

1.2.2

А.Р. Хайруллин, А.И. Хайбуллина канд. техн. наукКазанский государственный энергетический университет
Казань, kharullin@yandex.ru**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ПЕН
С ОТКРЫТЫМИ ЯЧЕЙКАМИ**

В работе проведена оценка теплогидравлической эффективности высокопористых сред с открытыми ячейками при различной порозности и плотности пор. Числа Рейнольдса находились в диапазоне от 20 до 80. Рабочей средой был воздух при числе Прандтля 0,71. Теплогидравлическая эффективность пен оценивалась как отношение числа Нуссельта к коэффициенту гидравлического сопротивления. Результаты расчетов показали, что с увеличением порозности и числа Рейнольдса происходит повышение теплогидравлической эффективности пористой среды. Плотность пор не оказывает влияние на теплогидравлическую эффективность пористой среды.

Ключевые слова: пористая среда, теплогидравлическая эффективность, коэффициент гидравлического сопротивления.

Уменьшение габаритов теплообменников по-прежнему остается важной задачей во многих инженерных приложениях. Высокопористые пены с открытыми ячейками нашли широкое применение в различных энергетических системах, ввиду малых габаритов и высоких характеристик теплообмена.

Последние десятилетия использование пористых сред для интенсификации теплообмена и других целей привлекает интерес многих исследователей [1]. Теплоотдача пен с открытыми порами зависит от таких параметров как порозность, режим течения, теплофизических свойств среды, теплопроводности твердого материала и т.д. Режим течения определяется числом Рейнольдса. За характерную длину может приниматься диаметр фибр [2,3], гидравлический диаметр канала [4] заполненного пеной или диаметр пор пены. В работах [5,6] исследовали теплообмен пены из алюминия, в качестве характерного размера использовался диаметр фибр. Порозность находилась в диапазоне от 0,9 до 0,96, показано, что с увеличением числа Рейнольдса происходит повышение теплообмена. В работе [7] исследовали теплообмен в алюминиевой пене в потоке воздуха со скоростью от 1 до 5 м/с. Результаты показали увеличение теплообмена на 300% по сравнению с пустым каналом. Характеристики теплообмена при течении через канал с алюминиевой пеной исследованы в работе [8]. Число Рейнольдса базировалось на диаметре пор. При фиксированном числе Рейнольдса с увеличением порозности теплоотдача алюминиевой пены уменьшалась. В работе [9] экспериментальным методом исследовали теплопередачу при течении в кольцевом пространстве с высокопористой вставкой из алюминиевой пены. Результаты показывают, что алюминиевая пена увеличивает теплопередачу от поверхности по сравнению с ламинарным потоком в чистом кольцевом пространстве. Предложены корреляции для числа Нуссельта. Интенсификация теплообмена при вынужденной конвекции в канале со вставками из пенometалла изучалась экспериментальным методом в работе [10]. По сравнению с пустой трубой вставка из пеннометалла приводит к увеличению теплопередачи до 10 раз. Показано сильное влияние геометрических параметров пены. Показано, что в случае полностью спеченной пены со стенкой трубы, теплообмен выше в среднем на 30%, по сравнению с пеной без соединения со стенкой.

Несмотря на большое количество работ в этой области, оценки теплогидравлической эффективности пористых сред уделено меньшее количество работ. В меньшей степени исследовано независимое влияние геометрических параметров (порозность, число пор на дюйм (PPI)) на теплогидравлическую эффективность пористых сред, ввиду сложности проведения таких экспериментов. Однако такие исследования возможны при проведении математического моделирования. В данной работе проведена оценка влияния геометрических параметров на теплогидравлическую эффективность пористых сред с открытыми порами на основе результатов численных исследований.

Для оценки теплогидравлической эффективности пористых сред были использованы данные, полученные в работе [11] в результате численных исследований. В работе [11] проведено исследования теплообмена и потерь давления в трехмерной пористой структуре. В данной работе рассмотрено влияние количество пор на дюйм (PPI) при значениях PPI 10, 20, 40, 80. Порозность ε соответствовала 0,743, 0,806, 0,864, 0,914, 0,954 при диаметре фибр d_s в мм 0,5, 0,7, 0,9, 1,1, 1,3 соответственно. Число Рейнольдса Re принимало значения 20, 40, 60, 80. Число Прандтля Pr было 0,71. Теплогидравлическая эффективность пористой среды оценивалась как отношение числа Нуссельта Nu к коэффициенту гидравлического сопротивления ξ . При расчете числа Нуссельта за характерную длину принимался диаметр фибр. Коэффициент гидравлического сопротивления определялся по уравнению Дарси-Вейсбаха при известных удельных потерях давления, в качестве характерного размера принимался диаметр фибр.

На рис. 1-3 приведена теплогидравлическая эффективность для пористых сред при различной порозности, PPI и числе Рейнольдса.

На рис. 1 приведена зависимость теплогидравлической эффективности от порозности для различных PPI и Re . Как видно по рис. 1 увеличение порозности приводит к росту отношения Nu/ξ независимо от PPI и числа Рейнольдса. Максимальное увеличение отношения Nu/ξ происходит при максимальном числе Рейнольдса, теплогидравлическая эффективность увеличивается с 3 до 44.

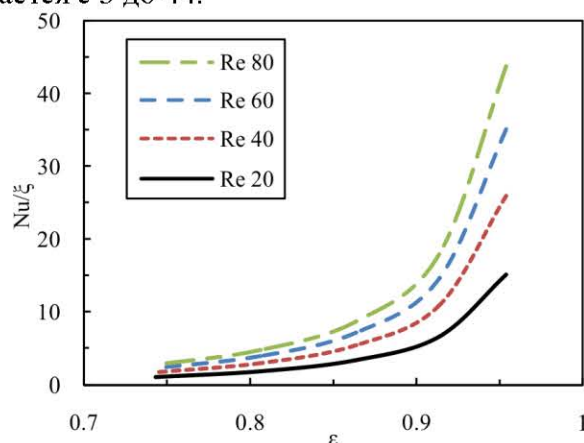


Рис. 1 – Теплогидравлическая эффективность пористой среды в зависимости от порозности при PPI 10 и 20.

На рис. 2 приведена зависимость теплогидравлической эффективности пористой среды в зависимости от плотности пор. Как видно по рис. 2 PPI не оказывает влияние на теплогидравлическую эффективность пористых сред. Следует отметить, что данная зависимость может существенно измениться, при использовании другого характерного размера, при расчете числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления. При выборе диаметра фибр в качестве характерного размера, при оценке теплогидравлической эффективности, уменьшается количество геометрических параметров пористой среды.

На рис. 3 показано влияние числа Рейнольдса на отношение Nu/ξ . По рис. 3 видно, что с увеличением числа Рейнольдса происходит повышение теплогидравлической эффективности независимо от порозности пены. Максимальное влияние число Рейнольдса оказывает на пористую среду с максимальной порозностью.

Проведенная сравнительная оценка теплогидравлической эффективности показывает, что наилучшими теплогидравлическими характеристиками обладают пены с высокой порозностью. При этом максимальной теплогидравлической эффективностью обладают пены с максимальными числами Рейнольдса в исследованном диапазоне числа Рейнольдса от 20 до 80.

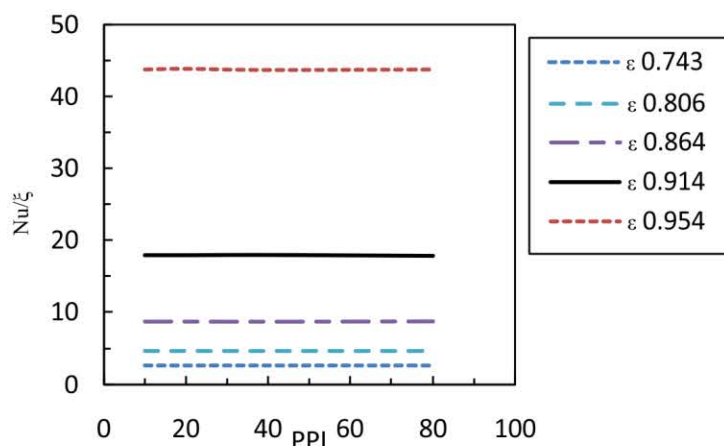


Рис. 2. – Теплогидравлическая эффективность пористой среды в зависимости от PPI при числе Рейнольдса 80.

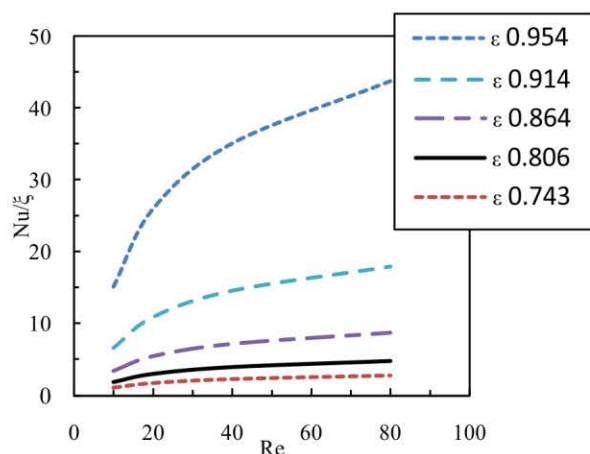


Рис. 3. – Теплогидравлическая эффективность пористой среды в зависимости от числа Рейнольдса при PPI 10.

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. 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.
3. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A. Heat transport phenomena in Voronoi foam due to pulsating flow // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. P. 1236–1243.
4. Dietrich B. Heat transfer coefficients for solid ceramic sponges – Experimental results and correlation // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 61. P. 627–637.
5. 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.
6. Mancin S. et al. Heat Transfer Performance of Aluminum Foams // *Journal of Heat Transfer*. 2011. Vol. 133, № 6. P. 060904.

7. Hamadouche A. et al. Experimental investigation of convective heat transfer in an open-cell aluminum foams // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016. Vol. 71. P. 86–94.
8. Hwang J.-J. et al. Measurement of Interstitial Convective Heat Transfer and Frictional Drag for Flow Across Metal Foams // *Journal of Heat Transfer*. 2002. Vol. 124, № 1. P. 120–129.
9. Noh J.-S., Lee K.B., Lee C.G. Pressure loss and forced convective heat transfer in an annulus filled with aluminum foam // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 33, № 4. P. 434–444.
10. Hutter C. et al. Heat transfer in metal foams and designed porous media // *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66, № 17. P. 3806–3814.
11. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К., Синявин А.А. Теплообмен и гидравлическое сопротивление пористых сред сгенерированных методом диаграммы вороного // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022. № 5. С. 61–64.