

1.2.2.

А.И. Хайбуллина, А.Р. Хайруллин, В.К. Ильин, А.А. Синявин

Казанский государственный энергетический университет,
Казань, haybullina.87@mail.ru

ТЕПЛООБМЕН И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОРИСТЫХ СРЕД СГЕНЕРИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО

В работе проведено численное моделирование теплообмена и гидродинамики в пористой среде. Построение трехмерной геометрии пористой среды основывалось на методе диаграммы Вороного. Численное исследование проводилось в программном продукте AnsysFluent. Полученные результаты согласуются с данными других авторов. Максимальной интенсивностью теплообмена во всем исследованном диапазоне обладает пористая среда с порозностью 0,743 и числом Рейнольдса 80. Минимальными гидравлическими потерями обладает пористая среда с PPI 10, порозностью 0,743 и числом Рейнольдса 10.

Ключевые слова: диаграмма Вороного, пористая среда, теплообмен, численное моделирование.

Высокопористые ячеистые структуры вызывают интерес многих исследователей. Литература в этой области пополняется каждый год. Ввиду высокой пористости металлические ячеистые структуры обладают развитой поверхностью, относительно низким гидравлическим сопротивлением и высоким коэффициентом эффективной теплопроводности. Актуально использование пористых материалов в качестве интенсификаторов теплообмена, ввиду их теплогидравлических характеристик [1–3]. При исследовании теплогидравлических характеристик пористых материалов широко применяются различные численные методы. При численном моделировании пористая среда может представлять собой как упрощенную двухмерную геометрию [4,5], так и трехмерную [6,7]. Наиболее точным методом является моделирование течения жидкости в сложной трехмерной геометрии, построенной на основе реальной геометрии пористой структуры [8,9]. Для создания геометрии используются сканирующие томографы. Другим способом является использование диаграммы Вороного для построения виртуальной геометрии пористой среды, что не требует дорогостоящего оборудования [10]. Целью данной работы является, проверка применимости метода диаграммы Вороного для генерации пористых сред с последующим численным исследованием теплообмена и гидродинамики.

Пористая 3D структура генерировалась в программе SpaceClaim с помощью оригинального модуля разработанного авторами. Разработка модуля осуществлялась на языке VusialBasic.Net. Модуль является дополнением к SpaceClaim. Данный модуль позволяет генерировать пористые структуры с заданными характеристиками, диаметр фибер d_s , порозность ε , диаметр ячеек d_c , количество пор на дюйм (PPI). Расчетная область с генерированной пористой средой со следующими характеристиками $\varepsilon = 914$, $d_s = 0,875$, PPI = 80 представлена на рис. 1.

На входе в расчетную область задавалась постоянная скорость воздуха умноженная на порозность с температурой 28 °С, в зависимости от числа Рейнольдса. Число Рейнольдса Re рассчитывалась по скорости воздуха в пористой среде, и диаметру фибер d_s . На баковых стенках задавалась симметрия. На стенках пористой структуры задавался постоянный тепловой поток 5 Вт/м². При численном исследовании порозность ε находилась в диапазоне от 0,743 до 0,954, PPI от 10 до 80, число Рейнольдса Re от 20 до 80. Для изменения порозности диаметр фибер варьировался от 0,0625 мм до 1,3 мм. Диаметр ячеек пористой среды варьировался от 0,635 мм до 5,8 мм. Количество ячеек d_c по ходу потока воздуха было 5, по ширине и высоте $1,6d_c$, входной и выходной участок $0,5d_c$. Численное

моделирование проводилось в AnsysFluent. Расчетная сетка состояла из 2,7 млн. контрольных объемов при порозности 0,954. Количество элементов сетки уменьшалось до 1,1 млн. с уменьшением порозности до 0,743. При порозности 0,954 количество элементов на одну ячейку составляло около 0,17 млн.

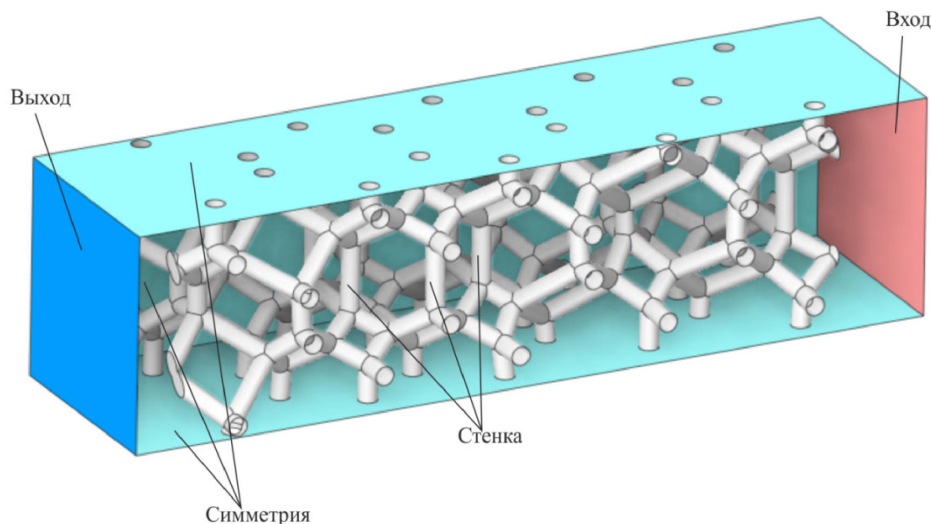


Рис. 1 – Расчетная область математической модели

Результаты численного моделирования теплообмена и гидродинамики в пористой структуре представлены на рис. 2-5. Для верификации полученных результатов интенсивность теплообмена при порозности ε 0,954 сравнивалась с обобщающей зависимостью, полученной на основе экспериментальных данных в работе [11]. Отклонения для числа Нуссельта Nu , полученного в данной работе с обобщающей зависимостью [11], составили не более 7%.

С увеличением порозности пористой среды происходит уменьшение интенсивности теплообмена (рис. 2). Данная динамика наблюдается при всех PPI. Гидравлическое сопротивление пористой среды увеличивается с повышением порозности независимо от числа Рейнольдса и PPI (рис. 3). Рост гидравлического сопротивления связан с ростом скорости при увеличении порозности. При повышении порозности диаметр фибер уменьшается, соответственно для выдерживания постоянного числа Рейнольдса скорость увеличивается. Изменение PPI не оказывает влияния на теплоотдачу пористой среды (рис. 4) не зависимо от порозности и числа Рейнольдса. При этом с увеличением PPI происходит существенный рост гидравлических потерь (рис. 5). С увеличением числа Рейнольдса происходит рост, как гидравлических потерь, так и интенсивности теплообмена. Максимальной теплоотдачей (Nu 5,18) во всем исследованном диапазоне обладает пористая среда с порозностью 0,743 и числом Рейнольдса 80. Минимальными гидравлическими потерями обладает пористая среда с PPI 10, порозностью 0,743 и числом Re 10.

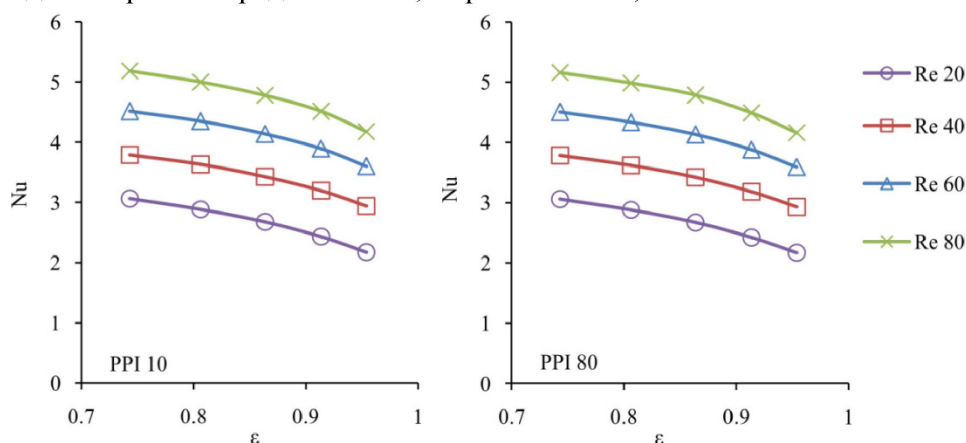


Рис. 2 – Интенсивность теплообмена пористой среды в зависимости от порозности при различном числе Рейнольдса

Полученные результаты при численном моделировании теплообмена и гидродинамики пористых сред согласуются с данными других авторов [8,10,11]. Разработанное авторами дополнение к SpaceClaim позволяет генерировать реалистичную геометрию пористой среды, с заданными характеристиками. Данный подход позволяет проводить параметрическое исследование режимных и геометрических характеристик пористых сред, с помощью программ вычислительной гидродинамики, для выбора оптимальных режимов теплообмена в пористых структурах.

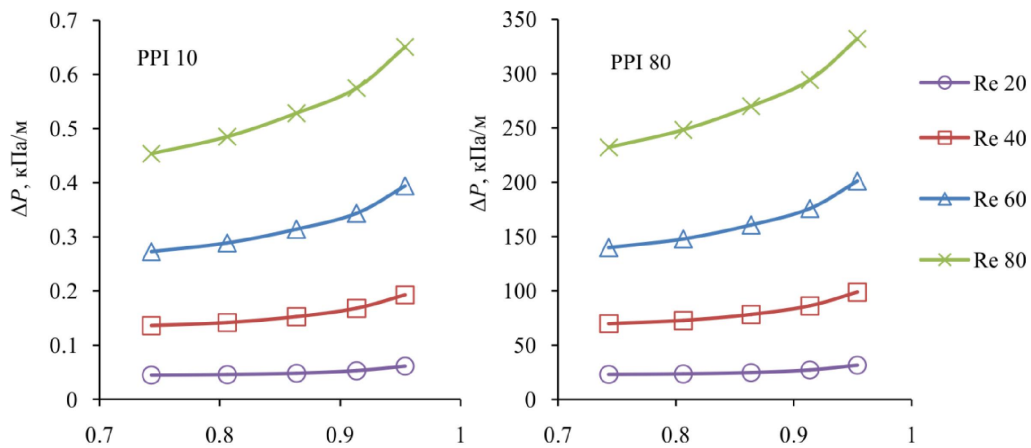


Рис.3. – Гидравлическое сопротивление пористой среды в зависимости от порозности при различном числе Рейнольдса

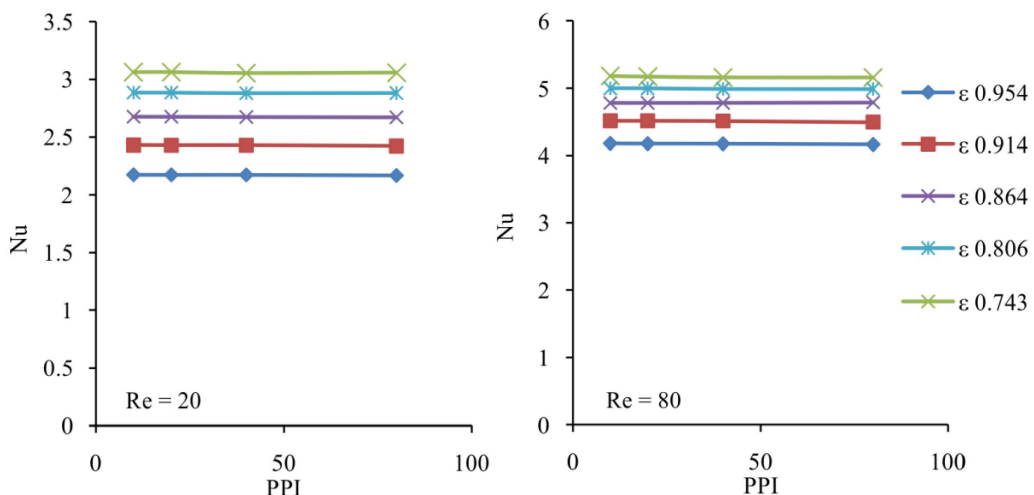


Рис. 4. – Интенсивность теплообмена пористой среды в зависимости от PPI при различном числе Рейнольдса

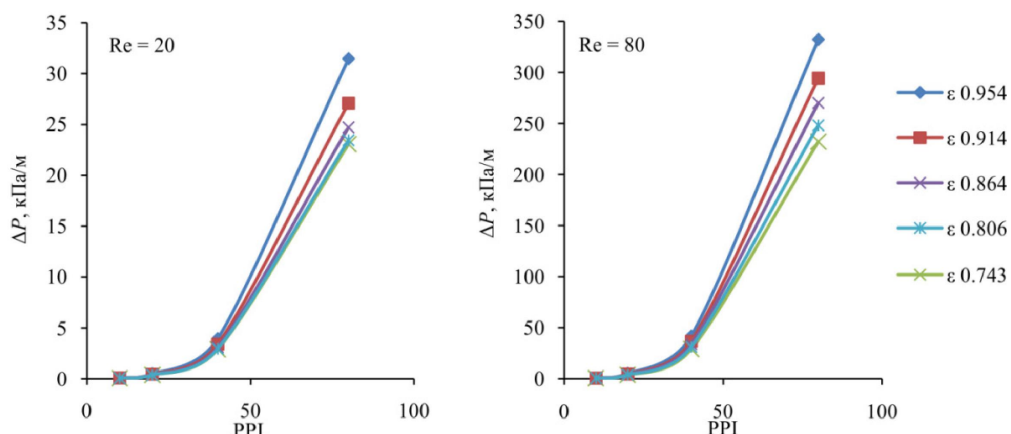


Рис. 5. – Гидравлическое сопротивление пористой среды в зависимости от PPI при различном числе Рейнольдса

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

Список литературы

1. Wang H., Guo L., Chen K. Theoretical and experimental advances on heat transfer and flow characteristics of metal foams // *Sci. China Technol. Sci.* 2020. Vol. 63, № 5. P. 705–718.
2. Chen K. et al. Numerical simulation study on heat transfer enhancement of a heat exchanger wrapped with metal foam // *Energy Reports.* 2022. Vol. 8. P. 103–110.
3. Dixit T., Ghosh I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2016. Vol. 77. P. 28–37.
4. Chen S. et al. Numerical study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators // *Cryogenics.* 2018. Vol. 96. P. 99–107.
5. Kim S.-M., Ghiaasiaan S.M. Numerical Modeling of Laminar Pulsating Flow in Porous Media // *Journal of Fluids Engineering.* 2009. Vol. 131, № 4. P. 041203.
6. Soloveva O., Solovev S., Yafizov R. Hydrodynamics and Convective Heat Transfer in Open Cell Foam with Micropores // *Transportation Research Procedia.* 2021. Vol. 54. P. 64–68.
7. Solovev S.A. et al. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in an Open-Cell Foam Catalyst on Example of the Acetylene Hydrogenation Reaction: 1 // *ChemEngineering. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022. Vol. 6, № 1. P. 11.
8. Diani A. et al. Numerical investigation of pressure drop and heat transfer through reconstructed metal foams and comparison against experiments // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2015. Vol. 88. P. 508–515.
9. Iasiello M. et al. Anisotropic convective heat transfer in open-cell metal foams: Assessment and correlations // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2020. Vol. 154. P. 119682.
10. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Numerical investigation of pressure drop and heat transfer through open cell foams with 3D Laguerre-Voronoi model // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2017. Vol. 113. P. 819–839.
11. Mancin S. et al. Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2013. Vol. 62. P. 112–123.