

УДК 541.182.213, 621.928.953

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОПОРИСТОГО ЯЧЕИСТОГО ФИЛЬТРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ

О.В. Соловьева¹, И.Р. Ильясов², Р.Р. Хусаинов¹, Р.Р. Яфизов¹, Н.Д. Якимов¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия

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

ORCID*:<http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, rara_avis86@mail.ru

Резюме: В работе исследовалось влияние изменения диаметра ячеек пористого материала (модели фильтра) на значение перепада давления и эффективность осаждения частиц. Экспериментальные образцы пористых сред созданы на основе компьютерных моделей, используемых при проведении численного моделирования. Результаты численных расчетов гидродинамики хорошо согласуются с экспериментальными данными. На основе расчета поля течения газа проведены расчеты эффективности осаждения частиц. Расчеты показывают, что использование геометрии с изменением диаметра пор материала по слоям обеспечивает повышение эффективности осаждения частиц малых размеров, а также понижение значения сопротивления фильтра. Геометрия с изменяемым размером диаметра пор по слоям является предпочтительной для слабоинерционных частиц. Проведенные исследования могут лечь в основу создания аэрозольных фильтров с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: высокопористый ячеистый материал, фильтр, диаметр ячейки, перепад давления, эффективность осаждения частиц.

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

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF THE INTERNAL STRUCTURE OF AN OPEN CELL FOAM FILTER ON THE PARTICLE DEPOSITION EFFICIENCY

O.V. Soloveva¹, I.R. Ilyasov², R.R. Khusainov¹, R.R. Yafizov¹, N.D. Yakimov¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

ORCID*:<http://orcid.org/0000-0002-4757-6387>, rara_avis86@mail.ru

Abstract: The effect of changing the cell diameter of a porous material (filter model) on the pressure drop value and particle deposition efficiency is investigated in this work. Experimental samples of porous media are based on computer models used in numerical simulations. The results of numerical calculations of hydrodynamics are in good agreement with experimental data. Based on the calculation of the gas flow field, calculations of the efficiency of particle deposition are carried out. Calculations show that the use of geometry with a change in the pore diameter of a material by layers provides an increase in the efficiency of sedimentation of particles of small size, as well as a decrease in the value of filter resistance. Geometry with a variable pore size by layers is preferred for low-inertia particles. Studies can form the basis for the creation of aerosol filters with improved characteristics.

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

Acknowledgments: *The reported research was funded by Russian Foundation for Basic Research and the government of the Republic of Tatarstan of the Russian Federation, grant № 18-41-160005.*

Введение

На многих энергетических предприятиях существует проблема выброса загрязняющих веществ в окружающую среду. Применяемые фильтры зачастую неэффективны, поскольку быстро забиваются, либо не улавливают мелкие частицы. Высокая пористость ячеистых материалов приводит к уменьшению значения перепада давления и повышению механической прочности при использовании их в качестве фильтров. Кроме того, высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) могут выступать аккумуляторами тепла, если выполнены из керамики, либо служить интенсификаторами теплообмена в случае использования алюминия [1].

Высокопористые ячеистые материалы активно используются для интенсификации теплообмена. В работе [2] проведены исследования теплообмена в пористом материале с учетом вынужденной конвекции, излучения и кипения. В работе [3] показано, что использование ВПЯМ в регенеративных теплообменниках повышает их эффективность. Авторы [4] продемонстрировали, что теплопередача в аппаратах с низкой теплопроводностью может быть увеличена путем вставки высокопористой алюминиевой металлической матрицы. Проанализирован темп охлаждения с металлической матрицей и без нее. Использование ВПЯМ увеличило темп охлаждения, что демонстрирует целесообразность использования данных материалов в качестве интенсификаторов теплообмена. Несмотря на то, что во многих работах представлены хорошие результаты с использованием пористых сред в качестве элементов охлаждения, по-прежнему мало работ посвящено аккумулированию энергии в материалах при высоких температурах.

Для использования в качестве аэрозольных фильтров ВПЯМ выполняют из полиуритана для низких температур фильтруемого газа или из керамики для высоких температур газа [5]. Помимо использования в качестве фильтров, высокопористые ячеистые материалы могут использоваться в пробоотборниках для определения концентрации и вида загрязняющих веществ [6–8]

Полуэмпирические зависимости для коэффициента проникновения частиц через пористую среду предложены авторами работ [9,10]. Выражения основаны на учете таких физических механизмов осаждения, как гравитация, диффузия и зацепление. В случае полиуританового высокопористого материала экспериментальные данные хорошо согласуются с данными численного моделирования.

Трехмерная модель пористой среды может быть получена либо с помощью компьютерной томографии, либо сгенерирована на основе алгоритма, учитывающего параметры внутренней структуры [11,12].

Использование фильтров с заданными геометрическими характеристиками с учетом физических свойств выбросов (например, размера частиц) может способствовать снижению значения перепада давления через пористую среду и повышению эффективности осаждения частиц [14,15].

Постановка задачи

Геометрия расчетной области создана по слоям с тремя диаметрами ячеек, каждый слой равен 2 см. Ячейки в первом слое имеют диаметр $d_c = 4$ мм, во втором – $d_c = 5$ мм, в третьем – $d_c = 6$ мм. Общая длина пористой вставки составляет 6 см. Длина входного и

выходного патрубка 4 см каждый. Входной патрубок расположен ближе к слою, содержащему наибольший размер ячеек пористой среды. Данная геометрия представляет собой модель многослойного фильтра и имеет своей целью уменьшение общего сопротивления фильтра, при этом частицы больших размеров должны осажаться в первом слое, а частицы меньших размеров в последующих слоях. На рис. 1,б показаны трубки, распечатанные на 3D-принтере, использовавшиеся для экспериментальных исследований. Данные трубки созданы на основе обратной матрицы геометрии пористой среды, используемой в численном моделировании.

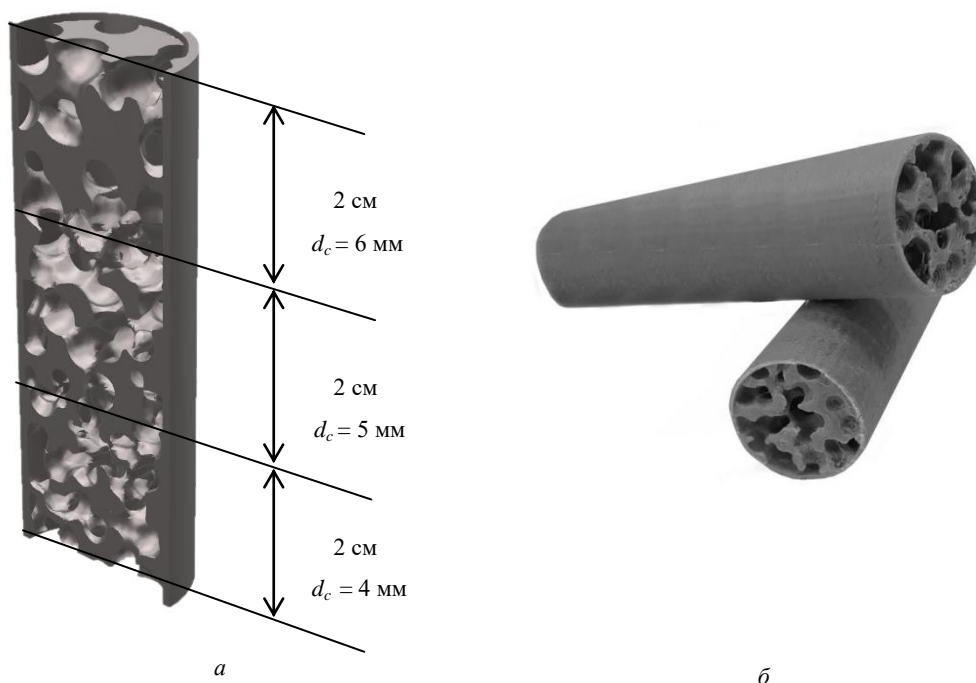


Рис. 1. Геометрия пористой среды: *а* – модель пористой среды (без учета патрубков) используемая для создания экспериментальных образцов с различным диаметром ячеек по слоям, *б* – фотография экспериментальных образцов с пористостью среды $\varepsilon = 0,6$, диаметр ячеек $d_c = 4$ мм (нижняя трубка) $d_c = 5$ мм (верхняя трубка)

Для расчета течения газовой смеси в пористой среде используется внутренний объем геометрии, поскольку течение происходит в межпоровом пространстве. Рис. 2 демонстрирует часть расчетной области (входные и выходные патрубки не показаны). Число элементов сетки в среднем составляло 20 миллионов, что обеспечивало достаточную точность расчета.

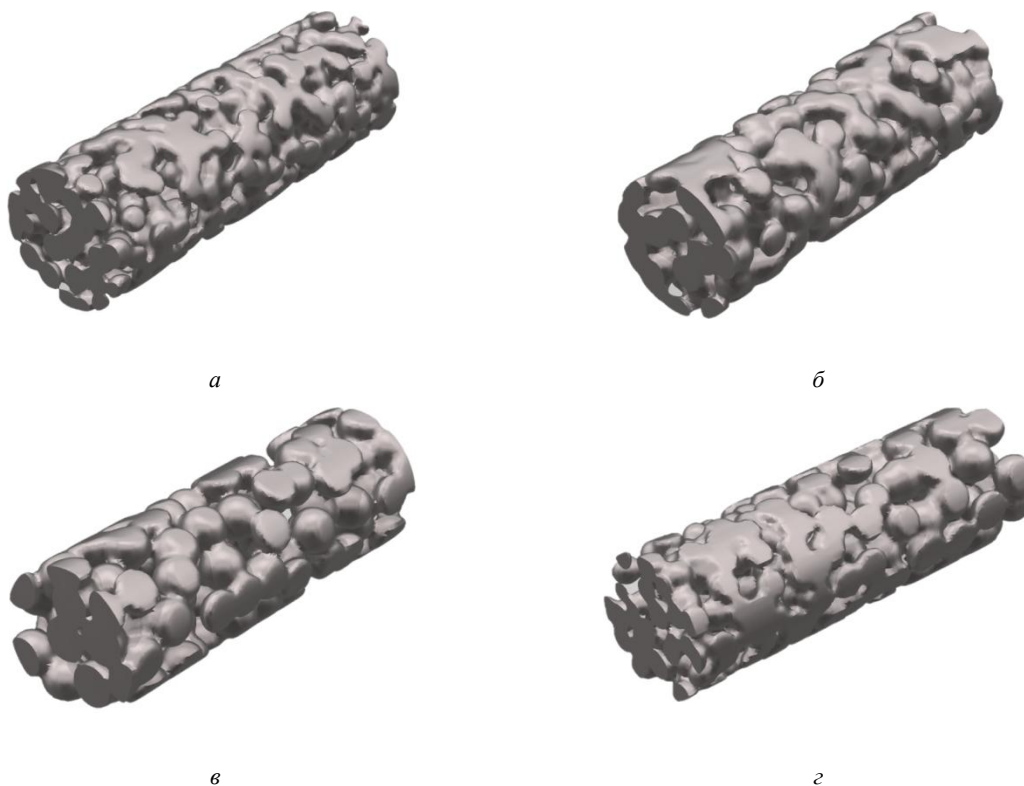


Рис. 2. Геометрические модели пористых трубок, используемых в расчетах, с различными диаметрами пор: *а* – $d_c = 4$ мм, *б* – $d_c = 5$ мм, *в* – $d_c = 6$ мм, *г* – изменение диаметра пор по слоям

На границах расчетной области задавались следующие граничные условия: значение массового расхода на входе и значение атмосферного давления на выходе, остальные зоны принимались за стенки по умолчанию.

Гидродинамические расчеты проведены на основе решения уравнений Навье-Стокса в *CFD* пакете *ANSYS Fluent* с использованием метода конечных объемов. Прямое численное моделирование проведено в приближении ламинарного вязкого несжимаемого газа.

Уравнения движения несущей среды:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad (1)$$

$$(\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta \vec{U}, \quad (2)$$

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

Главным параметром в сравнении фильтров является эффективность осаждения частиц. Однако зачастую, стремление к повышению эффективности может вызвать резкое повышение сопротивления среды и дополнительные затраты на прокачку газа. Конечным показателем в сравнительном анализе является параметр качества фильтра, который определяется как отношение эффективности осаждения частиц к значению перепада давления на входе и выходе пористой среды. Целью исследования являлось выявление оптимальной внутренней структуры фильтра на основе определения параметра качества фильтра.

Результаты численного моделирования и экспериментальных данных Исследование перепада давления

Сложная геометрия и пористость среды обеспечивают нелинейное изменение перепада давления в зависимости от средней скорости фильтрации (рис. 3). Проведено детальное моделирование движения газа в пористой среде с учетом морфологии поверхности. Для проверки точности результатов численного моделирования экспериментальные исследования проводились с использованием трубок, напечатанных на 3D-принтере, содержащем вставку из пористого материала (рис. 1, б). Воздух в трубки нагнетался компрессором. Величину падения давления измеряли с использованием манометра «testo 510» на небольшом расстоянии от пористого материала, чтобы непосредственно оценить сопротивление среды. Среднее значение скорости потока измеряли с использованием термоанемометра «testo 450».

Предполагалось, что создание пористой среды с ячейками, уменьшающимися в диаметре по толщине слоя, снизит значение перепада давления при сохранении эффективности осаждения частиц. Рис.3 демонстрирует согласие результатов экспериментальных исследований с данными численного моделирования. Использование среды с изменением диаметра ячеек (в сумме три слоя по 2 см) дает меньшее сопротивление по сравнению со средой с фиксированным диаметром ячеек, что в случае сохранения эффективности осаждения частиц обеспечивает существенное преимущество при оценке качества фильтра.

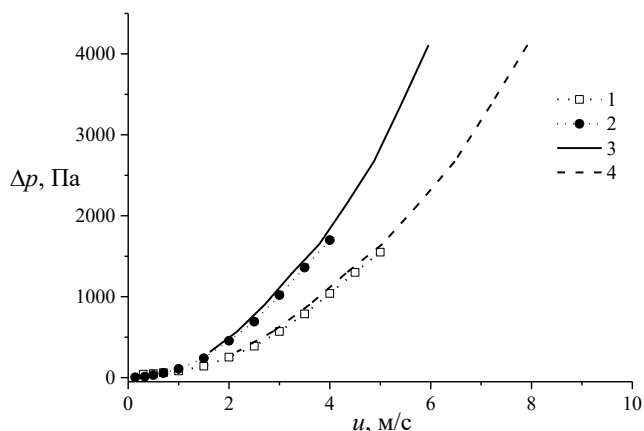


Рис. 3. Зависимость перепада давления от средней скорости фильтрации в трубке с пористостью $\varepsilon = 0,6$: 1 – результаты экспериментальных исследований с изменением диаметра пор по слоям ($d_c = 4$ мм, $d_c = 5$ мм, $d_c = 6$ мм), 2 – результаты экспериментальных исследований с размерами пор $d_c = 4$ мм, 3 – результаты численного моделирования с изменением диаметра пор по слоям ($d_c = 4$ мм, $d_c = 5$ мм, $d_c = 6$ мм), 4 – результаты численного моделирования с размерами пор $d_c = 4$ мм

Расчет эффективности осаждения частиц

Эффективность осаждения частиц определялась в найденном поле скоростей газа в допущении малой концентрации второй фазы.

Лагранжевы уравнения движения частиц в пренебрежении всеми силами, кроме силы аэродинамического сопротивления запишутся в виде:

$$\frac{d\vec{V}}{dT} = \frac{(\vec{U} - \vec{V})}{\tau_p} \quad (3)$$

$$\frac{d\vec{R}}{dT} = \vec{V}, \quad (4)$$

где m_p – масса частицы, m_f – масса газа с объемом равным объему частицы, d_p – диаметр частицы, ρ – плотность газа, μ – коэффициент динамической вязкости газа, \vec{V} и \vec{U} – скорости частицы и газа соответственно, $\tau_p = m_p / 3\pi\mu d_p = \rho d_p^2 / 18\mu$ – время релаксации частицы (параметр, определяющий инерционность частицы), \vec{R} – радиус-вектор положения частицы.

По найденным траекториям частиц определяется эффективность осаждения, как отношение числа осевших частиц к числу стартовавших:

$$E = \frac{N}{N_0}. \quad (5)$$

На рис. 4 изображены кривые изменения эффективности для четырех вариантов диаметра ячеек при фиксированной пористости среды $\varepsilon = 0,6$. Интересно отметить, что геометрия, выполненная по слоям с изменением диаметра ячеек при сохранении пористости среды обеспечивает максимальное значение эффективности осаждения при малых диаметрах частиц, что можно объяснить особенностью гидродинамики потока воздуха при пониженном сопротивлении на первых двух слоях по сравнению с постоянным диаметром ячеек по всей длине пористой области. С увеличением диаметра частиц кривая эффективности осаждения с диаметрами ячеек, изменяющимися по слоям, совпадает с кривой эффективности для $d_c = 5$ мм. Таким образом, можно сделать вывод, что использование фильтра с изменяемым диаметром ячеек целесообразно только в случае улавливания мелких частиц, поскольку эффективность для случая инерционных частиц определяется средним диаметром пор материала.

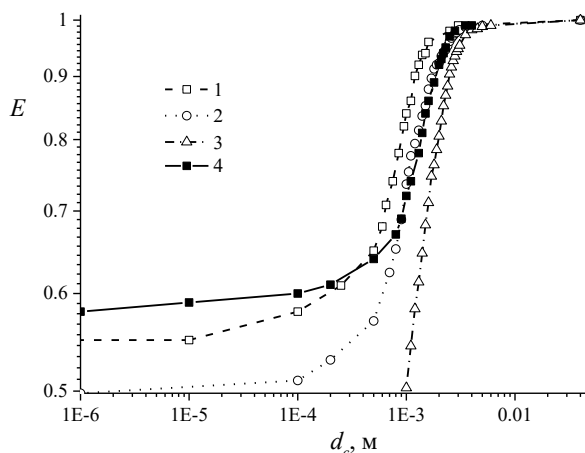


Рис. 4. Эффективность осаждения частиц для четырех случаев: 1 – геометрия с пористостью $\varepsilon = 0,6$ и диаметром ячейки $d_c = 4$ мм, 2 – геометрия с пористостью $\varepsilon = 0,7$ и диаметром ячейки $d_c = 4$ мм, 3 – геометрия с пористостью $\varepsilon = 0,8$ и диаметром ячейки $d_c = 4$ мм, 4 – геометрия с пористостью $\varepsilon = 0,6$ и диаметрами ячеек $d_c = 6$ мм, $d_c = 5$ мм, $d_c = 4$ мм, созданными по слоям

Заключение

Проведены экспериментальные исследования и численное моделирование течения газа в трубках, содержащих пористую среду. Рассматривались четыре варианта пористой среды с диаметрами ячеек 4, 5 и 6 мм, а также с ячейками, изменяющимися в диаметре по слоям. Во всех случаях пористость среды оставалась постоянной и равна $\varepsilon = 0,6$. Зависимость перепада давления от средней скорости фильтрации носит нелинейный

характер, что свидетельствует о сложной внутренней структуре среды, содержащей многочисленные каналы и повороты (система пор), результаты численного расчета для перепада давления хорошо согласуются с данными эксперимента. Геометрия с изменяемым диаметром ячеек по слоям создает меньшее аэродинамическое сопротивление по сравнению с геометрией с диаметром ячеек 4 мм, что является преимуществом ее использования при проектировании аэрозольных фильтров. При этом эффективность осаждения частиц определяется средним диаметром пор для инерционных частиц и оказывается существенно больше эффективности осаждения частиц по сравнению с вариантом наименьшего диаметра ячеек. Проведенные исследования показывают, что создание фильтра с изменяемым размером пор по слоям целесообразно лишь в случаях, когда даже малое изменение перепада давления существенно для технологического процесса в случае улавливания инерционных частиц. Для частиц малого размера использование фильтра с изменяемым размером пор является более предпочтительным.

Литература

1. Kim S., Lee C.-W. A review on manufacturing and application of open-cell metal foam. // *Procedia Material Science*. 2014. V. 4. P. 290–294.
2. Mancin S., Zilio C., Cavallini A., Rossetto L. Pressure drop during air flow in aluminum foams // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. V. 53. No. 15-16. P. 3121–3130.
3. Regulski W., Szumbariski J., Gumowski K., Skibiński J., Wichrowski M., Wejrzanowski T. Pressure drop in flow across ceramic foams - A numerical and experimental study // *Chemical Engineering Science*. 2015. V. 137. P. 320–337.
4. Möhlmann C., Aitken R.J., Kenny L.C., P. Georner P., Vuduc T., Zambelli G. Size-selective personal air sampling: A new approach using porous foams // *Annals of Occupational Hygiene*, 2002. V. 46. P. 386–389.
5. Kenny L.C., Aitken R.J., Beaumont G., P. Georner P. Investigation and application of a model for porous foam, aerosol penetration // *Journal of Aerosol Science*. 2001. V. 32. P. 271–286.
6. Clark P., Koehler K.A., Volckens J. An improved model for particle deposition in porous foams // *Journal of Aerosol Science*. 2009. V. 40. No. 7. P. 563–572.
7. Redenbach C., Wirjadi O., Rief S., Wiegmann A. Modeling of ceramic foams for filtration simulation // *Advanced Engineering Materials*. 2011. V. 13. No. 3. P. 171–177.
8. Schmidt K., Becker J. Generating Validated 3D models of microporous ceramics // *Advanced Engineering Materials*. 2013. V. 15. No. 1-2. P. 40–45.
9. Zhao C.Y., Kim T., Hodson H.P. Thermal transport in high porosity cellular metal foams // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2004. V. 18. No. 3. P. 309–317.
10. Анциферов В.Н., Храпцов В.Д., Поливода А.И., Волков Э.П., Цой Г.А., Бевз А.П. Высокопористые проницаемые ячеистые материалы для экологически безопасных теплогенераторов // *Перспективные материалы*. 2008. № 6. С. 5–10.
11. Walther G., Klöden B., Büttner T., Weissgärber T., Kieback B., Böhm A., Timberg L. A new class of high temperature and corrosion resistant nickel based open cell foams // *Advanced Engineering Materials*. 2008. V. 10. No. 9. P. 803–811.
12. Regin A.F., Solanki S.C., Saini J.S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008. V. 12. No. 9. P.2438–2458.
13. Trelles J.P., Duffly J.J. Numerical simulation of porous latent heat thermal energy storage for thermoelectric cooling // *Applied Thermal Engineering*. 2003. V. 23. No. 13. P. 1647–1664.
14. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Попкова О.С. Численное моделирование движения аэрозольных частиц в высокопористом проницаемом ячеистом материале // *Журнал физической химии*. 2018. Т. 92. № 3. С. 489–493.

15. Soloveva O.V., Solovev S.A., Khusainov R.R., Popkova O.S., Panenko D.O. Investigation of the influence of the open cell foam models geometry on hydrodynamic calculation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 944. No. 1. 012113.

Авторы публикации

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета. Email: raga_avis86@mail.ru.

Ильясов Ильдар Равилович – канд. хим. наук, старший научный сотрудник НИЛ «Промышленный катализ» Химического института им. А.М. Бутлерова Казанского (Приволжского) федерального университета. Email: ilildar@yandex.ru.

Хусаинов Ришат Рафаилович – студент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета. Email: rishat1497@mail.ru.

Яфизов Рузиль Рафаэлович – студент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета. Email: ruzilyafizov@gmail.com.

Николай Дмитриевич Якимов – доктор физ.-мат. наук, профессор, кафедра «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета. Email: nyakimov@inbox.ru.

References

1. Kim S., Lee C.-W. A review on manufacturing and application of open-cell metal foam. // Procedia Material Science. 2014. V. 4. P. 290–294.
2. Mancin S., Zilio C., Cavallini A., Rossetto L. Pressure drop during air flow in aluminum foams // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. No. 15-16. P. 3121–3130.
3. Regulski W., Szumbariski J., Gumowski K., Skibiński J., Wichrowski M., Wejrzanowski T. Pressure drop in flow across ceramic foams - A numerical and experimental study // Chemical Engineering Science. 2015. V. 137. P. 320–337.
4. Möhlmann C., Aitken R.J., Kenny L.C., P. Georner P., Vuduc T., Zambelli G. Size-selective personal air sampling: A new approach using porous foams // Annals of Occupational Hygiene, 2002. V. 46. P. 386–389.
5. Kenny L.C., Aitken R.J., Beaumont G., P. Georner P. Investigation and application of a model for porous foam, aerosol penetration // Journal of Aerosol Science. 2001. V. 32. P. 271–286.
6. Clark P., Koehler K.A., Volckens J. An improved model for particle deposition in porous foams // Journal of Aerosol Science. 2009. V. 40. No. 7. P. 563–572.
7. Redenbach C., Wirjadi O., Rief S., Wiegmann A. Modeling of ceramic foams for filtration simulation // Advanced Engineering Materials. 2011. V. 13. No. 3. P. 171–177.
8. Schmidt K., Becker J. Generating Validated 3D models of microporous ceramics // Advanced Engineering Materials. 2013. V. 15. No. 1-2. P. 40–45.
9. Zhao C.Y., Kim T., Hodson H.P. Thermal transport in high porosity cellular metal foams // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2004. V. 18. No. 3. P. 309–317.
10. Antsiferov V.N., Khramtsov V.D., Polyvoda A.I., Volkov E.P., Tsoy G.A., Bezv A.P. Open cell foam materials for environmentally safely heat generators // Perspective materials. 2008. No. 6. P. 5–10. [in Russian].
11. Walther G., Klöden B., Büttner T., Weissgärber T., Kieback B., Böhm A., Timberg L. A new class of high temperature and corrosion resistant nickel based open cell foams // Advanced Engineering Materials. 2008. V. 10. No. 9. P. 803–811.

12. Regin A.F., Solanki S.C., Saini J.S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. V. 12. No. 9. P. 2438–2458.

13. Trelles J.P., Dufly J.J. Numerical simulation of porous latent heat thermal energy storage for thermoelectric cooling // Applied Thermal Engineering. 2003. V. 23. No. 13. P. 1647–1664.

14. Solovev S.A., Soloveva O.V., Popkova O.S. Numerical simulation of the motion of aerosol particles in open cell foam materials // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2018. V. 92. No 3. P.603–606.

15. Soloveva O.V., Solovev S.A., Khusainov R.R., Popkova O.S., Panenko D.O. Investigation of the influence of the open cell foam models geometry on hydrodynamic calculation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 944. No. 1. 012113.

Authors of the publication

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: rara_avis86@mail.ru.

Ildar R. Ilyasov – Kazan Federal University, Kazan, Russia. Email: ilildar@yandex.ru.

Rishat R. Khusainov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: rishat1497@mail.ru.

Rusil R. Yafizov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: rishat1497@mail.ru.

Nikolay D. Yakimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: nyakimov@inbox.ru.

Поступила в редакцию

27 ноября 2018 г.