

УДК 532.546

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕЙСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И АНАЛИЗ КАЧЕСТВА МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

О.В. Соловьева¹, С.А. Соловьев^{1,2}, О.С. Попкова¹

¹*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, 420066, Россия*

²*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

Аннотация

Взаимозависимые перегородки, расположенные в трехмерных пористых структурах, создают проблему понимания сущности течения жидкости, которое существенно отличается от течения в традиционных пористых средах. Строение высокопористой ячейистой среды требует использования различных законов течения (Дарси, Форхгеймера либо непосредственного решения уравнений Навье–Стокса, поскольку заранее не известно значение проницаемости среды). Целью настоящей работы являлось определение влияния сглаживания в высокопористой ячейистой структуре на сопротивление среды. В качестве характеристики сопротивления рассмотрен перепад давления для заданного расхода газа. Основными параметрами пористой среды являются пористость, диаметры ячеек и волокон, поэтому существенным является определение параметра, вносящего наибольший вклад в изменение перепада давления. Компьютерная модель высокопористой ячейистой упаковки среды представлена упорядоченным набором пересекающихся сфер. В результате гидродинамического расчета, проведенного с использованием программного комплекса ANSYS Fluent (версия 19.0), был определен перепад давления, значение которого сравнивалось с экспериментальными данными других авторов. В ходе исследований было обнаружено, что модель пористой структуры с применением автоматического сглаживания всех граней, которое проводится с помощью стандартной процедуры программы AutoCAD, по сравнению с моделью со сглаживанием, проведенным вручную, а также с моделью без сглаживания обеспечивает наибольший перепад давления при фиксированном значении пористости среды. Таким образом, аппроксимация элементарной пористой ячейки существенно искажает поле течения, что является нежелательным при детальном моделировании высокопористого ячейистого материала. Дополнительно были проведены расчеты перепада давления при попеременной фиксации параметров – пористости, диаметра ячейки и диаметра волокна среды. Расчеты показали, что определяющим для гидродинамики является диаметр волокна пористой структуры.

Ключевые слова: трехмерная модель, пористость, диаметр ячейки, диаметр волокна, перепад давления

Введение

Высокопористые ячейистые материалы с развитой площадью поверхности широко применяются в различных отраслях промышленности. Среди различных пористых сред металлические высокопористые ячейистые материалы демонстрируют ряд преимуществ: низкая плотность, умеренная жесткость, высокая прочность и высокое отношение плотности к объему, вследствие чего они активно используются в различных приложениях, таких как охлаждение микроэлектроники, топливных

элементов и компактных теплообменников. Для указанных приложений определение значения перепада давления является ключевой проблемой для контроля потока, совершенствования передачи тепла, планирования и развития процессов химической технологии [1].

Необходимость моделирования трехмерной структуры пористых сред и определение соответствующих геометрических характерных размеров приводят к росту фундаментальных исследований с целью использования их в химической инженерии. В работе [2] для исследования падения давления в высокопористых ячеистых материалах была применена комбинация микрокомпьютерной томографии, имитационного моделирования и вычислительной гидродинамики (CFD). Анализ охватывает ряд режимов потока и направлен на определение влияния важных морфологических параметров на перепад давления. Технология микрокомпьютерной томографии наряду с подробным CFD-моделированием позволяет исследовать явления, происходящие в реальных микроструктурах пористого материала. Более того, с помощью инструментов обработки изображений геометрию можно искусственно модифицировать для того, чтобы исследовать эффекты математического преобразования геометрических параметров реальной высокопористой среды по одному отдельному параметру (к примеру, изменяя размер пор и не изменяя пористости среды). Для анализа результатов были определены безразмерные коэффициенты с целью описания перепада давления в зависимости от числа Рейнольдса. Предложенная формулировка позволяет связать свойство проницаемости высокопористого ячеистого материала с его морфологией вне зависимости от свойств жидкости или эффективного характерного размера пористой структуры (размера ячеек пор).

Механическое, термомеханическое и жидкостное динамическое моделирование высокопористых ячеистых материалов требует точной геометрической модели и осуществляется в работе [3]. Обычно модели основаны на данных компьютерной томографии, которые не позволяют анализировать систематическое изменение и проводить оптимизацию геометрии. С другой стороны, полностью генерируемые компьютерные модели в основном собираются из примитивных объектов, таких как цилиндры. При этом не учитывается изменение толщины ребер, округление узлов, что наблюдается в реальных высокопористых ячеистых материалах. Авторами статьи [3] представлен подход к созданию моделей керамических высокопористых ячеистых материалов с использованием простых объектов переменной толщины, генерируемых неявными функциями. Этот подход может также учитывать полости внутри перегородок и узлов, которые наблюдаются во многих реальных структурах. Качество генерируемых моделей высокопористой среды проверяется с использованием данных компьютерной томографии реальных пористых сред.

В статье [4] создана и подтверждена CFD-модель для расчета каталитических реакций, происходящих на поверхности высокопористых ячеистых материалов. Этот подход основан на связанном методе конечного объема/конечной области, способном описывать жидкостно-динамические и химические явления, происходящие как в жидкой, так и в твердой фазах. Адсорбция/десорбция активных веществ на участках и поверхностная реакция моделируются на основе механизма Ленгмюра – Хиншельвуда.

В последние годы с ростом вычислительных возможностей появляются работы, посвященные детальному компьютерному моделированию пористых сред с использованием различных моделей. Компьютерное моделирование пористой структуры как модели керамического высокопористого ячеистого материала представлено в [5]. За геометрическую ячейку материала они принимали сферу с 12 сегментами, полученными отсечением сфер, таким образом составлялась структура

из 13 элементарных ячеек, что соответствует гранецентрированной кубической упаковке сфер, модель высокопористой ячеистой упаковки состояла из 21 слоя таких ячеек.

В статье [6] процесс течения газовой смеси в пористой среде исследовался как на основе численного моделирования с использованием компьютерной томографии, так и с помощью натуральных экспериментов. Получено существенное расхождение результатов численного моделирования с экспериментальными данными и данными, полученными по полуэмпирической формуле работы [7]. Причины расхождения в работе не объясняются.

В статье [8] проведено моделирование гидродинамики в различных трехмерных структурах пористой среды: тетраэдраэдронные ячейки Кельвина, кубические решетки и многогранные структуры. Расчеты проводились при разных числах Рейнольдса и Эйлера. Проведенные расчеты способствовали пониманию методов оптимизации пористой среды.

Авторами [9] был изучен процесс теплообмена и осуществлен расчет значения перепада давления в периодической элементарной ячейке пористой среды, представляющей собой структуру тетраэдраэдронной ячейки с центральной сферой.

Модель единичной ячейки была предложена и изучена в работе [10], в которой макроскопический подход позволяет пренебречь мелкими деталями (например, наличием вкраплений) в пористой среде. В указанной работе перепад давления оценивается также на основе уравнения Форхгеймера, которое представляет собой закон движения потока в пористой среде.

В [11] была протестирована модель пористой ячеистой среды, представляющей собой додекаэдр (12 пятиугольных поверхностей, 20 точек и 30 граней). Результаты расчетов хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований при определении перепада давления в зависимости от скорости газа при различных значениях параметров пористости среды. На основе проведенных исследований была предложена новая модель для расчета перепада давления с внесенными поправками.

В статье [12] проведено численное моделирование на основе рентгеновской компьютерной томографии и экспериментальное исследование гидродинамики для пяти различных коммерческих металлических пористых образцов при большом диапазоне скоростей преимущественно в турбулентном режиме. Было проанализировано также изменение перепада давления в зависимости от толщины образцов. Значения проницаемости и коэффициента Форхгеймера были получены как из расчетов, так и из натуральных экспериментов. Численное моделирование, основанное на микротомографии, авторами работы [13] было проведено для определения эффективной теплопроводности и проницаемости среды.

В работе [14] для численного моделирования теплопереноса с фазовыми превращениями вещества была использована модель микропористой структуры с массивом твердотельных кубических ячеек с 9 сферическими порами, расположенными в решетке Больцмана. Было проведено прямое численное моделирование для определения эффективной теплоотдачи как функции пористости и определено, что эффективная теплопроводность является нелинейной функцией параметров микропористой среды. Кроме того, были построены распределения температур в ячейках, профили температур по времени.

Основываясь на серии экспериментальных данных, полученных с помощью рентгеновской томографии или сканирующей электронной микроскопии, можно хорошо описать некоторые особенности высокопористой ячеистой среды (средний размер ячейки и диаметр волокна). Используемые при этом методы сложны, требуют значительных временных затрат. Основной целью работы [15] являлась

разработка новой, простой и быстрой техники для оценки основных характерных размеров (размеры ячейки, диаметра волокна) высокопористой ячеистой структуры.

В статье [16] продемонстрирована неоднозначность измерений и интерпретации ключевых параметров, было предложено эквивалентное число Рейнольдса в виде числа Форхгеймера для определения фактора, исключаяющего любые морфологические неоднозначности. Это число учитывает гидравлические характеристики вязкого и инерционного режима одновременно. Получены эмпирические корреляции для прогнозирования гидравлических характеристик при различных значениях параметра пористости среды. Было достигнуто хорошее согласие между предсказанными численными и экспериментальными данными.

В работе [17] изучалось использование алюминиевой высокопористой ячеистой среды в качестве элемента охлаждения аккумуляторной батареи. Рассматривались образцы с различной проницаемостью. Численные расчеты течения в алюминиевой пористой среде позволили определить оптимальное значение пористости, при которой наблюдается низкое гидравлическое сопротивление с одновременно высоким значением теплоотдачи.

В статье [18] представлены экспериментальные исследования теплопередачи при течении воды в образцах алюминиевых высокопористых ячеистых материалов, помещенных в цилиндр с подводимым постоянным тепловым потоком. Были испытаны два вида промышленных материалов с характеристиками 10 и 40 пор на дюйм (ppi). Измерялась температура стенки по длине образца, средние температуры воды на входе и выходе из образца. Выбираемые расходы соответствовали как режиму Дарси, так и режиму Форхгеймера.

В статье [19] представлена аналитическая модель, позволяющая прогнозировать падение давления ньютоновской несжимаемой жидкости, проходящей через высокопористый ячеистый материал в режимах потока Дарси и Форхгеймера. Аналитические исследования проводились для определения проницаемости и коэффициента инерции. Аналитическая модель основана на подходе объемного усреднения и предположении о кусочно-плоском потоке Пуазейля с модифицированной кубической решеткой со сферическим узлом на стыке перегородок.

В работе [20] использована идеализированная модель элементарной ячейки тетракайдекаэдра для численного исследования сопряженного переноса тепла в высокопористых ячеистых структурах с пористостью 0.95. Особое внимание уделено влиянию размера и формы поперечного сечения ячеек на теплопроводность, течение жидкости и теплоотдачу. Сделан вывод о том, что форму ячеек (перегородок и узлов) важно учитывать, особенно, для сред с высокой пористостью.

1. Модель пористой среды

Детальную модель пористой структуры принято характеризовать тремя параметрами: диаметром ячейки (поры), пористостью и диаметром волокна (средним размером толщины жесткой перегородки в рассматриваемой структуре). В литературе эти параметры связываются одним уравнением (см. например, [1]). При создании компьютерной модели важно знать, какой из параметров является определяющим.

Построим модель высокопористой ячеистой структуры в виде упорядоченного набора пересекающихся сфер (рис. 1). Параметрами данной модели являются диаметры сфер, расстояние между их центрами и взаимное расположение.

Анализ литературных данных показал, что использование подобной модели для описания высокопористой ячеистой среды допустимо, однако одной из основных проблем применения такой модели является наличие острых граней (у которых

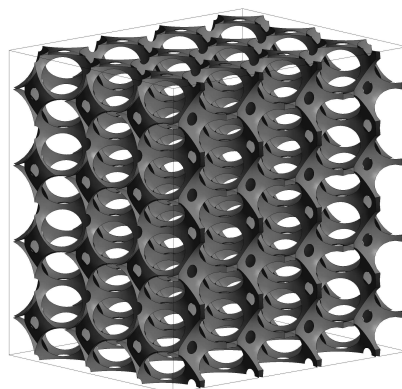


Рис. 1. Модель высокопористой ячеистой структуры

существуют малые углы), возможно влияющих на картину течения газа. Следовательно, целесообразным представляется проводить сглаживание граней, с этой целью была построена вторая модель со сглаженными гранями. Расчеты проводились с использованием обеих геометрических моделей.

2. Модель движения газа в пористой среде

Основными моделями, описывающими движение газа в пористой среде, являются модель Дарси и модель Форхгеймера. Однако для произвольной структуры их невозможно использовать из-за наличия неизвестного параметра проницаемости. В настоящей работе течение для построенной трехмерной модели рассчитывалось в CFD-решателе ANSYS Fluent методом конечных объемов.

Течение газа рассматривалось в приближении уравнений Навье – Стокса:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{U} &= 0, \\ (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} &= -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \vec{U},\end{aligned}$$

где \vec{U} – вектор скорости газа, ρ – плотность газа, P – давление, ν – кинематический коэффициент вязкости газа.

В литературе существуют полуэмпирические модели зависимости перепада давления от скорости фильтрации, базирующиеся на результатах натуральных экспериментов. Например, в работе [7] получена формула

$$\Delta P = l \cdot (A \cdot Po^2 \cdot U + B \cdot U^3 + O(U^5)), \quad (1)$$

где l – толщина пористой структуры, Po – пористость структуры, измеряемая в ppr , A , B и $O(U^5)$ – параметры, получаемые из экспериментов.

В работе [6] представлена адаптированная формула

$$\Delta P = l \cdot (A \cdot Po^2 \cdot U + B \cdot U^3), \quad (2)$$

где A и B – параметры, получаемые из экспериментов, описанных в [6].

Для определения адекватности модели пористой среды и влияния сглаживания граней на перепад давления была проведена серия численных расчетов, результаты которых представлены на рис. 2 для заданных диаметра ячейки d_c и пористости среды ε .

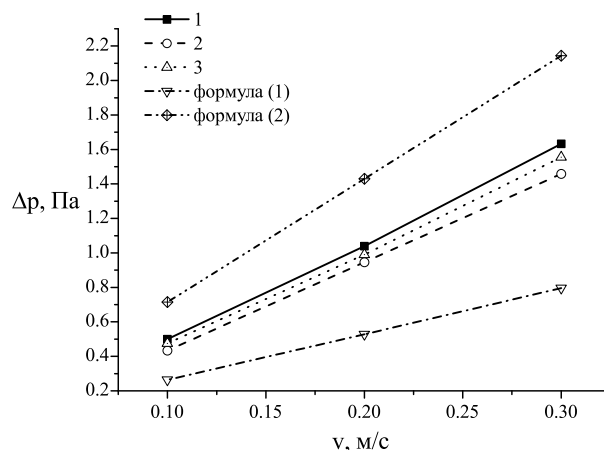


Рис. 2. Кривые зависимости перепада давления от скорости фильтрации на 1 мм толщины для разных моделей пористой структуры: 1 – численный расчет без сглаживания граней $\varepsilon = 0.9555$, $d_c = 506$ мкм, 2 – численный расчет со сглаживанием граней $\varepsilon = 0.9583$, $d_c = 506$ мкм, 3 – численный расчет без сглаживания граней $\varepsilon = 0.9555$, $d_c = 507.06$ мкм

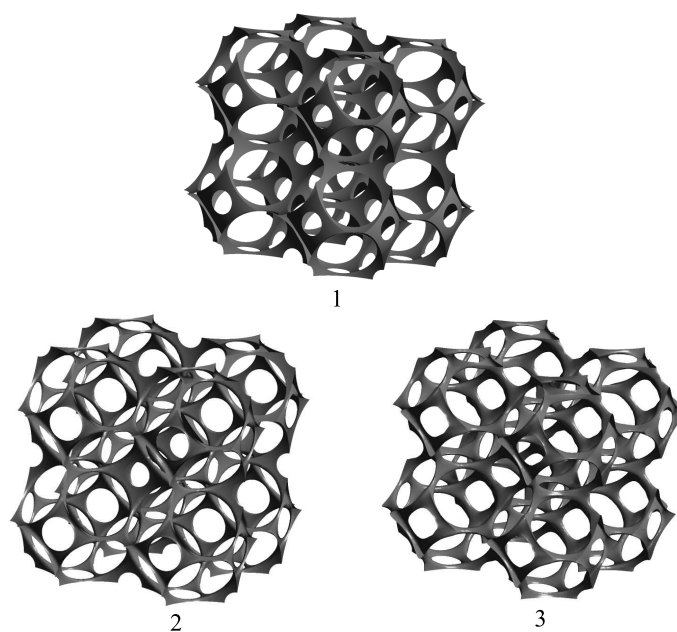


Рис. 3. Геометрические модели пористой среды: 1 – без сглаживания граней, 2 – ручное сглаживание граней, 3 – автоматическое сглаживание граней

Графики, построенные по результатам расчетов, оказались между кривыми, полученными по двум полуэмпирическим формулам работ [6, 7]. Пористая структура со сглаженными гранями обеспечивает наименьшее значение перепада давления в проведенных расчетах. Результаты расчетов при аппроксимации пористой структуры без сглаживания граней показывают более высокое значение перепада давления при соответствующем подборе пористости и диаметра ячейки. Таким образом, простая аппроксимация высокопористой ячейистой структуры может вносить существенную ошибку в расчет силы сопротивления.

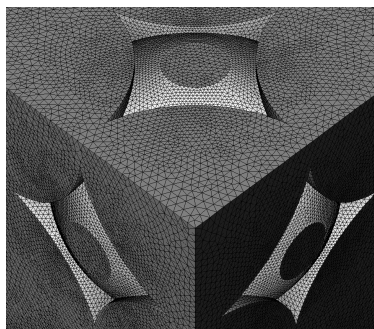


Рис. 4. Пример сеточного разбиения

Табл. 1

Параметры расчетов

Фиксированный параметр	$d_c = 0.5123$	$d_f = 0.05$	$\varepsilon = 0.97$
d_{c1}	const	0.5123	0.5123
d_{c2}	const	0.5103	0.5098
d_{c3}	const	0.5148	0.516
d_{f1}	0.05	const	0.05
d_{f2}	0.035	const	0.046
d_{f3}	0.058	const	0.049
ε_1	0.97	0.97	const
ε_2	0.975	0.971	const
ε_3	0.9616	0.969	const

Поскольку проведенные исследования выявили необходимость сглаживания граней ячейки, были созданы модели пористой среды со сглаженными гранями вручную и сглаженными гранями автоматически (рис. 3).

Для корректности расчета течения газа в ячейках структуры число элементов выбиралось равным в среднем 9 млн. Анализ показал, что сеточное разбиение с меньшим количеством ячеек приводит к ошибкам расчета из-за наличия сложных участков на границах ячеек. Дальнейшее увеличение числа конечных элементов сетки нецелесообразно, поскольку не влияет на результаты расчетов, но при этом приводит к значительным затратам вычислительных ресурсов. Вид сеточного разбиения представлен на рис. 4.

3. Результаты расчетов

Для определения параметра, являющегося основным в изменении гидродинамики течения, был проведен расчет перепада давления в зависимости от скорости потока на входе в пористую среду при фиксированных значениях размера ячейки d_c , диаметра волокна d_f и пористости среды ε для трех моделей пористой среды: 1) пористый элемент без сглаживания, 2) ручное сглаживание и 3) автоматическое сглаживание. Параметры расчетов приведены в табл. 1, индексы 1, 2, 3 соответствуют номеру модели.

На рис. 5–7 представлены результаты расчетов перепада давления в зависимости от скорости при фиксированных параметрах для трех рассматриваемых моделей.

Анализ рисунков показывает, что изменение перепада давления является линейным, следовательно, для подобной пористой структуры действует закон течения

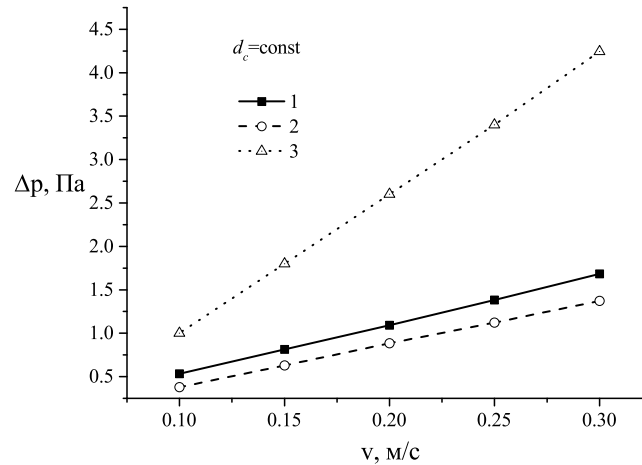


Рис. 5. Зависимость перепада давления от скорости потока при фиксированном диаметре ячейки $d_c = 0.5123$

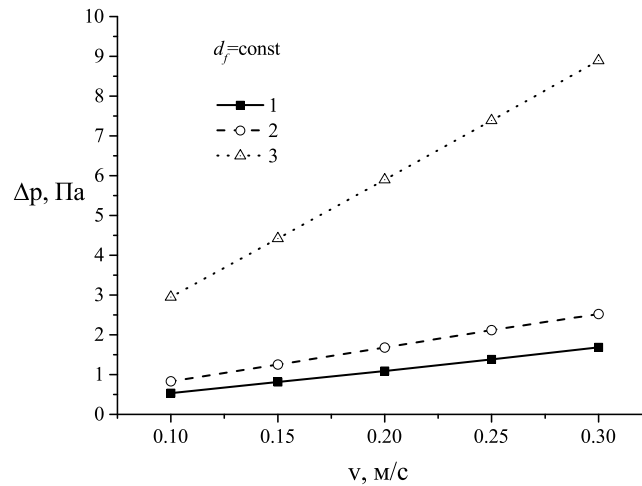


Рис. 6. Зависимость перепада давления от скорости потока при фиксированном диаметре волокна $d_f = 0.05$

Дарси. Проницаемость среды может быть определена из расчета для известного значения скорости и давления. Рассматривая влияние параметров пористой структуры на течение, можно сделать вывод, что максимальный перепад давления наблюдается в случае автоматического сглаживания среды (модель 3). Основным параметром, определяющим поведение потока, является диаметр волокна высокопористого ячеистого материала.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что все три параметра (диаметр ячейки, пористость, диаметр связывающих волокон) вносят вклад в гидродинамический расчет пористой структуры. В случае варианта с автоматическим сглаживанием получается наибольшее значение перепада давления на единицу длины пористого образца. При фиксированном диаметре ячейки и пористости дан-

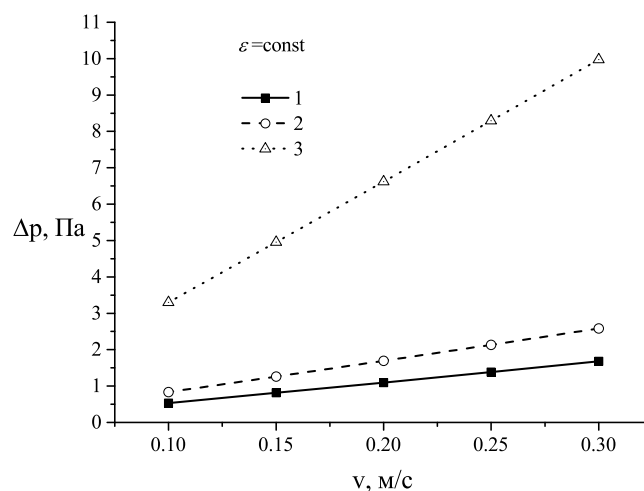


Рис. 7. Зависимость перепада давления от скорости потока при фиксированной пористости среды $\varepsilon = 0.97$

ный вариант дает наибольшее значение диаметра связывающих волокон, который вносит вклад в изменение давления. При фиксированном диаметре волокон автоматическое сглаживание приводит также к наибольшему значению перепада давления за счет наименьшей пористости. Таким образом, форма и размеры волокон в модели высокопористой структуры оказывают большее влияние на сопротивление среды, чем диаметр самих ячеек и пористость.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160005.

Литература

1. Garrido G.I., Patcas F.C., Lang S., Kraushaar-Czarnetzki B. Mass transfer and pressure drop in ceramic foams: A description for different pore sizes and porosities // Chem. Eng. Sci. – 2008. – V. 63, No 21. – P. 5202–5217. – doi: 10.1016/j.ces.2008.06.015.
2. Della Torre A., Montenegro G., Tabor G.R., Wears M.L. CFD characterization of flow regimes inside open cell foam substrates // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2014. – V. 50. – P. 72–82. – doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.05.005.
3. Storm J., Abendroth M., Emmel M., Liedke T., Ballaschk U., Voigt C., Kuna M. Geometrical modelling of foam structures using implicit functions // Int. J. Solids Struct. – 2013. – V. 50, No 3–4. – P. 548–555. – doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.10.026.
4. Della Torre A., Lucci F., Montenegro G., Onorati A., Eggenschwiler P.D., Tronconi E., Groppi G. CFD modeling of catalytic reactions in open-cell foam substrates // Comput. Chem. Eng. – 2016. – V. 92. – P. 55–63. – doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.04.031.
5. Mitrichev I.I., Koltsova E.M., Zhena A.V. Computer simulation of gasodynamic conditions in channels of open cell foam // Fundam. Res. – 2012. – No 11, Pt. 2. – P. 440–446.
6. Hellmann A., Pitz M., Schmidt K., Haller F., Ripperger S. Characterization of an open-pored nickel foam with respect to aerosol filtration efficiency by means of measurement and simulation // Aerosol Sci. Technol. – 2015. – V. 49, No 1. – P. 16–23. – doi: 10.1080/02786826.2014.990555.

7. *Wake D., Brown R.C.* Filtration of monodisperse aerosols and polydisperse dusts by porous foam filters // *J. Aerosol Sci.* – 1991. – V. 22, No 6. – P. 693–706. – doi: 10.1016/0021-8502(91)90063-N.
8. *Horneber T., Rauh C., Delgado A.* Numerical simulations of fluid dynamics in carrier structures for catalysis: characterization and need for optimization // *Chem. Eng. Sci.* – 2014. – V. 117. – P. 229–238. – doi: 10.1016/j.ces.2014.06.036.
9. *Bai M., Chung J.N.* Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams // *Int. J. Therm. Sci.* – 2011. – V. 50, No 6. – P. 869–880. – doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.01.007.
10. *Bianchi E., Groppi G., Schwieger W., Tronconi E., Freund H.* Numerical simulation of heat transfer in the near-wall region of tubular reactors packed with metal open-cell foams // *Chem. Eng. J.* – 2015. – V. 264. – P. 268–279. – doi: 10.1016/j.cej.2014.11.055.
11. *Lacroix M., Nguyen P., Schweich D., Huu C.Ph., Savin-Poncet S., Edouard D.* Pressure drop measurements and modeling on SiC foams // *Chem. Eng. Sci.* – 2007. – V. 62, No 12. – P. 3259–3267. – doi: 10.1016/j.ces.2007.03.027.
12. *de Carvalho T.P., Morvan H.P., Hargreaves D.M., Oun H., Kennedy A.* Pore-scale numerical investigation of pressure drop behaviour across open-cell metal foams // *Transp. Porous Media.* – 2017. – V. 117, No 2. – P. 311–336. – doi: 10.1007/s11242-017-0835-y.
13. *Zafari M., Panjepour M., Emami M.D., Meratian M.* Microtomography-based numerical simulation of fluid flow and heat transfer in open cell metal foams // *Appl. Therm. Eng.* – 2015. – V. 80. – P. 347–354. – doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.045.
14. *Hu X., Wan H., Patnaik S.S.* Numerical modeling of heat transfer in open-cell micro-foam with phase change material // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2015. – V. 88. – P. 617–626. – doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.044.
15. *Belkadi A., Edouard D.* DirectCell technique: A very fast and simple method for characteristic lengths estimation in polyurethane open cell foam // *Chem. Eng. Proc.: Process Intensif.* – 2014. – V. 86. – P. 64–68. – doi: 10.1016/j.cep.2014.10.012.
16. *Kumar P., Topin F.* Predicting pressure drop in open-cell foams by adopting Forchheimer number // *Int. J. Multiphase Flow.* – 2017. – V. 94. – P. 123–136. – doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.04.010.
17. *Saw L.H., Ye Y., Yew M.C., Chong W.T., Yew M.K., Ng T.C.* Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system // *Appl. Energy.* – 2017. – V. 204. – P. 1489–1499. – doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.022.
18. *Arbak A., Dukhan N., Bağcı O., Ozdemir M.* Influence of pore density on thermal development in open-cell metal foam // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2017. – V. 86. – P. 180–188. – doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.04.012.
19. *Yang X.H., Song S.Y., Zhang L.Y., Lu T.J.* Pore-scaled analytical modelling of permeability and inertial coefficient for pressure drop prediction of open-cell metallic foams // *ASME 2016 5th Int. Conf. on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer.* – Am. Soc. Mech. Eng., 2016. – P. V002T15A001-1–V002T15A001-6. – doi: 10.1115/MNHMT2016-6457.
20. *Yang X., Li Y., Zhang L., Jin L., Hu W., Lu T.J.* Thermal and fluid transport in micro-open-cell metal foams: Effect of node size // *J. Heat Transfer.* – 2018. – V. 140, No 1. – Art. 014502, P. 1–6. – doi: 10.1115/1.4037394.

Поступила в редакцию
15.06.18

Соловьева Ольга Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники»

Казанский государственный энергетический университет
ул. Красносельская, д. 51, г. Казань, 420066, Россия
E-mail: *rara_avis86@mail.ru*

Соловьев Сергей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика», старший преподаватель кафедры аэрогидромеханики

Казанский государственный энергетический университет
ул. Красносельская, д. 51, г. Казань, 420066, Россия
Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *Sergey.Solovyov@kpfu.ru*

Попкова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники»

Казанский государственный энергетический университет
ул. Красносельская, д. 51, г. Казань, 420066, Россия
E-mail: *oksiniy@mail.ru*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 4, pp. 681–694

**Modeling of the Three-Dimensional Structure
of Open Cell Foam and Analysis of the Model Quality
Using the Example of Pressure Drop Calculation**

O. V. Soloveva^{a}, S. A. Solovev^{a,b**}, O. S. Popkova^{a***}*

^a *Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia*

^b *Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: **rara_avis86@mail.ru, **Sergey.Solovyov@kpfu.ru,*

****oksiniy@mail.ru*

Received June 15, 2018

Abstract

Interdependent partitions located in three-dimensional porous structures pose a problem for understanding the flow field, which differs significantly from the flow in traditional porous media. The structure of open cell foam requires the use of various flow laws (Darcy, Forchmeyer, or the direct solution of the Navier–Stokes equations, because the value of medium permeability is unknown in advance). The purpose of this work is to determine the effect of smoothing in the open cell foam structure on the resistance of the medium. As a characteristic of the resistance, the pressure drop has been considered for the given gas flow rate. The main parameters of porous medium are the cell diameter, the fiber diameter, and the porosity. Thus, we have determined the parameter that makes the greatest contribution to the pressure drop change. The computer model of open cell foam has been presented as an ordered set of intersecting spheres. For hydrodynamic calculation, we have used the ANSYS Fluent software package. We have compared the calculation results of pressure drop with the experimental

data of other authors. It has been established that the model of a porous medium using of automatic smoothing of all the faces (performed by AutoCAD package) provides the biggest pressure drop at a fixed value of the porosity of the foam compare to the model with smoothed faces manually and the model without smoothing. Thus, the approximation of an elementary porous cell substantially distorts the flow field. It is not good in the detailed simulation of the open cell foam material. In addition, we have made calculations of the pressure drop with different fixed parameters of the medium – porosity, cell diameter, and fiber diameter of the medium. The calculations have shown that hydrodynamics is determined by the fiber diameter of the porous structure.

Keywords: open cell foam, numerical simulation, 3D model, porosity, cell diameter, fiber diameter, pressure drop

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Republic of Tatarstan (project no. 18-41-160005).

Figure Captions

Fig. 1. Model of highly porous cell structure.

Fig. 2. Relation between the pressure drop and the filtration rate per 1 mm of thickness in different models of the porous structure: 1 – numerical calculation of without smoothing of faces $\varepsilon = 0.9555$, $d_c = 506 \mu\text{m}$; 2 – numerical calculation of with smoothing of faces $\varepsilon = 0.9583$, $d_c = 506 \mu\text{m}$; 3 – numerical calculation of without smoothing of faces $\varepsilon = 0.9555$, $d_c = 507.06 \mu\text{m}$.

Fig. 3. Geometric models of the porous medium: 1 – without smoothing of faces; 2 – with manual smoothing of faces; 3 – automatic smoothing of faces.

Fig. 4. Example of mesh spacing.

Fig. 5. Relation between the pressure drop and the flow rate in case of fixed cell diameter $d_c = 0.5123$.

Fig. 6. Relation between the pressure drop and the flow rate in case of fixed fiber diameter $d_f = 0.05$.

Fig. 7. Relation between the pressure drop and the flow rate at fixed medium porosity $\varepsilon = 0.97$.

References

1. Garrido G.I., Patcas F.C., Lang S., Kraushaar-Czarnetzki B. Mass transfer and pressure drop in ceramic foams: A description for different pore sizes and porosities. *Chem. Eng. Sci.*, 2008, vol. 63, no. 21, pp. 5202–5217. doi: 10.1016/j.ces.2008.06.015.
2. Della Torre A., Montenegro G., Tabor G.R., Wears M.L. CFD characterization of flow regimes inside open cell foam substrates. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2014, vol. 50, pp. 72–82. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.05.005.
3. Storm J., Abendroth M., Emmel M., Liedke T., Ballaschk U., Voigt C., Kuna M. Geometrical modelling of foam structures using implicit functions. *Int. J. Solids Struct.*, 2013, vol. 50, nos. 3–4, pp. 548–555. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2012.10.026.
4. Della Torre A., Lucci F., Montenegro G., Onorati A., Eggenschwiler P.D., Tronconi E., Gropi G. CFD modeling of catalytic reactions in open-cell foam substrates. *Comput. Chem. Eng.*, 2016, vol. 92, pp. 55–63. doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.04.031.
5. Mitrichev I.I., Koltsova E.M., Zhena A.V. Computer simulation of gasodynamic conditions in channels of open cell foam. *Fundam. Res.*, 2012, no. 11, pt. 2, pp. 440–446.

6. Hellmann A., Pitz M., Schmidt K., Haller F., Ripperger S. Characterization of an open-pored nickel foam with respect to aerosol filtration efficiency by means of measurement and simulation. *Aerosol Sci. Technol.*, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 16–23. doi: 10.1080/02786826.2014.990555.
7. Wake D., Brown R.C. Filtration of monodisperse aerosols and polydisperse dusts by porous foam filters. *J. Aerosol Sci.*, 1991, vol. 22, no. 6, pp. 693–706. doi: 10.1016/0021-8502(91)90063-N.
8. Horneber T., Rauh C., Delgado A. Numerical simulations of fluid dynamics in carrier structures for catalysis: Characterization and need for optimization. *Chem. Eng. Sci.*, 2014, vol. 117, pp. 229–238. doi: 10.1016/j.ces.2014.06.036.
9. Bai M., Chung J.N. Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams. *Int. J. Therm. Sci.*, 2011, vol. 50, no. 6, pp. 869–880. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.01.007.
10. Bianchi E., Groppi G., Schwieger W., Tronconi E., Freund H. Numerical simulation of heat transfer in the near-wall region of tubular reactors packed with metal open-cell foams. *Chem. Eng. J.*, 2015, vol. 264, pp. 268–279. doi: 10.1016/j.cej.2014.11.055.
11. Lacroix M., Nguyen P., Schweich D., Huu C.Ph., Savin-Poncet S., Edouard D. Pressure drop measurements and modeling on SiC foams. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, vol. 62, no. 12, pp. 3259–3267. doi: 10.1016/j.ces.2007.03.027.
12. de Carvalho T.P., Morvan H.P., Hargreaves D.M., Oun H., Kennedy A. Pore-scale numerical investigation of pressure drop behaviour across open-cell metal foams. *Transp. Porous Media*, 2017, vol. 117, no. 2, pp. 311–336. doi: 10.1007/s11242-017-0835-y.
13. Zafari M., Panjepour M., Emami M.D., Meratian M. Microtomography-based numerical simulation of fluid flow and heat transfer in open cell metal foams. *Appl. Therm. Eng.*, 2015, vol. 80, pp. 347–354. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.045.
14. Hu X., Wan H., Patnaik S.S. Numerical modeling of heat transfer in open-cell micro-foam with phase change material. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2015, vol. 88, pp. 617–626. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.044.
15. Belkadi A., Edouard D. DirectCell technique: A very fast and simple method for characteristic lengths estimation in polyurethane open cell foam. *Chem. Eng. Proc.: Process Intensif.*, 2014, vol. 86, pp. 64–68. doi: 10.1016/j.cep.2014.10.012.
16. Kumar P., Topin F. Predicting pressure drop in open-cell foams by adopting Forchheimer number. *Int. J. Multiphase Flow*, 2017, vol. 94, pp. 123–136. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.04.010.
17. Saw L.H., Ye Y., Yew M.C., Chong W.T., Yew M.K., Ng T.C. Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system. *Appl. Energy*, 2017, vol. 204, pp. 1489–1499. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.022.
18. Arbak A., Dukhan N., Bağcı O., Ozdemir M. Influence of pore density on thermal development in open-cell metal foam. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2017, vol. 86, pp. 180–188. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.04.012.
19. Yang X.H., Song S.Y., Zhang L.Y., Lu T.J. Pore-scaled analytical modelling of permeability and inertial coefficient for pressure drop prediction of open-cell metallic foams. *Proc. ASME 2016 5th Int. Conf. on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer*. Am. Soc. Mech. Eng., 2016, pp. V002T15A001-1–V002T15A001-6. doi: 10.1115/MNHMT2016-6457.

-
20. Yang X., Li Y., Zhang L., Jin L., Hu W., Lu T.J. Thermal and fluid transport in micro-open-cell metal foams: Effect of node size. *J. Heat Transfer*, 2018, vol. 140, no. 1, art. 014502, pp. 1–6. doi: 10.1115/1.4037394.
-

Для цитирования: Соловьева О.В., Соловьев С.А., Попкова О.С. Моделирование трехмерной структуры высокопористых ячеистых материалов и анализ качества модели на примере расчета перепада давления // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 4. – С. 681–694.

For citation: Soloveva O.V., Solovlev S.A., Popkova O.S. Modeling of the three-dimensional structure of open cell foam and analysis of the model quality using the example of pressure drop calculation. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 4, pp. 681–694. (In Russian)