

УДК 541.182.213, 621.928.953

О. В. Соловьева, С. А. Соловьев, О. С. Дмитриева,  
Р. Р. Хусайнов, Р. Р. Яфизов

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ФИЛЬТРАХ С РАЗЛИЧНЫМ ДИАМЕТРОМ ПОР

*Ключевые слова:* высокопористые ячеистые фильтры, эффективность осаждения, численное моделирование.

Рост выбросов загрязняющих веществ на промышленных предприятиях, уменьшение размеров опасных частиц, сложность их улавливания, появление новых материалов поддерживают интерес исследователей к детальному изучению процесса фильтрации, поскольку осредненные модели пористых сред не дают полной картины течения, а как следствие, не позволяют создать материалы с заданными свойствами. Детальное моделирование течения в каждой ячейке требует больших вычислительных затрат, однако по-сути является виртуальным экспериментом и позволяет выявить факторы, вносящие максимальный вклад в значение эффективности осаждения частиц внутри пористого материала. В работе проведено численное моделирование движения газа в высокопористом ячеистом материале (ВПЯМ). Геометрия пористого материала создается множеством пересекающихся сфер, хаотично расположенных в пространстве. Сеточное разбиение обеспечивает прямое численное моделирование с учетом образования множества мелких вихрей в ячейках расчетной области. Исследования проводились для трех характерных размеров пор 4, 5 и 6 мм фильтрующей ячейки с целью определения размера, наиболее предпочтительного для создания и использования пористых фильтров, работающих при заданном расходе. Расчеты показали, что перепад давления прогнозируемо выше для среды с меньшим диаметром ячейки, однако эта разница составляет несколько Паскаль, что является незначительным фактором в выборе фильтрационного материала. Кривые эффективности осаждения частиц для пор диаметром 4 мм находятся выше, тогда как для диаметров 5 и 6 мм расхождение в кривых незначительно. Численные расчеты эффективности осаждения частиц хорошо согласуются с полуэмпирической зависимостью других авторов. Возможности современной трехмерной печати объектов позволяют проводить не только численные, но и экспериментальные исследования на основе моделей создаваемых пористых сред и является целью наших дальнейших исследований. Проведенные исследования показывают, что детальное изучение влияния размера материала ячейки на гидродинамический расчет и эффективность осаждения частиц с помощью компьютерного моделирования позволяет создавать образцы аэрозольных фильтров с улучшенными характеристиками.

O. V. Soloveva, S. A. Solovev, O. S. Dmitrieva,  
R. R. Khusainov, R. R. Jafizov

## COMPARISON OF THE PARTICLE DEPOSITION EFFICIENCY IN FILTERS WITH VARIOUS PORE DIAMETERS

*Keywords:* high-porous cell foam filters, deposition efficiency, numerical simulation.

The growth of pollutant emissions at industrial plants, reduction in the size of hazardous particles, the difficulty in capturing them, the appearance of new materials support the researchers' interest in a detailed study of the filtration process, since the averaged models of porous media do not provide a complete picture of the flow and, as a result, do not allow creating materials with the given properties. Detailed flow simulation in each cell requires large computational costs, but it is, in fact, a virtual experiment and allows identifying the factors that make the maximum contribution to the efficiency of particle deposition inside a porous material. The paper presents numerical simulation of gas flow in a high-porous cell material (HPCM). Geometry of a porous material is created by multitude chaotically located intersecting spheres. Meshing provides direct numerical simulation, taking into account the formation of many small vortices in the cells of the computational domain. The studies were carried out for three characteristic filter cell pore sizes of 4, 5, and 6mm to determine the size most preferred for creation and use of porous filters operating at a given flow rate. The calculations showed that the pressure drop is predictably higher for a medium with a smaller cell diameter, but this difference amounts to several Pascals, which is an insignificant factor when selecting a filter material. The particle deposition efficiency curves for 4mm pores are higher, while for diameters of 5 and 6mm the difference in the curves is insignificant. The numerical calculations of the particle deposition efficiency are consistent with the semiempirical dependence of other authors. Modern 3d printing capabilities allow us to carry out not only numerical, but also experimental studies based on models of created porous media and is the goal of our further research. The research shows that a detailed study of the effect of the cell material size on the hydrodynamic calculation and the particle deposition efficiency using computer simulations allows creation of aerosol filter samples with improved characteristics.

### Введение

В работе [1] впервые проведены экспериментальные и аналитические исследования течения аэрозоля в высокопористом ячеистом материале с учетом проницаемости, теплопроводности материала и инерции частиц с использованием параметра "количество пор на дюйм" (PPI) в качестве основно-

го, косвенно характеризующего пористость среды. Авторами [2] и [3] представлены экспериментальные результаты определения величины перепада давления воздуха при протекании через открытую ячейку ВПЯМ при различных значениях пористости среды. В соответствии с уравнением Форхгеймера для материала с более высоким параметром пори-

стости значение перепада давления было значительно меньше. Использование конкретной модели течения в пористой среде влияет на корректность расчета. В [4] проведено сравнение моделей Бринкмана и Дарси для потока, проходящего через пористый цилиндр.

Стоит отметить что в работах [5, 6] проведено детальное численное моделирование течения газа в пористой среде, состоящей из упорядоченного множества пересекающихся сфер, однако для расчета эффективности осаждения частиц использование упорядоченной модели является неадекватным из-за наличия просвета в пористой структуре. В данной работе построена структура со случайным расположением сфер в пространстве, которая повторяет реальную пористую структуру. Определены основные параметры течения, эффективность осаждения частиц, влияние размера ячейки пористой среды на эти параметры, а также качество фильтрующего материала в целом. Проблемы повышения эффективности осаждения частиц обсуждаются в [7–9], но сложная структура пористых сред, влияющая на движение воздуха и траекторию частиц, сохраняет актуальность темы фильтрации в настоящее время.

### Постановка задачи, численное моделирование

В данной работе были построены три геометрические модели для оценки влияния размера пор на фиксированную пористость среды, состоящей из множества пересекающихся сфер, расположенных случайным образом в пространстве (рис. 1). Пористость среды осталась неизменной и была равна  $\varepsilon = 0,56$ , а диаметры пор (сфер)  $d_c$  составляли 4, 5 и 6 мм. Расчетная область представляет собой куб с линейным размером 2 сантиметра.

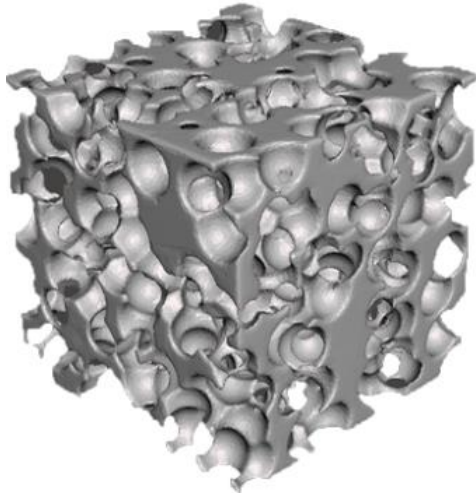


Рис. 1 – Модель пористой среды со случайным расположением пересекающихся сфер в пространстве

Массовый расход на входе и значение атмосферного давления на выходе задаются на двух противоположных границах расчетной области, на остальных границах задаются условия симметрии. Допущение задания условия симметрии возможно, если стенки реального объекта находятся на значительном расстоянии от границ расчетной области, где эффект стенки незначителен, а расчетная модель представляет со-

бой элемент, вырезанный из пористой среды.

Гидродинамические расчеты проводились на основе уравнений Навье-Стокса в пакете CFD ANSYS Fluent с использованием метода конечных объемов. Расчет производился в соответствии с моделью ламинарного течения вязкого несжимаемого газа.

### Результаты расчетов

Сложная геометрия и пористость среды обеспечивают нелинейное изменение перепада давления в зависимости от средней скорости фильтрации, что показано на рисунке 2. Выполнено детальное моделирование движения газа в пористой среде с учетом особенностей поверхности. В случае использования осредненной модели течения газа используется модель Форхгеймера с учетом нелинейности изменения давления. Для использования этой модели необходимо заранее знать значение коэффициента проницаемости среды, которое можно получить из экспериментальных данных.

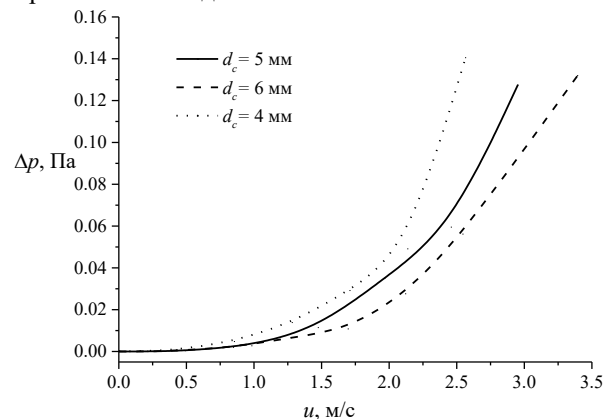


Рис. 2 – Изменение перепада давления в зависимости от скорости фильтрации  $u$  для трех случаев диаметра пор структуры: точки  $d_c = 4$  мм, сплошная линия  $d_c = 5$  мм, штриховая линия  $d_c = 6$  мм

С учетом малой концентрации аэрозольных частиц определены траектории в заданном поле скоростей газа, рассчитана эффективность осаждения частиц как отношение числа осажденных частиц к числу стартовавших частиц и для трех случаев диаметра пор при фиксированном массовом расходе на входе  $Q = 10^{-5}$  кг/с. Проведены расчеты для различных значений числа Стокса, определяющего меру инерции частиц.

Результаты расчетов показывают, что эффективность осаждения частиц для модели с меньшим диаметром пор ( $d_c = 3$  мм) существенно выше при всех значениях числа Стокса, что объясняется большой площадью поверхности в модели.

Для сильноинерционных частиц значения критических эффективности для диаметров ячеек 4 мм и 5 мм практически совпадают, что указывает на то, что при использовании фильтров с высокими расходами газа или для больших инерционных частиц нет необходимости использовать пористый материал с меньшим диаметром ячеек.

Кривые эффективности осаждения незначительно отличаются для диаметров  $d_c = 5$  мм и  $d_c = 6$  мм для случая мелких частиц, однако, с увеличением

инерции частиц, предпочтительно использование модели с меньшими диаметрами пор.

Авторами работы [5] проведено экспериментальное исследование течения запыленного газа в пористой среде и предложена полуэмпирическая зависимость эффективности осаждения аэрозольных частиц в зависимости от толщины фильтрующего материала, диаметра фильтрующего волокна (ширины перегородки в пористой среде), числа Стокса, которое, в пренебрежении гравитационной составляющей, будет записано в виде:

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{t}{d_f} 5,486 St^{2,382}\right), \quad (1)$$

где  $t$  – толщина пористого материала,  $d_f$  – диаметр волокна (перегородки пористого материала).

В расчетной модели толщина среды составляла 2 см, диаметр волокна для размера пор 4, 5 и 6 мм был равен  $d_f = 0,0975$  мм,  $d_f = 1,2$  мм и  $d_f = 1,5$  мм соответственно.

Линии на рис. 3 демонстрируют хорошее согласие результатов численного моделирования с полуэмпирической зависимостью авторов работы [5]. Некоторое расхождение между кривыми обусловлено "плавающим" значением диаметра волокна фильтров, которое в среднем колеблется от 0,6 мм до 1,8 мм для случайной упаковки сфер, а также зависит от диаметра ячейки и пористости среды.

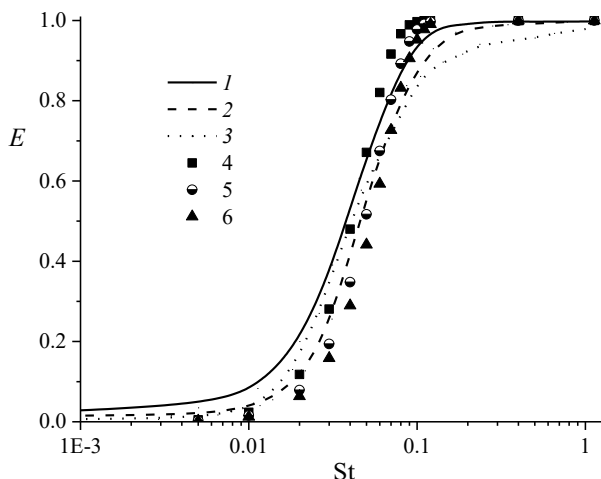


Рис. 3 – Сравнение кривых эффективности осаждения частиц от числа Стокса, полученной в результате численного моделирования для трех случаев диаметра пор  $d_p$ , мм (1 – 4, 2 – 5, 3 – 6) и кривых эффективности осаждения, построенных по полуэмпирической зависимости (4 – 4,  $d_f = 0,0975$  мм, 5 – 5,  $d_f = 1,2$  мм, 6 – 6,  $d_f = 1,5$  мм)

Анализ данных показывает, что при низких скоростях потока изменение перепада давления незначительно по сравнению с изменением эффективно-

сти осаждения частиц. Поэтому для фильтров, работающих при более низких скоростях потока, предпочтение отдается увеличению общей площади поверхности за счет габаритов. Исследования показали, что увеличение размера ячеек пористого материала для снижения сопротивления фильтра нецелесообразно при низких скоростях потока. Дальнейшие исследования в этой области могут выявить пороговое значение размера ячейки фильтра, а также определить набор оптимальных значений диаметра, в зависимости от скорости фильтрации и инерции частиц.

## Заключение

Проведено численное моделирование движения запыленного газа в высокопористом ячеистом материале. Расчеты проводились для трех значений диаметров пор 4, 5 и 6 мм, поскольку данные размеры соответствуют средним значениям пор бытовых и промышленных фильтров. Результаты исследования показали, что для задач фильтрации при малых скоростях потока целесообразно использовать материал с наименьшим размером пор, равным 4 мм, параметры расчета для сред с двумя другими диаметрами отличаются незначительно.

В заключение следует отметить, что задачи фильтрации через высокопористые ячеистые материалы требуют дальнейших детальных исследований, поскольку размеры, форма пор, их взаимное пересечение оказывают большое влияние на гидродинамику потока и эффективность осаждения частиц.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-41-160005

## Литература

1. A. Bhattacharya, V.V. Calmidi, R.L. Mahajan, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **45**, 5, 1017-1031 (2002).
2. N. Dukhan, *Experiments Fluids*, **41**, 4, 665-672 (2006).
3. R.F. Mardanov, O.V. Soloveva, S.K. Zaripov, *IOP Conf. Series: Materials Sci. Eng.*, **158**, 012065 (2016).
4. A. Hellmann, M. Pitz, K. Schmidt, F. Haller, S. Ripperger, *Aerosol Sci. Technol.*, **49**, 16-26 (2015).
5. A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, O.S. Dmitrieva, *Ecology Ind. Rus.*, **22**, 6, 10-14 (2018).
6. O.V. Soloveva, S.A. Solovev, R.R. Khusainov, O.S. Popkova, D.O. Panenko, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **944**, 012113 (2018).
7. S.A. Solovev, O.V. Soloveva, O.S. Popkova, *Rus. J. Phys. Chem. A.*, **92**, 3, 603-606 (2018).
8. С.А. Соловьев, А.Н. Гайфудинов, О.В. Соловьева, *Вестник технол. ун-та*, **20**, 23, 79-82 (2017).
9. С.А. Соловьев, А.Н. Гайфудинов, О.В. Соловьева, *Вестник технол. ун-та*, **21**, 7, 103-107 (2018).

© О. В. Соловьева – доцент кафедры ТОТ КГЭУ, rara\_avis86@mail.ru, С. А. Соловьев – науч. сотр. лаб. ММПФ Института механики и машиностроения – обособленного структурного подразделения ФИЦ «Казанский научный центр РАН», ст. препод. каф. аэрогидромеханики К(П)ФУ, sergei\_s349@mail.ru, О. С. Дмитриева – к.т.н., доц. каф. ПАХТ КНИТУ, ja\_deva@mail.ru, Р. Р. Хусайнов – студ. каф. ТОТ КГЭУ, rishat1497@mail.ru, Р. Р. Яфизов – студ. той же кафедры.

© O. V. Soloveva – assistant professor of TFHE, KSPEU, rara\_avis86@mail.ru, S. A. Solovev – scientist of MMPF laboratory, Institute of Mechanics and Engineering – subdivision of the Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the RAS", senior lecturer of Aerohydropneumatics, KFU, sergei\_s349@mail.ru, O. S. Dmitrieva – candidate of technical sciences, associate professor of PACHT chair, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, ja\_deva@mail.ru, R.R. Khusainov – student of TFHE, KSPEU, rishat1497@mail.ru, R.R. Yafizov – student of TFHE, KSPEU, ruzilyafizov@gmail.com.