделять две основные группы сеток — с квадратными ячейками и с нулевыми (плотными) ячейками, каждая из которых характеризуется набором геометрических параметров: диаметрами нитей основы d_w и утка d_s, плотностью укладки, количеством нитей на единицу длины n_w и n_s и размерами ячейки периодичности L_w и L_s [3]-[4]. В работе рассмотрены ПСМ с квадратными ячейками, схемы геометрий которых представлены на рис. 1. Для достижения требуемых эксплуатационных характеристик широко применяются многослойные структуры и комбинированные ПСМ, формируемые методами горячей прокатки и диффузионной сварки [1], [5]. Исследования структуры реальных ПСМ показывают, что их геометрические параметры могут существенно отличаться от идеализированных моделей из-за технологических допусков, спекания, деформации нитей и особенностей укладки [11]-[12].

К числу основных характеристик ПСМ относят их гидравлические и капиллярные свойства: проницаемость, коэффициенты линейных и нелинейных потерь давления, а также капиллярная удерживающая способность (КУС). Несмотря на наличие большого числа экспериментальных работ и корреляционных зависимостей (Armour & Cannon [13], Fisher [14], обобщённые модели на основе уравнения Дарси–Форхгеймера [15], а также другие варианты теоретических и экспериментальных корреляций для отдельных вариантов ПСМ [16] - [26]), универсального подхода к определению гидравлического сопротивления ПСМ до сих пор не существует.

В последнее время широкое распространение получили методы определения гидравлического сопротивления ПСМ, основанные на компьютерном моделировании. Как правило, для определения потерь

давления решается задача о течении вязкой несжимаемой жидкости через микроэлемент ПСМ с воспроизведением особенностей его геометрии [26]-[34]. Одним из вариантов моделирования фильтрации жидкостей в мелкопористых средах с периодической структурой являются методы на основе асимптотического осреднения. В [38], [40] проведен анализ процессов как для отдельной взятой поры, так и для пористой среды в целом. Вместе с тем, моделирование течений в ПСМ сопряжено с рядом нерешенных задач, требующих дополнительных исследований. Важным вопросом является оценка применимости идеализированных геометрических моделей ПСМ для расчета потерь давления, включая анализ таких факторов, как геометрия области контактов нитей ПСМ, размеры моделируемого представительного элемента и длина входной и выходной зон. В рассмотренных литературных источниках, посвященных моделированию течений в ПСМ, принималось допущение о круглом поперечном сечении нитей, диаметр которого соответствует осредненным данным по моделируемой структуре. Альтернативный подход к построению структуры ПСМ, основанный на томографии реальных образцов, представлен в работе [11]. Однако его практическая реализация часто невозможна на ранних этапах проектирования изделий из-за отсутствия физического образца и требует применения сложного и дорогостоящего оборудования. Отдельного исследования требуют существенно нестационарные режимы течения в ПСМ, а также методы их корректного моделирования.

Представленная работа посвящена разработке методики определения гидравлических потерь давления на ПСМ. Методика основана на применении современных средств математического моделирования и предусматривает автоматизацию ключевых процессов: подготовку геометрических и сеточных моделей, задание начальных и граничных условий, проведение расчётов и обработку результатов.

Постановка задачи. Рассматривается течение несжимаемой вязкой жидкости через представительные элементы (микроэлементы) ПСМ различных типов плетения и геометрических характеристик. Представительный элемент определяется как периодически повторяющаяся часть структуры ПСМ и включает в себя одну ячейку периодичности с соответствующим расположением нитей, их диаметрами и зоной контактов.

Решается задача определения потерь давления в зависимости от скорости натекания, теплофизических свойств жидкости и геометрических параметров. В рамках постановки решаются следующие подзадачи:

– оценка влияния различных моделей контактных зон нитей на величину гидравлического сопротивления;

– исследование влияния размеров представительного элемента;

– валидация расчётных результатов по данным независимых экспериментов.

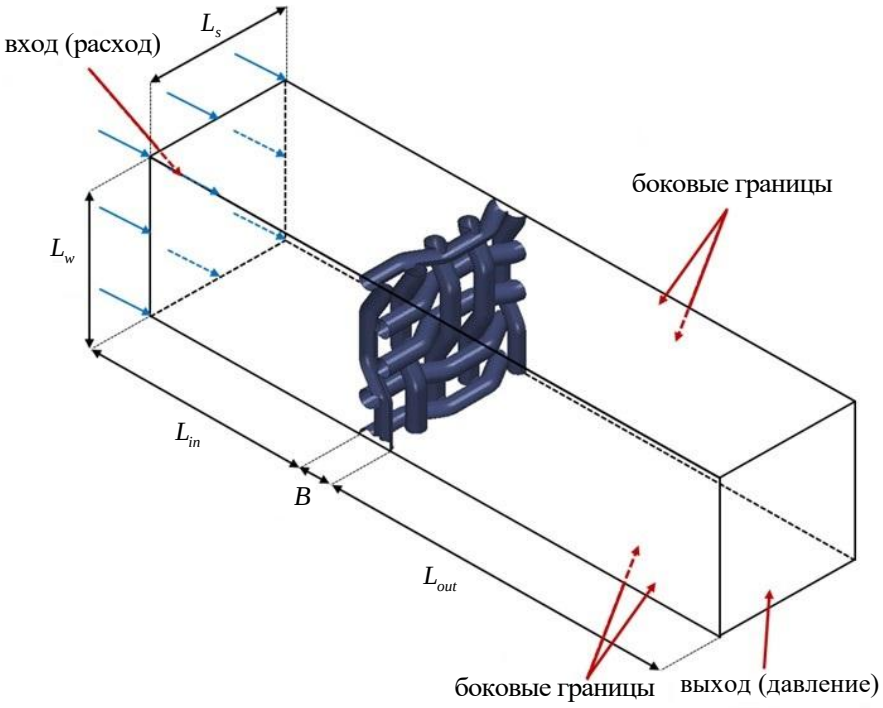


Рис. 2. Схема вычислительной задачи по определению гидравлического сопротивления ПСМ

Для описания течения на ламинарных режимах используются уравнения Навье-Стокса в изотермической постановке, которые могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$
$$\rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right). \quad (1)$$

Здесь u_i — вектор скорости, ρ — плотность, p — давление, μ — коэффициент динамической вязкости. Пусть n_i — внешняя нормаль, а параметры на входной границе, выходной границе, боковых границах и омываемой поверхности нитей ПСМ задаются индексами «вход», «выход», «бок», «псм» соответственно. Тогда граничные и начальные условия формулируются следующим образом:

$$
\begin{gathered}
-u_i\big|_{вход} = u_{in}, \left.\frac{\partial p}{\partial n_i}\right|_{вход} = 0, \\
p\big|_{выход} = p_{out}, \\
\left.\frac{\partial p}{\partial n_i}\right|_{бок} = 0, \\
u_i\big|_{псм} = 0, \left.\frac{\partial p}{\partial n_i}\right|_{псм} = 0, \\
u_i(t=0) = 0,\ p(t=0) = p_0.
\end{gathered}
\tag{2}
$$

Для описания турбулентных течений используются осредненные по Рейнольдсу уравнению Навье-Стокса, которые имеют следующий виде:

$$
\begin{gathered}
\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0, \\
\rho\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\tau'_{ij}.
\end{gathered}
\tag{3}
$$

Здесь τ' — тензор напряжений Рейнольдса. Скорость $\overline{u}_i$ и давление $\overline{p}$ в уравнениях (3) является осредненными по Рейнольдсу.

Для замыкания системы уравнений RANS предлагается использовать модели турбулентности $k-\varepsilon$ [35], $k\omega$-SST [36], SA [37]. В тензорной нотации компоненты тензора напряжений Рейнольдса связанны с параметрами осредненного потока через турбулентную вязкость согласно гипотезе Буссинеска:

$$
\tau'_{ij} = \mu_t\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij}. \tag{4}
$$

Здесь μ_t — коэффициент турбулентной вязкости.

Модель $k-\varepsilon$ относится к классу двухпараметрических моделей осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Одной из модификаций стандартной модели $k-\varepsilon$ является «$k-\varepsilon$ realizable» Дифференциальные уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε имеют вид:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho k\bar{u}_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_m+S_k,$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\varepsilon\bar{u}_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+ \tag{5}$$

$$+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon.$$

Генерация кинетической энергии турбулентности имеет вид:

$$G_k=\mu_t S^2-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_t\operatorname{div}V\right)\operatorname{div}V. \tag{6}$$

Коэффициент $C_{\varepsilon 1}$ определяется по формуле:

$$C_1=\max\left[0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right],\ \eta=S\frac{k}{\varepsilon}. \tag{7}$$

Коэффициент турбулентной вязкости определяется как

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon},\ \text{где}\ C_\mu=\frac{1}{A_0+A_s\dfrac{kU^*}{\varepsilon}}, \tag{8}$$

где $U^*=\sqrt{S_{ij}S_{ij}+\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$, $\Omega_{ij}=\Omega_{ij}-2\varepsilon_{ijk}\omega_k$, $\Omega_{ij}=\overline{\Omega}_{ij}-\varepsilon_{ijk}\omega_k$, $\overline{\Omega}_{ij}$ — тензор средних скоростей вращения, ω_k угловая скорость. Константы $A_0=4.04$, $A_s=\sqrt{6}\cos\varphi$,

$$\varphi=\frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W),\ W=\frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3},\ S=\sqrt{S_{ij}S_{ij}},\ S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right).$$

Остальные эмпирические константы модели имеют следующие значения:

$$C_{e1}=1.44,\ C_{e2}=1.92,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.219.$$

Стандартный вариант модели Спаларта-Аллмараса для модифицированной кинематической турбулентной вязкости $\tilde{\nu}$ формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial\rho\tilde{\nu}}{\partial t}+\frac{\partial\rho\bar{u}_j\tilde{\nu}}{\partial x_j}=\rho P^\nu+\rho D^\nu+\frac{\rho}{\sigma}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\nu+\tilde{\nu}\right)\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)+c_{b2}\left[\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right]\right], \tag{9}$$

где $\mu_t = \rho f_{v1} \tilde{\nu},\ f_{v1} = \dfrac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}{}^3},\ \chi = \dfrac{\nu}{\tilde{\nu}},$

$$P^{\nu} = c_{b1}\left(1 - f_{t2}\right)\tilde{S}\tilde{\nu},\ D^{\nu} = \left(c_{v1} f_w - \frac{c_{b1}}{k^2} f_{t2}\right)\left(\frac{\tilde{\nu}}{d_w}\right)^2,$$

$$\tilde{S} = \Omega + f_{v2}\frac{\tilde{\nu}}{\left(kd_w\right)^2},\ f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}},$$

$$f_w = g\left(\frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6}\right)^{\frac{1}{6}},\ g = r + c_{w2}\left(r^6 - r\right),\ r = \frac{\tilde{\nu}}{\tilde{S}\left(kd_w\right)^2},$$

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}},\ \Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i}\right),\ f_{t2} = C_{t3} e^{-C_{t4}\chi^2}.$$

Здесь d_w — расстояние до ближайшей твердой стенки, P^{ν}, D^{ν} — генерационный член и член, ответственный за подавление турбулентности у стенки, Ω — модуль тензора завихренности.

Эмпирические константы модели задаются следующим образом:

$$\sigma = \frac{2}{3}, k = 0.41,\ c_{b1} = 0.1355,\ c_{b2} = 0,622,$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{k^2} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma},\ c_{w2} = 0.3,\ c_{w3} = 2,\ c_{v1} = 7.1,$$

$$C_{t1} = 1,\ C_{t2} = 2,\ C_{t3} = 1.2,\ C_{t4} = 0.5.$$

Модель $k\omega - SST$ представляет собой комбинацию моделей $k - \varepsilon$ и $k - \omega$. Формулировка модели $k\omega - SST$, записанной в терминах k (кинетическая энергия турбулентности) и ω (удельная скорость диссипации) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{u_j} k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \beta^* \rho \omega k, \\ &\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \overline{u_j} \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_k \mu_t\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + \gamma \frac{\rho}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \left(1 - F_1\right) D_{k\omega}, \end{aligned} \tag{10}$$

где $\beta^*,\ \beta,\ \gamma,\ \sigma_k,\ \sigma_\omega$ — константы модели для $k - \varepsilon$ и $k - \omega$; $D_{k\omega}$ — перекрестная диффузия; P_k — генерационный член.

Для определения турбулентной вязкости используется формула Бредшоу, которая ограничивает вязкость в пристеночном пограничном слое и позволяет избежать характерного для $k - \varepsilon$ моделей затягивания отрыва:

$$\mu_T = \frac{a_1 \rho k}{\max\left(a_1 \omega, \Omega F_2\right)},$$

где

$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left[\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega d_\omega}, \frac{500\tilde{\nu}}{d_\omega^2 \omega}\right]\right)^2\right), \tag{11}$$

а P_k определяется следующим условием:

$$P_k = \min\left(\mu_T S^2, 20\beta^* \rho k \omega\right).$$

Перекрестная диффузия определяется следующим соотношением:

$$D_{k\omega} = \frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

где $\sigma_{\omega 2}$ — константа.

Эмпирические константы модели определяются через соответствующие константы моделей *k*-*ε* и *k*-*ω*, где индексы «1» и «2» относятся соответственно к константам *k*-*ε* и *k*-*ω*:

$$\begin{aligned} \sigma_k &= F_1 \sigma_{k1} + \left(1 - F_1\right)\sigma_{k2}, \\ \sigma_\omega &= F_1 \sigma_{\omega 1} + \left(1 - F_1\right)\sigma_{\omega 2}, \\ \beta &= F_1 \beta_1 + \left(1 - F_1\right)\beta_2. \end{aligned} \tag{12}$$

Функция F_1 определяется уравнением:

$$F_1 = \tanh\left(\left(\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega d_\omega}, \frac{500\tilde{\nu}}{d_\omega^2 \omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{d_\omega^2 \cdot \max\left\{D_{k\omega}, 10^{-20}\right\}}\right]\right)^4\right). \tag{13}$$

В приведённых выше формулах используются следующие константы:

$$\sigma_{k1} = 0.85;\ \sigma_{\omega 1} = 0.5;\ \beta_1 = 0.075;\ \sigma_{k2} = 1;\ \sigma_{\omega 2} = 0.856;\ \beta_2 = 0.0828;$$

$$\beta^* = 0.09;\ k = 0.41;\ a_1 = 0.31;\ \gamma = \beta / \beta^* - \sigma_\omega k^2 / \sqrt{\beta^*}.$$

Кроме того, в работе применяются методы на основе решения нестационарных уравнений Навье-Стокса в, так называемой, ламинарной постановке. Сходимость решения определяется по установлению по времени перепада давления. Шаг по времени при этом берется таким образом, чтобы число Куранта не превышало единицы.

Данный подход позволяет с удовлетворительной точностью определять сопротивление ПСМ при высоких скоростях потока [27].

Для численного решения уравнений формируются СЛАУ в соответствии с SIMPLE-подобным алгоритмом [40], в котором поля скорости и давления вычисляются по схеме предиктор-корректор. Конвективные слагаемые скорости и плотности аппроксимируются линейной противопоточной схемой второго порядка точности. Для аппроксимации операторов градиента на гранях контрольного объёма применялась схема второго порядка с ограничителем градиента. Для выполнения численного моделирования применяется ПП «Логос» [39]. Перепад давления Δp определяется как разность осредненных по площади значений полного давления на входной и выходной грани.

Расчетная область представляет собой параллелепипед размерами $\left(L_{\text{in}} + B + L_{\text{out}}\right) \times L_w \times L_s$ (Рис. 1), который включает в себя представительный элемент ПСМ толщиной B. Размеры L_w и L_s, определяются габаритами моделируемого представительного элемента ПСМ. Входной участок L_{in} необходим для гидродинамической стабилизации течения, выходной L_{out} – для исключения влияния выходного граничного условия на реальные характеристики потока после прохождения ПСМ.

Геометрические модели расчетной области были построены в отечественной САПР (Система автоматизированного проектирования) T-Flex. Для сеток с квадратными ячейками были сформированы параметризованные модели области течения, где изменяемыми параметрами являются d_w, n_w, L_{in}, L_{out}. Валидация расчетных моделей проводилась на данных [6], [17] и [32]. Геометрические параметры ПСМ и расчетной области приведены в таб. 1:

Таблица 1

Геометрические параметры ПСМ для валидации

№	Имя	Тип плетения	d_w, мм	n_w, м$^{-1}$	Re_{Ar}	Ссылка
1	Yoshida № 6	Full twill	0,0385	11806,4	0,17-5,26	[32]
2	Yoshida № 10	Full twill	0,0530	7874,0	0,16-4,79	[32]
3	Cady № 2	Plain square	0,0660	5905,5	0,96-315,85	[6]
4	Iwaniszyn № 1	Plain square	1,1325	234,3	1,86-108,13	[17]

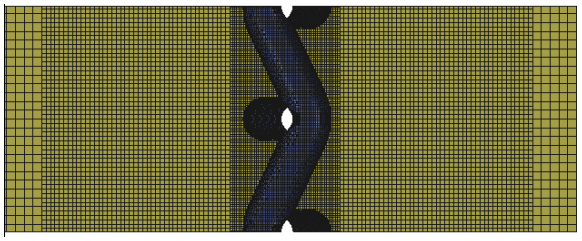
Значения теплофизических свойств среды, использованные в валидационных расчетах, приведены в таблице 2.

Таблица 2

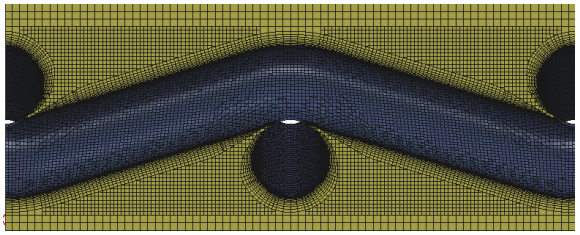
Теплофизические свойства среды в валидационных данных

Имя ПСМ	**ρ, кг/м^3**	**μ, Па·с**
Yoshida № 6	1,21	$1{,}80\cdot10^{-5}$
Yoshida № 10	1,21	$1{,}80\cdot10^{-5}$
Iwaniszyn № 1	1,205	$1{,}81\cdot10^{-5}$
Cady № 2 Азот	1,12	$1{,}79\cdot10^{-5}$
Cady № 2 Жидкий водород	60,2	$9{,}23\cdot10^{-6}$

Особенности формирования геометрической и дискретной модели. Для построения объемной сеточной модели использовался генератор метода отсечения. Для всех вариантов расчетной сетки выделялись две подобласти с уменьшенным характерным размером ячейки (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Пример расчётной сетки:
а) — области измельчения пространственного шага сетки;
б) — сетка с призматическими

В области расположения ПСМ характерный размер ячейки был в четыре раза меньше базового значения. В области, расположенной по обе стороны от экрана ПСМ примерно на расстоянии, равном размеру моделируемой сетки в поперечном направлении, характерный размер составлял половину базового.

Для исключения влияния сеточной модели на получаемые результаты и определения оптимальных по точности и необходимым

компьютерным ресурсам размеров ячеек проведено исследование сеточной сходимости. Рассматривались три варианта сеточной модели с последовательным (кратным двум) изменением базового размера (табл. 3). Результаты исследования сеточной сходимости для варианта ПСМ Yoshida № 10 представлены в следующей таблице 3.

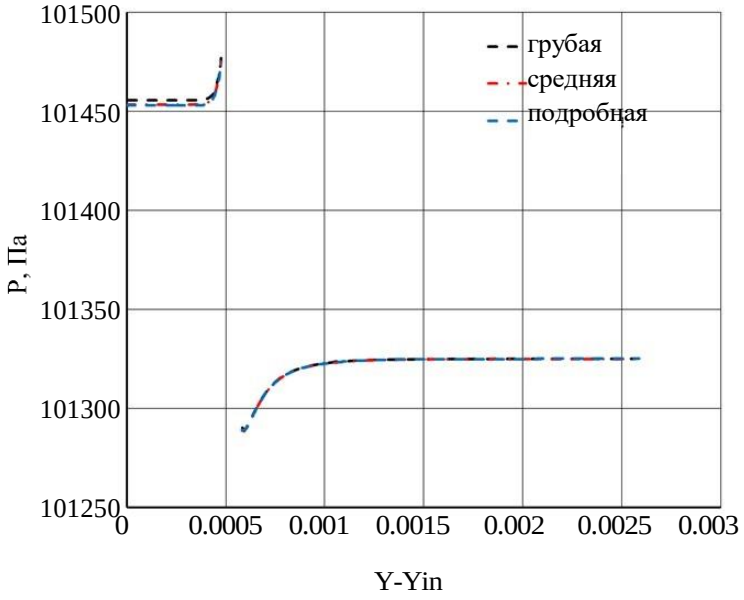
Таблица 3

Параметры расчетных сеток при исследовании сходимости и потери давления на стационарном режиме

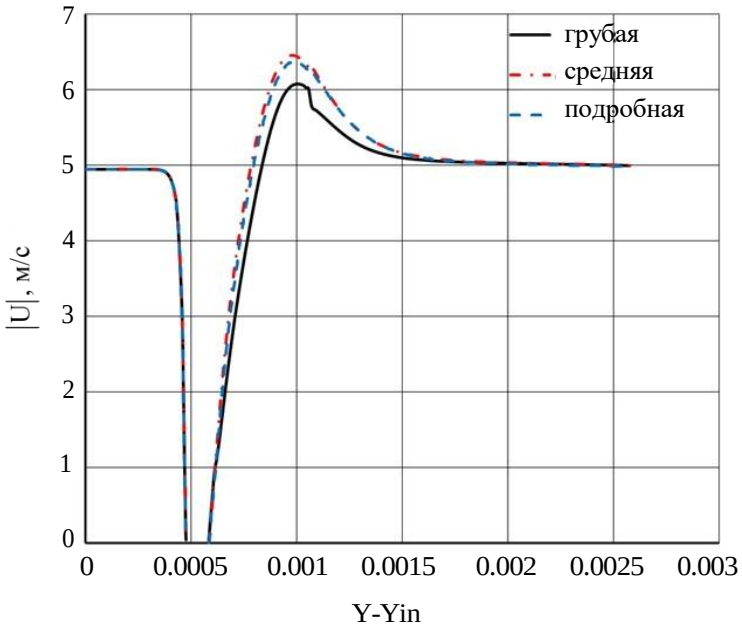
Название сетки	**Базовый размер ячейки, м**	**Минимальный размер ячейки, м**	**Число контрольных объёмов**	**Δp, Па**
Грубая	2,0·10-5	5,0·10-6	510499	130,4
Средняя	1,0·10-5	2,5·10-6	3152681	128,4
Подробная	5,0·10-6	1,25·10-6	24259797	127,8

Относительное расхождение значений перепада давления на средней и грубой сетке от результатов, полученных на самой подробной сетке, квадратично падает с уменьшением пространственного шага примерно в 4.2 раза.

Результаты расчета локальных параметров на различных сетках приведены в виде профилей давления и модуля скорости на линии проходящей через центры входного и выходного сечений.



а)



б)

Рис. 4. Профили параметров задачи на центральной линии расчетной области: а) — давление; б) — модуль скорости

Максимальная разница между грубой и подробной сетками по давлению составляет около 2 %. Максимальное отклонение между средней и подробной сетками по давлению составило 0.5 %. Аналогично, по модулю скорости максимальное отклонение между грубой и подробной сетками составляет около 5 %, а между средней и подробной — 1.3 %.

В случае сеток саржевого плетения с квадратными ячейками в [33] было показано, что точность расчета потерь давления слабо меняется при увеличении размера представительного элемента относительно представленной на рис. 1б конфигурации. Для ПСМ полотняного плетения с квадратными ячейками также были выполнены расчеты по определению влияния параметров представительного элемента на точность определения потерь давления. На рис. 5 приведены результаты моделирования для ПСМ Iwaniszyn № 1 при $u_{in} = 0,08$ м/с.

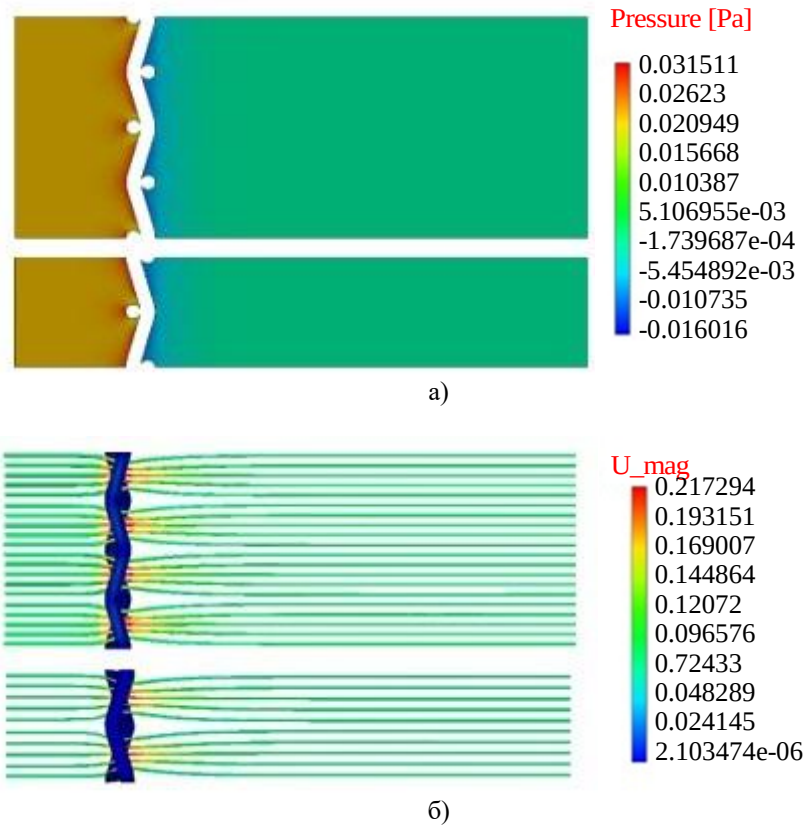


Рис. 5. Сравнение результатов расчета для представительного элемента размером в одну ячейку периодичности и четыре ячейки периодичности:
а) — давление; б) — линии тока

Расчетные значения потерь давления для одной ячейки периодичности составили 0,02224 Па, а для представительного элемента из четырех ячеек периодичности – 0,02219 Па. Различие составило 0,2 % относительно результата на большем представительном элементе. Таким образом, потери давления на ПСМ полотняного плетения с квадратными ячейками могут быть корректно смоделированы на основе одной ячейки периодичности.

Геометрические модели ПСМ содержат точечные контакты между нитями. Для исключения образования ячеек низкого качества при построении расчетной сетки, точечные контакты между нитями необходимо заменить на контактные поверхности малой площади. Были рассмотрены четыре модели контактов (рис. 4): цилиндры диаметром 0.25, 0.50, 0.75 от диаметра нити ПСМ, а также модель взаимного проникновения нитей на 0.1 диаметра от диаметра нити ПСМ для ПСМ Yoshida № 6.

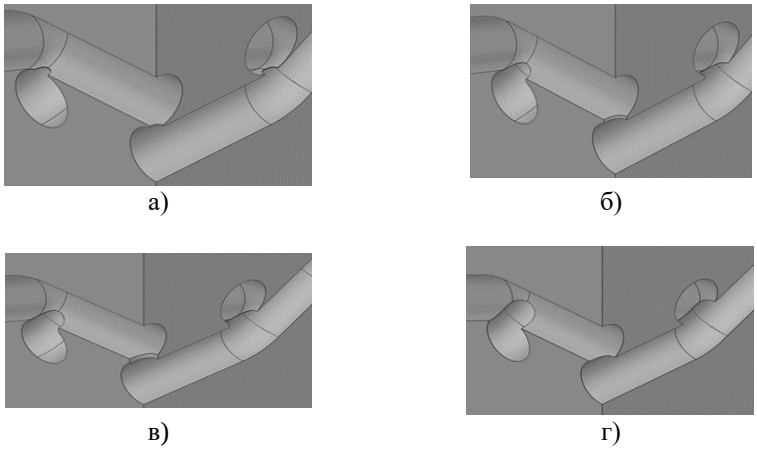


Рис. 6. Варианты геометрических моделей области контакта нитей ПСМ:
а) — цил. 0,25 d_w ; б) — цил. 0,5 d_w ; в) — цил. 0,75 d_w ;
г) — проникновение 0,1 d_w

Результаты моделирования Δp при различных вариантах контактов и сравнение с экспериментальными данными [32] приведены на рис. 7.

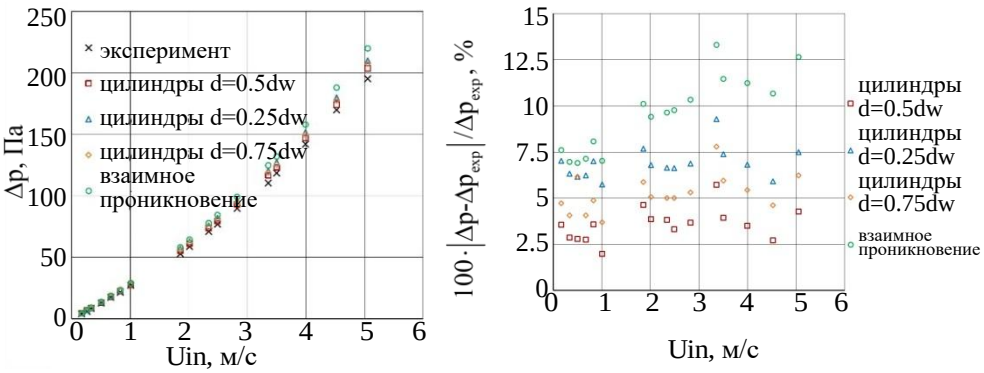


Рис. 7. Сравнение Δp , полученного в расчете для различных типов контактов с экспериментальными данными

Наименьшее отклонение от экспериментальных данных соответствует модели с пятнами контакта, сформированными цилиндрами диаметром в половину диаметра нити ПСМ. В этом случае для абсолютного большинства точек относительное отклонение от данных опыта [32] варьируется от 2,5 % до 6 %. Самый худший результат показал вариант контактов с взаимным проникновением нитей ПСМ. Для этого варианта максимальное отклонение варьируется в пределах от 7 % до 13.5 %. Варианты геометрических моделей контактов с цилиндрами большего и меньшего размеров дают результаты хуже, чем

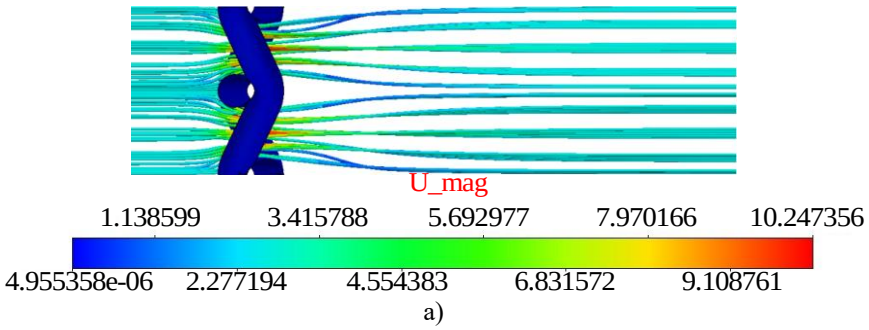
в случае цилиндров диаметров в половину диаметра нити ПСМ. Поэтому для построения моделей рекомендуется использовать вариант с цилиндром $d = 0.5d_w$.

Нестационарные режимы течения и применимость RANS моделей. При повышении скорости течения все большее влияние на течение оказывают силы инерции. При этом, характер течения становится существенно нестационарным, с возникновением сначала периодических отрывных процессов, а потом и развитием турбулентных пульсаций. Анализ литературы не позволяет сделать однозначный вывод о границах применимости стационарной модели в зависимости от режима течения, а также выводов о на возможности и использования различных RANS подходов. Было выполнено расчетное исследование применимости различных подходов к моделированию гидравлических потерь давления на вязкостно-инерционном и чисто инерционном (турбулентном) режимах течения. Результаты расчета представлены в безразмерном виде, причем масштабы коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса выбраны согласно работе [13]:

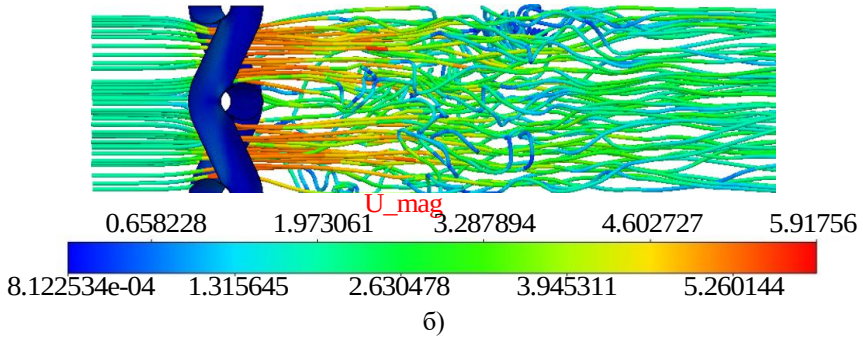
$$\begin{aligned} Re_{Ar} &= \frac{\rho u}{\mu a^2 d_h}, \\ \xi_{Ar} &= \frac{\varepsilon^2 d_h \Delta p}{QB\rho u^2}, \end{aligned} \tag{14}$$

где d_h — гидравлический диаметр пор ПСМ, ρ — плотность жидкости, u — скорость натекания жидкости на ПСМ, μ — коэффициент динамической вязкости жидкости, ε — пористость, Q — коэффициент извилистости, B — толщина элемента ПСМ.

В качестве примера рассмотрим ПСМ Cady № 2 из работы [6]. На рисунке 8 приведены результаты моделирования течения газообразного азота со скоростью на входе в расчетную область, равной $u_{in} = 2,66$ м/с, и для жидкого водорода со скоростью на входе $u_{in} = 1,98$ м/с. Указанные случаи соответствуют следующим значениям числа Рейнольдса по Армору: $Re_{Ar} = 4,08$ для азота и $Re_{Ar} = 316$ для жидкого водорода.



а)



б)

Рис. 8. Линии тока в ПСМ Cady № 2: а) — расчеты для $Re_{Ar} = 4{,}1$ при течении газообразного азота с применением стационарной постановки; б) — расчеты для $Re_{Ar} = 316.0$ при течении жидкого водорода с применением нестационарной постановки и недоразрешенного DNS

При малых значениях числа Рейнольдса режим течения ламинарный, без существенных деформаций линий тока. С увеличением числа Рейнольдса наблюдаются вихревые структуры, которые не диссипируют даже на значительном удалении от обтекаемых поверхностей. Выполнено сопоставление различных подходов к моделированию на примере опытов Cady на жидком водороде. Результаты сопоставления по давлению приведены на рис. 9.

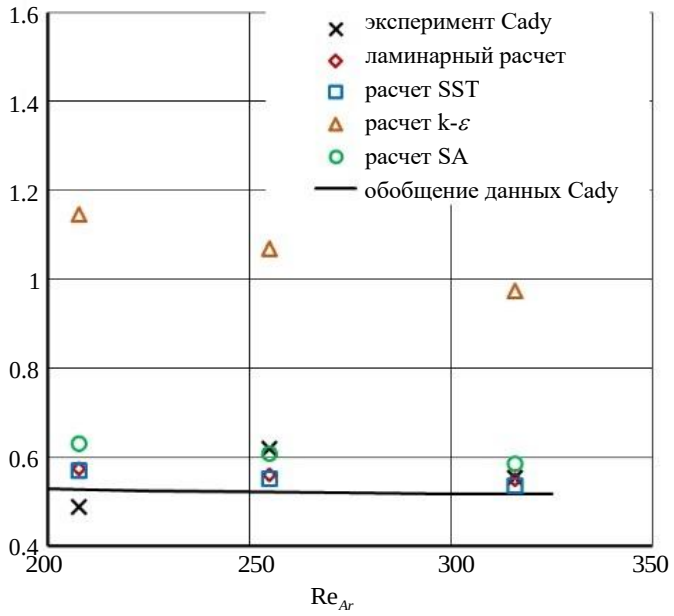


Рис. 9. Результаты расчета эксперимента Cady № 2 с применением различных подходов

Видно, что недоразрешенный ламинарный расчет и модель SST дают наилучший относительно экспериментальных данных результат, отличающийся друг от друга на малую величину.

Автоматизированная методика. Автоматизация повторяющихся действий позволяет существенно сократить время расчетов. Ещё одним преимуществом автоматизации является повышение надежности и воспроизводимости результатов за счет снижения числа ручных операций и связанных с ними ошибок. В данной работе представлена методика автоматизации гидродинамических расчетов в программе «Логос Аэрогидро», реализованная на отечественной платформе DTSeven. На рис. 10 представлена архитектура автоматизированной расчетной цепочки.

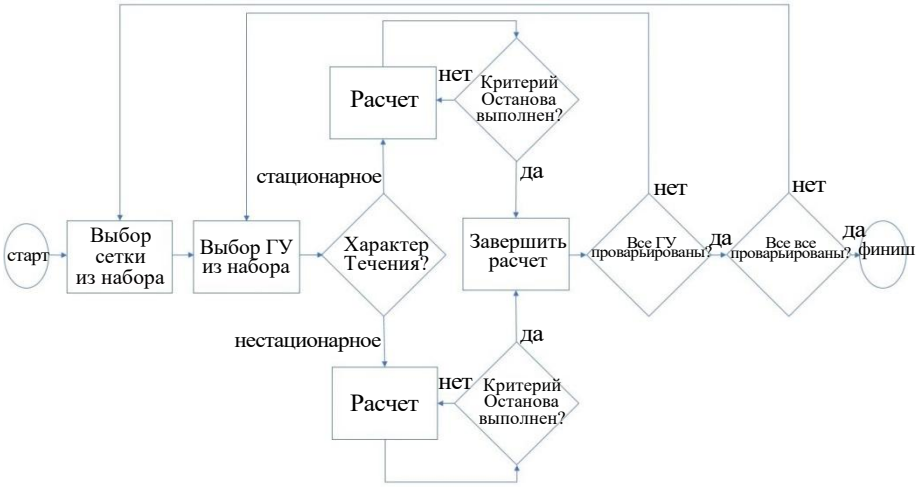


Рис. 10. Автоматизация методики в DTSeven

В основе методики автоматизации лежит систематизированное изменение параметров модели, таких как расчетная сетка и значения граничных условий. Схема была реализована с помощью python-скриптов по средством изменения в директории автоматизированного расчета «ЛогосАэрогидро» параметров yaml-файлов и расчетной сетки. Важным элементом автоматизированного расчёта является изменения типа решателя ПП «Логос» в зависимости от характера течения.

Благодаря полному исключению ручного вмешательства в процесс формирования сетки, запуска расчета и обработки результатов удалось обеспечить одинаковые условия моделирования для более чем 78 вариантов расчетов и свести вариативность, связанную с человеческим фактором, практически к нулю.

Результаты валидации. Моделирование различных вариантов ПСМ (табл. 1) проведено с использованием разработанной автомати-

зированной методики. На рис. 11 приведены результаты моделирования и экспериментальные данные в логарифмическом масштабе.

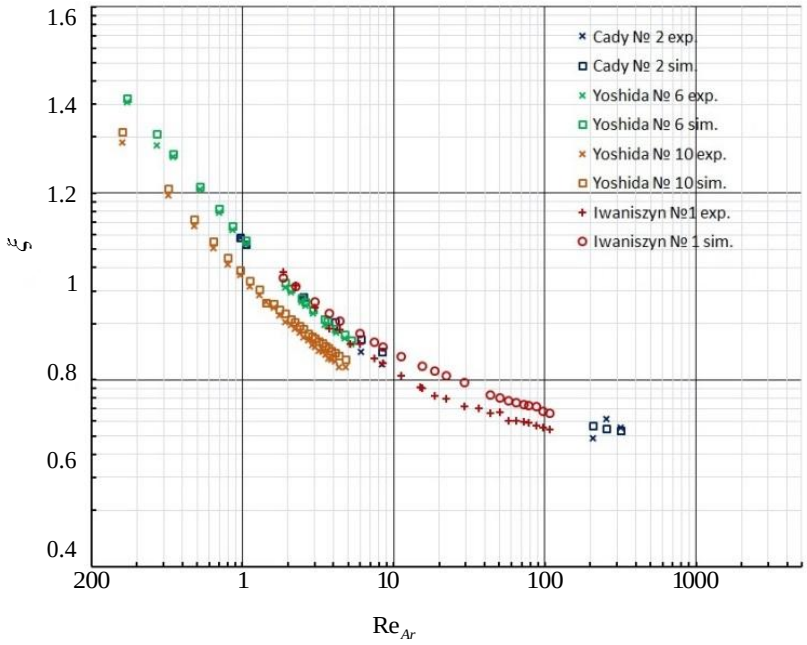


Рис. 11. Обобщение результатов решения валидационных задач для четырех различных вариантов ПСМ в широком диапазоне Re_{Ar}

Диапазон изменения Re_{Ar} в рассмотренных расчетных вариантах составил от 0,1 до 315. Результаты моделирования с помощью предложенной методики демонстрируют как качественное, так и количественное совпадение с данными экспериментов различных авторов. Максимальное отклонение от данных опытов наблюдалось при сравнении с работой [17] в диапазоне Re_{Ar} от 10 до 100, и составило до 35 %. Нужно отметить, что в эксперименте из [17] рассматривается пакет одинаковых сеток, в то время как данные опытов и расчетов на рис. 11 пересчитаны для одного экрана ПСМ. Указанное обстоятельство демонстрирует, что вопрос применимости вычисления потерь давления в многослойных пакетах сеток путем простого сложения суммирования потерь давления на отдельных слоях не является общепримени́мым и требует дальнейшего изучения. При малых скоростях течения соответствующих Re_{Ar} менее 10 погрешность результатов моделирования относительно экспериментальных точек не превысила 16 %. Отклонение расчета от данных опытов [6] при больших значениях Re_{Ar} также не превысило 17 %. При этом, в эксперименте наблюдался больший по величине разброс точек.

Для оценки применимости расчётных методов определения потерь давления целесообразно сопоставить их с известными из литературы теоретическими зависимостями. Первой из моделей, с которой будет выполнено сопоставление, является соотношение из работы [13]:

$$\xi_{Ar} = \frac{8.61}{Re_{Ar}} + 0.52. \tag{15}$$

Другое выражение, полученное в результате экспериментально-теоретического анализа в работе [17], описывает связь между гидравлическим сопротивлением ξ и числом Re в следующем виде:

$$\xi_{Iw} = \frac{3.44}{\sqrt{L^+}\,Re_{Iw}} + \frac{1.25/4L^+ + 16 - 3.44/\sqrt{L^+}}{\left(1 + 0.00021/\left(L^+\right)^2\right)Re_{Iw}} + \frac{0.0791}{Re_{Iw}^{0.25}},$$

$$\xi_{Iw} = \frac{1}{2}\frac{\Delta p d_w \varepsilon \cos\Theta}{\rho u^2 (1-\varepsilon)\Lambda^2 B}, \quad Re_{Iw} = \frac{\rho u_e d_h}{\mu}, \tag{16}$$

$$L^+ = \frac{d_w}{d_h Re_{Iw}}, \quad u_e = \frac{u}{\varepsilon}\Lambda, \quad \Lambda = 1 + \frac{1-\varepsilon}{2}, \quad \tan\Theta = \frac{d_w}{2\left(\frac{1}{n_w} - d_w\right)}.$$

Также в работе [15] предложена теоретико-аналитическая зависимость, полученная на основе уравнения Дарси-Форхгеймера, которую можно записать в следующем виде:

$$\xi_{Wa} = 16\frac{C_s}{\tau^2\varepsilon}\frac{1}{Re_{Wa}} + 0.41\frac{\sqrt{C_s}}{\tau\varepsilon^2},$$

$$C_s = \frac{2}{B^2}\left(Yd - l^2 d\right)\left(\frac{d}{Y}ln\left(\frac{l^2 - 2Y}{l^2}\right)\right), \textit{полотняное},$$

$$C_s = \frac{2}{B^2}\left(l^2 d - \frac{2}{3}dY\right)\left(\frac{2}{3}\frac{d}{l^2 - Y} - \frac{4}{3}\frac{d}{Y}ln\left(\frac{l^2 - 2Y}{l^2}\right)\right), \textit{саржевое}, \tag{17}$$

$$\tau = \frac{2l^2}{\pi d^2 + (\pi + 2)(l - d)d + 2(l - d)^2},$$

$$d_h = 4\varepsilon / a, \quad d = d_w, \quad l = 1/n_w, \quad L_{ch} = d_h/2, \quad Y = \frac{\pi d l}{4},$$

$$Re_{Wa} = \frac{\rho u L_{ch}}{\mu}, \quad \xi_{Wa} = \frac{2L_{ch}\Delta p}{B\rho u^2}.$$

Здесь C_s — коэффициент Форхгеймера, τ — фактор извилистости линий тока.

На рис. 12 приведены результаты сопоставления коэффициентов сопротивления сеток, полученных с помощью расчета по предложенной методике, экспериментальных данных и расчетов с помощью универсальных зависимостей (8), (9) и (10).

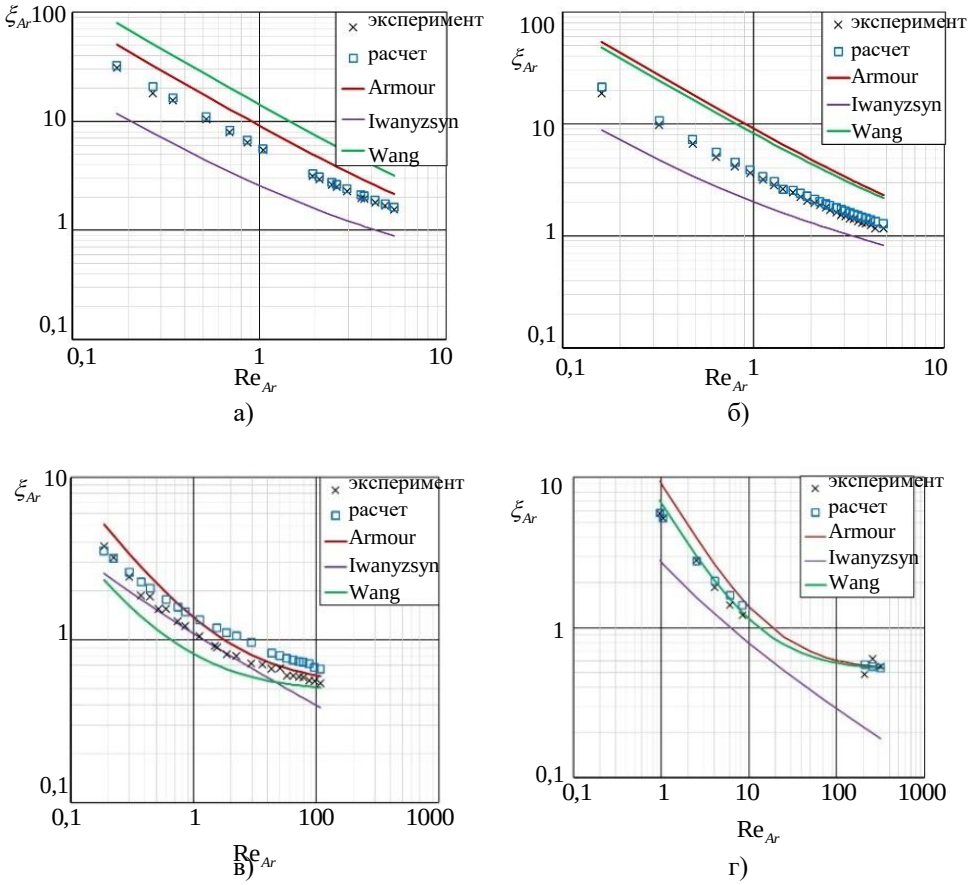


Рис. 12. Сопоставление результатов расчета по предложенной методике с данными экспериментов и вычислений по универсальным зависимостям [13], [17] и [15]: а) — Yoshida № 6; б) — Yoshida № 10; в) — Cady № 2; г) — Iwaniszyn № 1

Сопоставление показало, что расчетный метод определения сопротивления ПСМ дает существенно меньшую погрешность по сравнению с применением зависимостей вида (15), (16) и (17). В случае ПСМ Yoshida № 6 (рис. 12 а) формулы (15) и (16) дают максимальную погрешность около 60 % относительно экспериментальных данных, а формула (17) – 180 %, тогда как предложенная методика дает ошибку, не превышающую 6 %. В случае ПСМ Yoshida № 10 (рис. 12 б) формулы (15) и (17) дают максимальную погрешность 150 - 180 % относительно экспериментальных данных, а формула (16) – 53 %, тогда как предложенная методика дает ошибку, не превышающую 9 %.

В случае ПСМ Cady № 2 (рис. 12 в) формула (15) дает максимальную погрешность 63 % относительно экспериментальных данных, формула (16) – 42 %, а соотношение (17) – 7 %. Предложенная методика дает ошибку, не превышающую 16 %. В случае ПСМ Iwaniszyn № 1 (рис. 12 г) формула (15) дает максимальную погрешность 38 % относительно экспериментальных данных, формула (16) – 32 %, соотношение (17) – 38 %, тогда как предложенная методика дает ошибку, не превышающую 35 %. Таким образом, можно сделать вывод, что в общем случае предложенная расчетная методика позволяет определить потери давления с существенно более высокой точностью, чем вычисление по известным зависимостям из литературы.

Заключение. Разработана методика определения гидравлических характеристик пористых сетчатых материалов на основе численного моделирования, включающая подходы к построению параметризованных геометрических моделей ПСМ, формированию расчетных сеток и автоматизацию всех этапов вычислений.

Для ПСМ с квадратными ячейками проведено исследование применимости различных вариантов моделирования пятен контакта. Показано, что модель цилиндрических контактов диаметром в половину диаметра нити ПСМ обеспечивает минимальную погрешность и наиболее близко воспроизводит экспериментальные данные. Также для ПСМ полотняного плетения с квадратными ячейками подтверждена возможность использования в качестве представительного элемента одной ячейки периодичности.

Выполнена валидация методики на четырех независимых наборах экспериментальных данных. Показано, что расхождение между расчетами и экспериментом не превышает 6 – 17 % во всем диапазоне чисел Рейнольдса, за исключением вязкостно-инерционного участка, где максимальная погрешность может достигать 35 %. При этом, в соответствующем этому участку валидационном примере проводился эксперимент на многослойном пакете ПСМ, тогда как в представленной работе моделировался один слой соответствующей сетки. Поэтому наблюдаемые в расчетах отклонения могут быть связаны с невыполнением предположения о равенстве общего перепада давления на пакете сеток сумме потерь давления на каждом слое.

Также выполнено сопоставление результатов моделирования с известными из литературы обобщающими зависимостями для гидравлических потерь на ПСМ. Результаты сравнения демонстрируют в среднем существенно более высокую точность применения предложенной методики. Максимальное отклонение рассчитанных по предложенной методике потерь давления от экспериментальных данных более чем в два раза ниже, чем максимальные отклонения потерь давления от экспериментальных данных, вычисленные с применением каждой из трех рассмотренных аналитических моделей.

Методика полностью реализована на отечественном программном обеспечении и автоматизирована, что обеспечивает её практическую применимость при проведении дальнейших исследований и решении практических задач. Полученные результаты создают основу для формирования обобщённой базы данных гидравлических характеристик ПСМ и последующего решения обратных задач выбора геометрии под требуемые эксплуатационные параметры.

Результаты получены при финансовой поддержке, реализуемой в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение №3-03 от 18.02.2025)

ЛИТЕРАТУРА

[1] Багров В.В., Курпатенков А.В., Поляев В.М., Синцов А.Л., Сухоставец В.Ф. *Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических аппаратов*. Москва, УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997, 328 с.

[2] Белов С.В. и др. *Пористые проницаемые материалы: Справ. Изд.* Москва, Металлургия, 1987, 335 с.

[3] *Сетка тканная с квадратными ячейками микронных размеров.* Технические условия ТУ 14-4-507-99.

[4] *Сетка тканная фильтровая № 685.* Технические условия ТУ 14-4-697-2001.

[5] Александров Л.Г., Константинов С.Б., Платов И.В., Новиков Ю.М, Большаков В.А., Партола И.С. Применение комбинированных пористо-сетчатых материалов в конструкциях фазоразделительных и фильтрующих устройств космических жидкостных ракетных двигательных установок: современное состояние и проблемы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, № 3, с. 22-59.

[6] Cady E. Study of Thermodynamic Vent and Screen Baffle Integration for Orbital Storage and Transfer of Liquid Hydrogen. *Mc Donnal Douglas Astronautics Company and National Aeronautics and Space Administration*, 1973.

[7] Shukla, P., Dreyer, M. Phase Separation through Screen Channel Liquid Acquisition Devices in Microgravity. *Microgravity Sci. Technol*, 2024, vol. 36, pp. 1-24.

[8] Bisht K.S., Dreyer M.E. Phase Separation in Porous Media Integrated Capillary Channels. *Microgravity Sci. Technol*. 2020, vol. 32, pp. 1001-1018.

[9] Camarotti C., Deng O., Darr S., Hartwig J., Chung J.N. Screen Compliance Experiments for Application of Liquid Acquisition Device in Space. *Microgravity Sci. Technol*, 2019, vol. 31, pp. 109-122.

[10] Поляев В.М., Генбач А.А. Применение пористой системы в энергетических установках. *Промышленная энергетика*, 1992, № 1, с. 40-43.

[11] Glatt E., Rief S., Wiegmann A., Knefel N., Wegenke E. Structure and pressure drop of real and virtual metal wire meshes. *Filtration*, 2010, vol. 10, no. 1.

[12] Kraft S.M., Moslehy F.A., Bai Y., Gordon A.P. Characterization of the Orthotropic Elastic Constants of a Micronic Woven Wire Mesh via Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 2014, vol. 54, pp. 501-514.

[13] Armour J.C., Cannon J.N. Fluid Flow Through Woven Screens. *AIChE Journal*, 1968, vol. 14, no. 3, pp. 415–420.

[14] Fischer A., Gerstmann J. *Flow Resistance of Metallic Screens in Liquid, Gaseous and Cryogenic Flow*. EUCASS, Munich, Germany, 2013, 12 p.

[15] E. Wang, Guang Yang, Yiye Huang, Yonghua Huang, Rui Zhuan, Jingyi Wu, Analytical model of flow-through-screen pressure drop for metal wire screens considering the effects of pore structures. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 229, art. 116037.

[16] Devisilov V., Zhdanov S., Belov S. Hydaulic Resistance of Woven Metal Screens. *New Machinery and Equipment*, 1989, p. 449 – 452.

[17] Iwaniszyn M., Sindera K., Gancarczyk G., Korpy´s M., Jędrzejczyk R.J., Kołodziej A., Jodłowski P.J. Experimental and CFD investigation of heat transfer and flow resistance in woven wire gauzes. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2021, vol. 163, art. 108364.

[18] Ludewig M., Omori S., Rao G.L. *Pressure drop across woven screens under uniform and nonuniform flow conditions*. NASA-CR-120559, 1974, ID 19750005995.

[19] Azizi F. On the pressure drop of fluids through woven screen meshes. *Chemical Engineering Science*, 2019, vol. 207, pp. 464-478.

[20] Bussiere W., Rochette D., Clain S., Andre P., Renard J.B. Pressure drop measurements for woven metal mesh screens used in electrical safety switchgears. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, vol. 65, pp. 60–72.

[21] Burge G.W., Blackmon J.B. *Study and design of cryogenic propellant acquisition systems. Volume 2: Supporting experimental program.* NASA-27685 MDAC Report MDCG 5038, 1973, ID 19740021092.

[22] Hartwig J. W. et al. A steady state pressure drop model for screen channel liquid acquisition devices. *Cryogenics*, 2014, vol. 64, pp. 260-271.

[23] Kołodziej A. et al. An experimental study of the pressure drop in fluid flows through wire gauzes. *Chemical Engineering Communications*, 2009, vol. 196, № 8, pp. 932-949.

[24] Пелевин Ф. В. Гидравлическое сопротивление пористых металлов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 2(671), с. 42-52.

[25] Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns. *Chemical Engineering Progress*, 1952, vol. 48, pp. 89-94.

[26] Wu W. T., Liu J. F., Li W. J., Hsieh W. H. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 48, no. 14, pp. 3008-3017.

[27] Green S.I, Wang Z., Waung T., Vakil A. Simulation of the flow through woven fabrics. *Computers & Fluids*, 2008, vol, 37, pp. 1148–1156.

[28] Middelstadt F., Gerstmann J. Numerical Investigations on Fluid Flow through Metal Screens. *Materials of 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, 2013, pp. 1-15.

[29] Zhi Z., Chen H., Longtin J. P., Alkhader M., Venkatesh T. A. Computational modeling of through-thickness flow and pressure drop characteristics in woven matrix porous media. *International Journal of Modelling and Simulation*, 2019.

[30] Zhou Y., Guo C., Guo W., Zhu Q., Zhang P. Investigation of flow and pressure drop through porous metallic screens with different weave densities. *Cryogenics*, 2023, vol. 129, art. 103618.

[31] Abou-Hweij W., Azizi F. CFD simulation of wall-bounded laminar flow through screens. Part I: Hydrodynamic characterization. *European Journal of Mechanics. B Fluids*, 2020, vol. 84, pp. 207–232.

[32] Yoshida Y., Inoue Y., Shimosaka A., Shirakawa Y. and Hidaka J. Numerical

Simulation of Flow Resistivity of Metal Woven Mesh. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2015, vol. 48, no. 7, pp. 545–555.

[33] Городнов А.О., Лаптев И.В., Сидоренко Н.Ю., Иванов М.Ю., Малахов А.С., Реш Г.Ф. Математическое моделирование процессов ламинарной и турбулентной фильтрации жидкой несжимаемой среды в пористых сетчатых материалах. *Математическое моделирование и численные методы*, 2023, № 2, с. 67–89.

[34] Okolo P.N., Zhao K., Kennedy J., Bennett G.J. Numerical assessment of flow control capabilities of three dimensional woven wire mesh screens. *European Journal of Mechanics. B Fluids*, 2019, vol. 76, pp. 259–271.

[35] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, vol. 3, no. 2, pp. 269-289.

[36] Menter F.R. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows. *Fluid Flow and Transfer Processes*, 1993, art. no. 2906, 22 p.

[37] Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 1992, 23 p.

[38] Димитриенко Ю.И., Богданов И.О. Многомасштабное моделирование процессов фильтрации жидкого связующего в композитных конструкциях, изготавливаемых методом RTM. *Математическое моделирование и численные методы*, 2017, № 2, с. 3–27.

[39] Пакет программ Логос [Электронный ресурс]. Пакет программ Логос. URL: http://logos-cae.ru

[40] Димитриенко Ю.И., Богданов И.О. Многомасштабное моделирование процессов фильтрации в пористых средах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, № 3(75), с. 17-38.

Статья поступила в редакцию 13.12.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Королева А.П., Минин С.В., Городнов А.О., Лаптев И.В., Петрова С.В. Численное моделирование гидравлических характеристик пористых сетчатых материалов. *Математическое моделирование и численные методы*, 2026, № 1, с. 22–48.

Королева Анастасия Павловна — канд. техн. наук, руководитель группы, Научно-технологический университет «Сириус». e-mail: koroleva.anp@talantiuspeh.ru

Минин Сергей Витальевич — старший инженер-исследователь, Научно-технологический университет «Сириус». e-mail: minin.sv@talantiuspeh.ru

Городнов Анатолий Олегович — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник АО ГНЦ «Центр Келдыша», главный инженер-исследователь Научно-технологический университет «Сириус». e-mail: an.ol.gorodnov@gmail.com

Лаптев Игорь Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, АО ГНЦ «Центр Келдыша», главный инженер-исследователь, Научно-технологический университет «Сириус». e-mail: laptev.iv.kerc@gmail.com

Петрова Светлана Владимировна — научный сотрудник АО ГНЦ «Центр Келдыша», специалист-исследователь, Научно-технологический университет «Сириус», аспирант, МФТИ. e-mail: petrova.sv@phystech.edu

Numerical modeling hydraulic characteristics of porous mesh materials

© A.P. Koroleva[1], S.V. Minin1, A.O. Gorodnov[1,2],
I.V. Laptev[1,2], S.V. Petrova[1,2,3]

[1]Sirius University of Science and Technology, federal territory Sirius, 354340, Russia
[2]Keldysh Research Center, Moscow, 125438, Russia
[3]Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyy, Moscow Region, 141700, Russia

This work presents an automated methodology for determining the hydraulic characteristics of porous mesh materials (PMMs) using computational modeling techniques. The proposed approach incorporates parameterized geometric models of PMMs with various weaving patterns, procedures for generating the discrete model and computational setup, as well as automated methods for conducting simulations and processing results. An investigation was performed to assess the adequacy of the assumptions adopted within the methodology, including the types and parameters of filament contact spots in the idealized geometry, the representative element size, and mesh-convergence behavior. These studies were carried out using validation data obtained from the open literature. It is demonstrated that the developed methodology provides an accuracy of pressure-drop prediction for fluid flow through PMMs within 6 – 17 % across a wide range of Reynolds numbers and different PMM types, which significantly surpasses the accuracy of universal correlation dependencies whose errors reach 30–180%. The results confirm the validity of using idealized geometric models of PMMs, provided that the structure of the representative element and the filament-contact model are selected appropriately.

***Keywords**: mathematical modeling, porous mesh materials, hydraulic resistance, calculation automation*

REFERENCES

[1] Bagrov V.V., Kurpatenkov A.V., Polyaev V.M., Sintsov A.L., Sukhostavets V.F. *Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskih apparatov* [Capillary systems for collecting liquid from spacecraft tanks]. Moscow, UNPTs «Energomash», 1997, 328 p.

[2] Belov S.V. *Poristye pronicaemye materialy: Sprav. Izd.* [Porous permeable materials: Reference. Ed.]. Moscow, Metallurgiya Publishers, 1987, 335 p.

[3] *Woven mesh with square micron-sized cells*. Technical specifications TU 14-4-507-99.

[4] *Woven filter mesh No. 685*. Technical specifications TU 14-4-697-2001.

[5] Aleksandrov L.G., Konstantinov S.B., Platov I.V., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A., Partola I.S. Use of combined porous mesh material in phase separation and filtering devices design for space liquid propellant rocket propulsion systems: current state and problems. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii* [Engineering journal: science and innovation], 2023, no. 3, pp. 22-59.

[6] Cady E. Study of Thermodynamic Vent and Screen Baffle Integration for Orbital Storage and Transfer of Liquid Hydrogen. *Mc Donnal Douglas Astronautics Company and National Aeronautics and Space Administration*, 1973.

[7] Shukla, P., Dreyer, M. Phase Separation through Screen Channel Liquid Acquisition Devices in Microgravity. *Microgravity Sci. Technol*, 2024, vol. 36, pp. 1-24.

[8] Bisht K.S., Dreyer M.E. Phase Separation in Porous Media Integrated Capillary Channels. *Microgravity Sci. Technol*. 2020, vol. 32, pp. 1001-1018.
[9] Camarotti C., Deng O., Darr S., Hartwig J., Chung J.N. Screen Compliance Experiments for Application of Liquid Acquisition Device in Space. *Microgravity Sci. Technol*, 2019, vol. 31, pp. 109-122.
[10] Polyaev V.M., Genbach A.A. Primenenie poristoj sistemy v energeticheskih ustanovkah [Application of porous systems in power plants]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 1992, no. 1, pp. 40-43.
[11] Glatt E., Rief S., Wiegmann A., Knefel N., Wegenke E. Structure and pressure drop of real and virtual metal wire meshes. *Filtration*, 2010, vol. 10, no. 1.
[12] Kraft S.M., Moslehy F.A., Bai Y., Gordon A.P. Characterization of the Orthotropic Elastic Constants of a Micronic Woven Wire Mesh via Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 2014, vol. 54, pp. 501-514.
[13] Armour J.C., Cannon J.N. Fluid Flow Through Woven Screens. *AIChE Journal*, 1968, vol. 14, no. 3, pp. 415–420.
[14] Fischer A., Gerstmann J. *Flow Resistance of Metallic Screens in Liquid, Gaseous and Cryogenic Flow*. EUCASS, Munich, Germany, 2013, 12 p.
[15] E. Wang, Guang Yang, Yiye Huang, Yonghua Huang, Rui Zhuan, Jingyi Wu, Analytical model of flow-through-screen pressure drop for metal wire screens considering the effects of pore structures. *Chemical Engineering Science*, 2021, vol. 229, art. 116037.
[16] Devisilov V., Zhdanov S., Belov S. Hydaulic Resistance of Woven Metal Screens. *New Machinery and Equipment*, 1989, p. 449 – 452.
[17] Iwaniszyn M., Sindera K., Gancarczyk G., Korpy´s M., Jędrzejczyk R.J., Kołodziej A., Jodłowski P.J. Experimental and CFD investigation of heat transfer and flow resistance in woven wire gauzes. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2021, vol. 163, art. 108364.
[18] Ludewig M., Omori S., Rao G.L. *Pressure drop across woven screens under uniform and nonuniform flow conditions*. NASA-CR-120559, 1974, ID 19750005995.
[19] Azizi F. On the pressure drop of fluids through woven screen meshes. *Chemical Engineering Science*, 2019, vol. 207, pp. 464-478.
[20] Bussiere W., Rochette D., Clain S., Andre P., Renard J.B. Pressure drop measurements for woven metal mesh screens used in electrical safety switchgears. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, vol. 65, pp. 60–72.
[21] Burge G.W., Blackmon J.B. *Study and design of cryogenic propellant acquisition systems. Volume 2: Supporting experimental program.* NASA-27685 MDAC Report MDCG 5038, 1973, ID 19740021092.
[22] Hartwig J. W. et al. A steady state pressure drop model for screen channel liquid acquisition devices. *Cryogenics*, 2014, vol. 64, pp. 260-271.
[23] Kołodziej A. et al. An experimental study of the pressure drop in fluid flows through wire gauzes. *Chemical Engineering Communications*, 2009, vol. 196, № 8, pp. 932-949.
[24] Pelevin V.F. Hydraulic resistance of porous metals. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Mashinostroenie* [Journal of Higher Education Institutions. Mechanical Engineering], 2016, no. 2, pp. 42-52.
[25] Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns. *Chemical Engineering Progress*, 1952, vol. 48, pp. 89-94.
[26] Wu W. T., Liu J. F., Li W. J., Hsieh W. H. Measurement and correlation of hydraulic resistance of flow through woven metal screens. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 48, no. 14, pp. 3008-3017.
[27] Green S.I, Wang Z., Waung T., Vakil A. Simulation of the flow through woven fabrics. *Computers & Fluids*, 2008, vol, 37, pp. 1148–1156.
[28] Middelstadt F., Gerstmann J. Numerical Investigations on Fluid Flow through

Metal Screens. *Materials of 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS)*, 2013, pp. 1-15.

[29] Zhi Z., Chen H., Longtin J. P., Alkhader M., Venkatesh T. A. Computational modeling of through-thickness flow and pressure drop characteristics in woven matrix porous media. *International Journal of Modelling and Simulation*, 2019.

[30] Zhou Y., Guo C., Guo W., Zhu Q., Zhang P. Investigation of flow and pressure drop through porous metallic screens with different weave densities. *Cryogenics*, 2023, vol. 129, art. 103618.

[31] Abou-Hweij W., Azizi F. CFD simulation of wall-bounded laminar flow through screens. Part I: Hydrodynamic characterization. *European Journal of Mechanics. B Fluids*, 2020, vol. 84, pp. 207–232.

[32] Yoshida Y., Inoue Y., Shimosaka A., Shirakawa Y. and Hidaka J. Numerical Simulation of Flow Resistivity of Metal Woven Mesh. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2015, vol. 48, no. 7, pp. 545–555.

[33] Gordonov A.O., Laptev I.V., Sidorenko N.Yu., Ivanov M.Yu., Malahov A.S., Resh G.F. Mathematical modeling of laminar and turbulent filtration processes of liquid incompressible medium in porous mesh materials. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2023, no. 2, pp. 67–89.

[34] Okolo P.N., Zhao K., Kennedy J., Bennett G.J. Numerical assessment of flow control capabilities of three dimensional woven wire mesh screens. *European Journal of Mechanics. B Fluids*, 2019, vol. 76, pp. 259–271.

[35] Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, vol. 3, no. 2, pp. 269-289.

[36] Menter F.R. Zonal two equation k-ω turbulence models for aerodynamic flows. *Fluid Flow and Transfer Processes*, 1993, art. no. 2906, 22 p.

[37] Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 1992, 23 p.

[38] Dimitrienko Yu.I., Bogdanov I.O. Multiscale modeling of liquid binder filtration processes in composite structures manufactured by RTM. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2017, no. 2, pp. 3–27.

[39] Logos software package [Electronic resource]. Logos software package. URL: http://logos-cae.ru

[40] Dimitrienko Yu.I., Bogdanov I.O. Multiscale modeling filtration processes in porous media. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii* [Engineering journal: science and innovation], 2018, vol. 3, no. 75, pp. 17-38.

Koroleva A.P., Cand. Sc. (Eng.),Professor, Head of Department, Sirius University of Science and Technology. e-mail: koroleva.anp@talantiuspeh.ru

Minin S.V., Senior Research Engineer, Sirius University of Science and Technology. e-mail: minin.sv@talantiuspeh.ru

Gorodnov A.O., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Leading Research Scientist, Keldysh Research Center, Chief Research Engineer, Sirius University of Science and Technology. e-mail: an.ol.gorodnov@gmail.com

Laptev I.V., Phys.-Math.), Head of Department, Keldysh Research Center, Chief Research Engineer, Sirius University of Science and Technology. e-mail: laptev.iv.kerc@gmail.com

Petrova S.V., Research Scientist, Keldysh Research Center, Research Specialist, Sirius University of Science and Technology, PhD Student, MIPT. e-mail: an.ol.gorodnov@gmail.com