

УДК 541.182.213, 621.928.953

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ И КОЭФФИЦИЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО И ВЫСОКОПОРИСТОГО ЯЧЕЙСТОГО ФИЛЬТРА ПРИ РАВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

О.В. Соловьева, Р.Р. Яфизов, Е.Е. Костылева, Е.Г. Шешуков

Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия

ORCID*:<http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, solovyeva.ov@kgeu.ru

Резюме: В данной работе был произведен сравнительный расчет гранулированного и высокопористого ячейстого фильтров. Созданы модели гранулированного фильтра с диаметром гранул 6 мм и набор моделей пористого фильтра с диаметром ячейки 6 мм. В набор моделей высокопористого ячейстого фильтра входят модели со значением пористости среды равным значению пористости гранулированного фильтра и с равным значением перепада давления. Также был осуществлен подбор параметров высокопористого ячейстого фильтра и построены модели фильтров, обеспечивающие равную эффективность осаждения частиц. В связи со случайным расположением ячеек и гранул в пространстве, результаты расчетов усреднялись для пяти геометрий при одном и том же наборе параметров среды. По результатам расчетов было выявлено, что высокопористый ячейстый фильтр с перепадом давления, совпадающим с гранулированным фильтром, является более эффективным по сравнению с фильтром с равной пористостью среды, а как следствие обеспечивает большее значение параметра качества фильтра. При равной эффективности осаждения частиц кривая изменения параметра качества в зависимости от диаметра частиц оказывается выше для модели высокопористого ячейстого фильтра.

Ключевые слова: высокопористый ячейстый материал, фильтр, диаметр ячейки, перепад давления, эффективность осаждения частиц, гранулированный фильтр, гранулы

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда по гранту № 19-71-00100.

CALCULATING THE EFFECTIVE OF DEPOSITION OF THE PARTICLES AND THE COEFFICIENT OF QUALITY FOR GRANULAR AND HIGHLY POROUS CELLULAR FILTER AT EQUAL GEOMETRIC AND PHYSICAL PARAMETERS

O.V. Soloveva, R.R. Yafizov, E.E. Kostyleva, E.G. Sheshukov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID*:<http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, solovyeva.ov@kgeu.ru

Abstract: In this work, a comparative calculation of granular and highly porous mesh filters was performed. Models of a granular filter with a granule diameter of 6 mm and a set of models of a porous filter with a cell diameter of 6 mm were created. The set of models of a highly porous cellular filter includes models with a medium porosity equal to the granular filter porosity and with an equal pressure drop. The parameters of a highly porous cellular filter were also selected and filter models were constructed that ensure equal particle deposition efficiency. Due to the random arrangement of cells and granules in space, the calculation results were averaged for five geometries with the same set of environmental parameters. According to the calculation results, it

was found that a highly porous mesh filter with a pressure drop coinciding with a granular filter is more effective than a filter with an equal porosity of the medium, and as a result provides a larger value of the filter quality parameter. With equal particle deposition efficiency, the curve of the quality parameter depending on the particle diameter is higher for the model of a highly porous cellular filter.

Keywords: *open cell foam material, filter, cell diameter, pressure drop, particle deposition efficiency, granular filter, granules*

Acknowledgments: *This work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 19-71-00100.*

Введение

Сегодня фильтрация играет важную роль в деятельности человека, как в быту, так и на производстве [1-2]. Широкое распространение получили гранулированные фильтры, которые применяют повсеместно. В сравнении с другими типами фильтров они имеют низкое гидродинамическое сопротивление и большую площадь поверхности. Данный тип фильтров в бытовых условиях чаще всего используется для очистки питьевой воды [3-5]. На производствах гранулированные фильтры используются для очистки горячих газов, это может быть обусловлено химической либо термической активностью очищаемых веществ. Также благодаря используемым в изготовлении гранул материалам наблюдается и устойчивость к коррозии, что обосновывает преимущество их применения на химических производствах [6]. Существует несколько видов гранулированных фильтров, это фильтры с подвижным, неподвижным и псевдооживленным слоем. Фильтрация в них осуществляется различными механизмами, такими как захват частиц, инерционное осаждение, диффузия, гравитационное и электростатическое притяжение. Наибольшее распространение среди гранулированных фильтров получили фильтры с неподвижным слоем.

На эффективность осаждения частиц в фильтрах оказывают влияние множество факторов, но наибольший вклад вносят такие параметры, как перепад давления, скорость потока, размеры, тип гранул и способ их упаковки [7-9]. Существует также способ упаковки гранул, который предполагает использование нескольких слоев гранул и различным диаметром. Такая система предполагает, что сначала фильтруемая среда попадает в слой с большими гранулами, который имеет низкий перепад давления, но при этом не может уловить мелкие частицы, после следует слой с мелкими гранулами, который хорошо фильтрует мелкие частицы [10].

Заменой для гранулированных фильтров могут стать высокопористые ячеистые фильтры, которые представляют собой структуру, состоящую из взаимно пересекающихся ячеек, которые случайным образом распределены в объеме. Параметрами, которые вносят основной вклад в изменение геометрии являются диаметр ячеек и расстояние между ними. Здесь в отличие от гранулированных фильтров мы можем изменять параметры фильтра так как необходимо для конкретной задачи [11]. Пористые среды имеют развитую площадь поверхности благодаря чему могут использоваться в качестве матриц для нанесения химических катализаторов, либо в качестве радиаторов для теплоотвода в микроэлектронике, где нет возможности устанавливать массивные системы охлаждения. Так как пористые структуры имеют большой запас прочности по отношению к своему весу их используют в аэрокосмической деятельности и в автомобилестроении [12].

До недавнего времени исследования пористых сред были затруднены, в основном применялись осредненные модели течения. Например, согласно осредненной модели Дарси, перепад давления согласно которому перепад давления за единицу длины пропорционален произведению скорости жидкости и динамической вязкости и обратно пропорционально

проницаемости. Однако технический прогресс не стоит на месте и сегодня мы можем использовать метод прямого численного моделирования, который учитывает все особенности геометрии и дает наиболее точные и коррелирующие с экспериментальными данными результаты. Основной проблемой данного метода является создание геометрической модели, соответствующей реальности, способов создания моделей тоже существует много, где-то применялись матрицы, состоящие из прямоугольных призм [13], где-то применялись упорядоченные модели, состоящие из тетракайдекаэдров внутри которых случайным образом, создавалась ячейка, в некоторых исследованиях применялся метод магнитно-резонансной томографии для изучения течения жидкости внутри пористой среды [14,15]. Сравнение этих двух типов фильтров и стало нашей задачей в рамках данной работы.

Постановка задачи

Выбор фильтра зависит от параметров технологического цикла. Чаще всего рост эффективности осаждения частиц несет за собой увеличение сопротивления среды. Нашей целью было провести сравнение моделей гранулированного и высокопористого ячеистого фильтра при равных значениях геометрических и физических параметрах. В связи с тем, что изменять пористость гранулированного фильтра не представляется возможным, за основу была взята модель гранулированного фильтра с диаметром гранул мм, пористость которой составляет . Набор моделей высокопористых ячеистых фильтров включает в себя модели с равной пористостью среды, перепадом давления и эффективностью осаждения частиц. Параметры моделей указаны в таблице 1. Модели фильтров, используемые для численных расчетов, представляют собой трубки с пористой вставкой. Пористая область формируется набором сфер, расположенных в пространстве случайным образом, в случае гранулированного фильтра и обратной матрицей пересекающихся сфер для высокопористого ячеистого материала. Толщина фильтрующей части равна длине патрубков и составляет 40 мм, диаметр трубок также равен 40 мм. Для исключения ошибки в численных расчетах (из-за случайного расположения ячеек и гранул в пространстве) были созданы по 5 моделей фильтров, результаты для которых усреднялись между собой.

Таблица 1

Фильтр	d_c , мм	ϵ	Δp Па
Гранулированный	6	0.44	140
Высокопористый ячеистый – 1 ($\epsilon_{gran} = \epsilon_{foam}$)	6	0.44	4574
Высокопористый ячеистый – 2 ($\Delta p_{gran} = \Delta p_{foam}$)	6	0.7	140
Высокопористый ячеистый – 3 ($E_{gran} = E_{foam}$)	6	0.8	50

Гидродинамический расчет, проводимый в программном комплексе ANSYS *Fluent* (v. 19.0) на основе решения уравнений Навье-Стокса методом конечных объемов, показывает, что при равной пористости среды кривая изменения эффективности осаждения в зависимости от диаметра частиц ложится выше для случая высокопористого ячеистого материала (рис.1). При равном значении перепада давления эффективность осаждения частиц в случае высокопористого ячеистого фильтра больше, чем в случае гранулированного фильтра для слабоинерционных частиц (рис. 2). Пористость ячеистого фильтра в этом случае составила 0.7, тогда как гранулированный фильтр имеет

фиксированную пористость равную 0.44, значения перепада давления в этом случае для обоих фильтров равно 140 Па. Эмпирическим методом была получена пористая структура со значением эффективности осаждения частиц равным значению эффективности гранулированного фильтра (рисунок 3). Параметр пористости высокопористого ячеистого материала для этого случая составил 0.8, а перепад давления равен 50 Па.

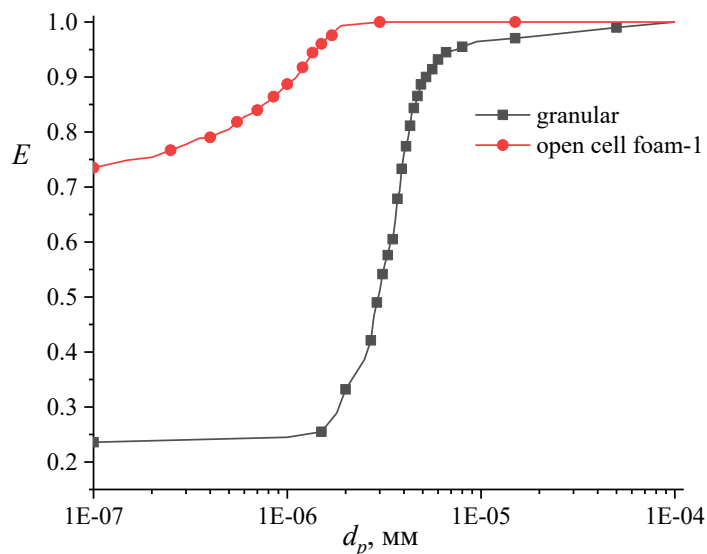


Рис. 1. Эффективность осаждения частиц высокопористого ячеистого и гранулированного фильтров при равной пористости среды $\varepsilon = 0.44$.

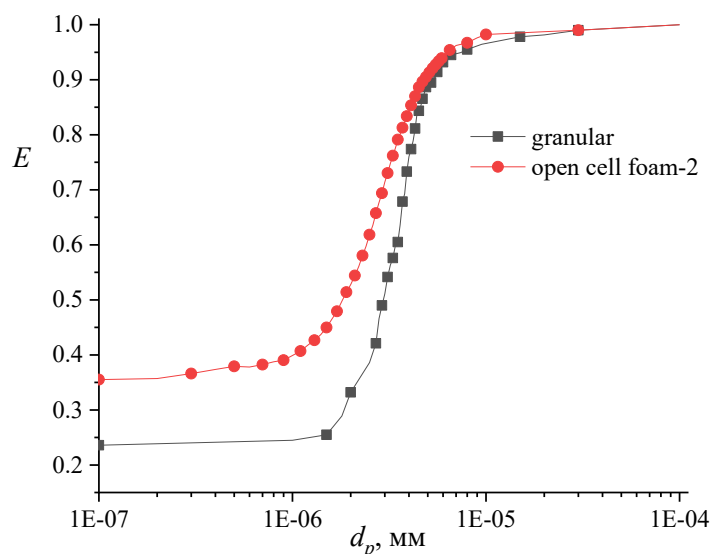


Рис. 2. Эффективность осаждения частиц высокопористого ячеистого и гранулированного фильтров при равном значении перепада давления $\Delta p = 140$ Па.

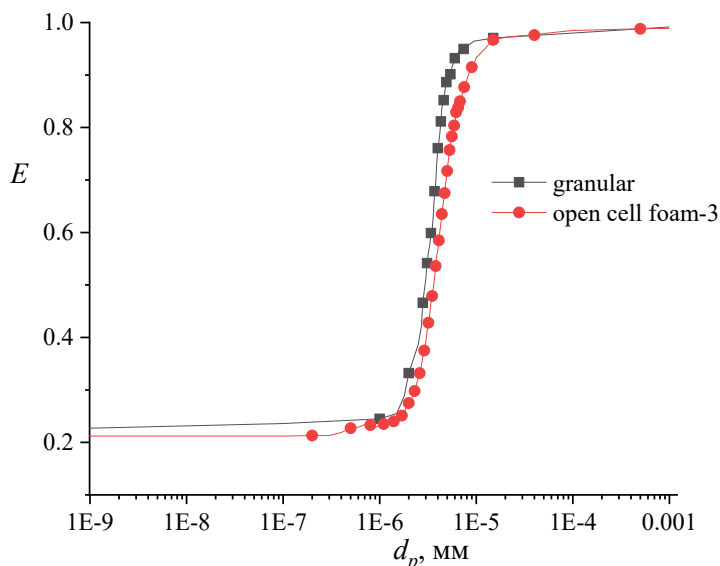


Рис. 3. Наиболее близкая эффективность осаждения частиц моделей гранулированного и высокопористого ячеистого фильтров.

Важной характеристикой при выборе фильтра является коэффициент качества фильтра, который представляет собой отношение эффективности осаждения частиц к значению перепада давления. Поскольку высокопористый ячеистый фильтр с пористостью 0.44 имеет крайне высокое значение перепада давления, то строить график для этого случая не целесообразно. На рисунке 4 представлены сравнение коэффициентов качества для остальных моделей фильтров.

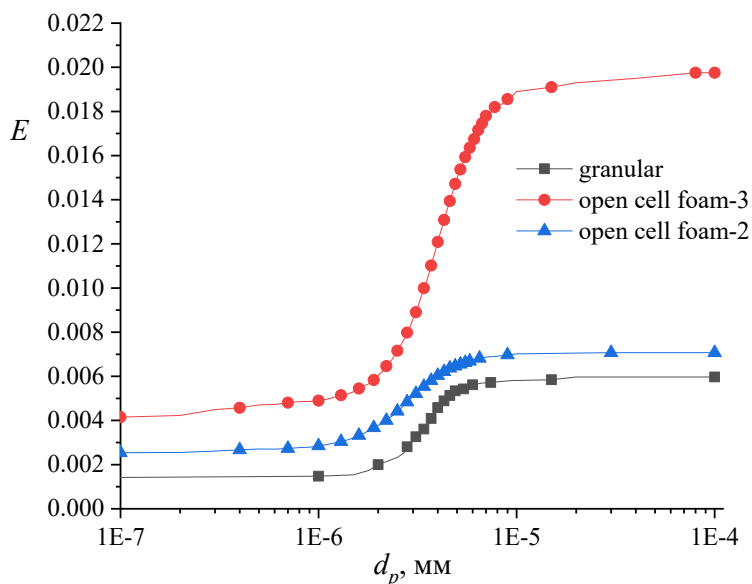


Рис. 4. Графики коэффициентов качества для пористых и гранулированного фильтров

Из рис. 4 можно сделать вывод, что высокопористый ячеистый фильтр с равной эффективностью осаждения частиц имеет максимальное значение коэффициента качества. Кривая изменения коэффициента качества фильтра от диаметра частиц для случая

высокопористого ячеистого фильтр с равным значением перепада давления оказывается выше кривой для гранулированного фильтра.

Заключение

Исследования показывают, что пористая структура, обеспечивающая перепад давления равный перепаду давления гранулированного фильтра, обладает эффективностью осаждения частиц выше для случая слабоинерционных частиц, чем у гранулированного фильтра. При этом эффективности осаждения частиц для обоих конструктивных исполнений близки для инерционных частиц. Сравнить фильтры по значению перепада давления является более правильным, чем по значению пористости среды. Исследования коэффициента качества показали, что пористый фильтр, эффективность которого совпадает с эффективностью гранулированного, проявляет себя лучше всего. Можно сделать вывод, что стоит отдавать предпочтение использованию высокопористых ячеистых фильтров при равных физических параметрах.

Литература

1. Baiqian Liu, Wenning Zhou, Peilai Tana, Xianghui Shan, Qianlong Yang Dynamic granular bed and its gas–solid separation process // Powder Technology. 2016. N.301. pp.387-395.
2. Y.S. Yu, Y.B. Tao, Z. Ma, Ya-Ling He. Experimental study and optimization on filtration and fluid flow performance of a granular bed filter // Powder Technology. 2018. N.333. pp.449-457.
3. Gui-Hui Xiao, Guo-Hua Yang, Qi Yang, Su-Rui Tian. Effect of filter layer thickness on the filtration characteristics of dual layer granular beds // Powder Technology. 2018. N.335. pp.344-353.
4. Augustin Charvet, Loïc Wingert, Nathalie Bardin-Monnier, Stéphanie Pacault, Frantz Fournier, Denis Bemer, Dominique Thomas. Multi-staged granular beds applied to the filtration of ultrafine particles: An optimization of collector diameters // Powder Technology. 2019. N. 342. pp.341-347.
5. Altmann J. et al. Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal // Water research. 2016. V. 92. pp. 131-139.
6. Hsu CJ., Hsiau SS. A study of filtration performance in a cross-flow moving granular bed filter: the influence of gas flow uniformity // Powder technology. 2015. V. 274. pp. 20-27.
7. Yinsheng Yu et al. Parameter study and optimization on filtration and resistance characteristics of granular bed filter // Advanced Powder Technology. 2018. V.29. pp.3250-3256.
8. Solovev SA., Soloveva OV., Popkova OS. Numerical simulation of the motion of aerosol particles in open cell foam materials // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2018. V. 92. N. 3. pp. 601-604.
9. Dmitriev A., Madyshev I., Dmitrieva O. Cleaning of Industrial Gases from Aerosol Particles in Apparatus with Jet-Film Interaction of Phases. Ecology and Industry of Russia. 2018. V.22(6). pp.10-14.
10. Yi-Shun Chen et. al. Influence of operational parameters on the performance of gas cleanup technology with a moving granular bed filter // Energy. 2017. V.139. pp.842-852.
11. Gu D., Schüth F. Synthesis of non-siliceous mesoporous oxides // Chemical Society Reviews. 2014. V. 43. №.1. pp.313-344.
12. Yue Wang. et al. Numerical analysis of forced convection of high-temperature exhaust gas around a metal-foam wrapped cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. V.119. pp.742-751.
13. Jakub Skibinski et al. The influence of pore size variation on the pressure drop in open-cell foams // Materials and Design. 2015. V.87. pp.65-655.
14. Félicie Théron et al. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter // Separation and Purification Technology. 2017. V.182. pp. 69-77.
15. Jackiewicz A. et al. Analysis of the behavior of deposits in fibrous filters during non-steady state filtration using X-ray computed tomography // Separation and Purification Technology. 2015. V.156. pp.12-21.

Авторы публикации

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Теоретических основ теплотехники Института теплоэнергетики Казанского государственного энергетического университета.

Яфизов Рузиль Рафаэлович – студент Казанского государственного энергетического университета.

Костылева Елена Евгеньевна – канд. техн. наук Казанского государственного энергетического университета.

Шешуков Евгений Геннадиевич – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры Энергетическое машиностроение Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Baiqian Liu, Wenning Zhou, Peilai Tana, Xianghui Shan, Qianlong Yang Dynamic granular bed and its gas–solid separation process. *Powder Technology*. 2016;301:38-395.
2. Y.S. Yu, Y.B. Tao, Z. Ma, Ya-Ling He. Experimental study and optimization on filtration and fluid flowperformance of a granular bed filter. *Powder Technology*. 2018;333:449-457.
3. Gui-Hui Xiao, Guo-Hua Yang, Qi Yang, Su-Rui Tian. Effect of filter layer thickness on the filtration characteristics of dual layer granular beds. *Powder Technology*. 2018;335:344-353.
4. Augustin Charvet, Loïc Wingert, Nathalie Bardin-Monnier, Stéphanie Pacault, Frantz Fournier, Denis Bemmerl, Dominique Thomas. Multi-staged granular beds applied to the filtration of ultrafine particles: An optimization of collector diameters. *Powder Technology*. 2019;342:341-347
5. Altmann J. et al. Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal. *Water research*. 2016. V. 92. pp. 131-139.
6. Hsu CJ., Hsiao SS. A study of filtration performance in a cross-flow moving granular bed filter: the influence of gas flow uniformity. *Powder technology*. 2015.V. 274. pp. 20-27.
7. Yinsheng Yu et al. Parameter study and optimization on filtration and resistance characteristics of granular bed filter. *Advanced Powder Technology*. 2018;29:3250-3256.
8. Solovev SA., Soloveva OV., Popkova OS. Numerical simulation of the motion of aerosol particles in open cell foam materials. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2018;92(3):601-604.
9. Dmitriev A., Madyshev I., Dmitrieva O. Cleaning of Industrial Gases from Aerosol Particles in Apparatus with Jet-Film Interaction of Phases. *Ecology and Industry of Russia*. 2018;22(6):10-14.
10. Yi-Shun Chen et. al. Influence of operational parameters on the performance of gas cleanup technology with a moving granular bed filter. *Energy*. 2017;139:842-852.
11. Gu D., Schüth F. Synthesis of non-siliceous mesoporous oxides. *Chemical Society Reviews*. 2014;43(1):313-344.
12. Yue Wang. et al. Numerical analysis of forced convection of high-temperature exhaust gas around a metal-foam wrapped cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;119:742-751.
13. Jakub Skibinski et al. The influence of pore size variation on the pressure drop in open-cell foams *Materials and Design*. 2015;87:650-655.
14. Félicie Théron et al. Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter. *Separation and Purification Technology* 2017;182:69-77.
15. A. Jackiewicz et al. Analysis of the behavior of deposits in fibrous filters during non-steady state filtration using X-ray computed tomography. *Separation and Purification Technology*. 2015;156:12-21.

Authors of the publication

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rusil R. Yafizov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Elena E. Kostyleva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgeny G. Sheshukov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

11 сентября 2019г.