

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



XXXIX

СИБИРСКИЙ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ
СЕМИНАР,

посвященный 90-летию
академика РАН А.К. Реброва

28–31 августа 2023 г.,
Новосибирск, Россия

ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Новосибирск
2023

УДК 532+533+534+535+536+537
ББК 22.253+22.32+22.34+22.317+22.33

Ответственные редакторы: Д.М. Маркович, С.В. Алексеенко, А.А. Морозов

Всероссийская конференция «XXXIX Сибирский теплофизический семинар, посвященный 90-летию академика А.К. Реброва»: Труды конференции (28–31 августа 2023 г., Новосибирск, Россия) / отв. редакторы Д.М. Маркович, С.В. Алексеенко, А.А. Морозов; Орг. комитет: Д.М. Маркович [и др.]; Програм. комитет С.В. Алексеенко, А.К. Ребров [и др.]; Сиб. отд-ние РАН [и др.]. – Новосибирск: СО РАН, 2023. 267 с.

Сборник содержит труды Всероссийской конференции «XXXIX Сибирский теплофизический семинар, посвященный 90-летию академика А.К. Реброва», которая проводилась 28–31 августа 2023 года в Новосибирске.

Организационный комитет

Председатель

Маркович Д.М., академик РАН

Заместители председателя

Морозов А.А., д.ф.-м.н.

Сиковский Д.Ф., к.ф.-м.н.

Учёные секретари

Пинаев В.А., к.ф.-м.н.

Юдин И.Б.

Председатель технического комитета

Тимошенко Н.И., к.ф.-м.н.

Зубова С.В., ООО «Научный сервис»

Батаев А.А., д.т.н.

Бердников В.С., д.ф.-м.н.

Бондарь Е.А., к.ф.-м.н.

Горчакова Н.Г., к.ф.-м.н.

Дулин В.М., д.ф.-м.н., проф. РАН

Елистратов С.Л., д.т.н.

Ерманюк Е.В., д.ф.-м.н.

Зарвин А.Е., к.ф.-м.н.

Зайковский А.В., к.ф.-м.н.

Зайцев Д.В., к.ф.-м.н.

Кабов О.А., чл.-корр. РАН

Капшинский О.Н., д.ф.-м.н.

Козлов В.В., д.ф.-м.н.

Кузнецов В.В., д.ф.-м.н.

Куйбин П.А., д.ф.-м.н.

Лукашов В.В., к.т.н.

Макаров М.С., к.ф.-м.н.

Марчук И.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Наумов И.В., д.т.н., проф. РАН

Низовцев М.И., д.т.н.

Новопашин С.А., д.ф.-м.н.

Павленко А.Н., чл.-корр. РАН

Пармон В.Н., академик РАН

Пахомов М.А., д.ф.-м.н., проф. РАН

Плотников М.Ю., к.ф.-м.н.

Прибатурин Н.А., чл.-корр. РАН

Смовж Д.В., д.ф.-м.н.

Станкус С.В., д.ф.-м.н.

Терехов В.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Терехов В.И., д.т.н.

Тулупов А.А., чл.-корр. РАН

Тушикин А.В., д.ф.-м.н.

Федорук М.П., академик РАН

Федяева О.Н., д.х.н., проф. РАН

Чеверда В.В., к.ф.-м.н.

Чекмарев С.Ф., д.ф.-м.н.

Чернов А.А., д.ф.-м.н., проф. РАН

Чиннов Е.А., д.ф.-м.н.

Шарыпов О.В., д.ф.-м.н.

Шторк С.И., д.ф.-м.н.

Яворский Н.И., д.ф.-м.н.

Ярыгин В.Н., д.т.н.

Программный комитет

Сопредседатели

Алексеенко С.В., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Ребров А.К., академик РАН (ИТ СО РАН, Новосибирск)

Алифанов О.М., академик РАН

Аннин Б.Д., академик РАН

Аристов В.В., д.ф.-м.н.

Байдаков В.Г., д.ф.-м.н.

Большов Л.А., академик РАН

Булгаков А.В., д.ф.-м.н.

Булгакова Н.М., д.ф.-м.н.

Бурдуков А.П., д.т.н.

Вараксин А.Ю., чл.-корр. РАН

Васильев А.А., д.ф.-м.н.

Виноградов А.В., д.ф.-м.н.

Востриков А.А., д.ф.-м.н.

Гешев П.И., д.ф.-м.н.

Гогонин И.И., д.т.н.

Головин С.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Гортышов Ю.Ф., академик АН РТ

Горячева И.Г., академик РАН

Губайдуллин Д.А., чл.-корр. РАН

Дедов А.В., чл.-корр. РАН

Драгунов Ю.Г., академик РАН

Дмитриев А.С., д.т.н.

Егоров И.В., член-корр. РАН

Запрягаев В.И., д.т.н.

Исаев С.А., д.ф.-м.н.

Кедринский В.К., д.ф.-м.н.

Клименко А.В., академик РАН

Кирдяшкин А.Г., д.т.н.

Ковалёв К.Л., д.т.н.

Коротеев А.А., академик РАН

Кривцов А.М., чл.-корр. РАН

Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н.

Кустова Е.В., д.ф.-м.н., проф. РАН

Левин В.А., академик РАН

Любимова Т.П., д.ф.-м.н.

Матвиенко В.П., академик РАН

Мессерле В.Е., д.т.н.

Мильман О.О., д.т.н.

Минаев С.С., д.ф.-м.н.

Михеев Н.И., д.т.н.

Морозов Н.Ф., академик РАН

Нагибеда Е.А., д.ф.-м.н.

Нигматулин Р.И., академик РАН

Пенязьков О.Г., академик НАНБ

Петреня Ю.К., чл.-корр. РАН

Петров О.Ф., академик РАН

Покусаев Б.Г., чл.-корр. РАН

Попов Г.А., академик РАН

Предтеченский М.Р., академик РАН

Пухначев В.В., чл.-корр. РАН

Рогалёв Н.Д., д.т.н.

Рудяк В.Я., д.ф.-м.н.

Сапожников С.З., д.т.н.

Сильников М.В., чл.-корр. РАН

Смирнов Е.М., д.ф.-м.н.

Стенников В.А., академик РАН

Суржииков С.Т., академик РАН

Сухинин Г.И., д.ф.-м.н.

Тестоедов Н.А., академик РАН

Фёдоров М.П., академик РАН

Филиппов С.П., академик РАН

Фомин В.М., академик РАН

Хомич В.Ю., академик РАН

Шарафутдинов Р.Г., д.ф.-м.н.

Шахов Е.М., д.ф.-м.н.

Шиплюк А.Н., чл.-корр. РАН

Шмотин Ю.Н., д.т.н.

Якуш С.Е., чл.-корр. РАН

Jiang P.-X., Prof.

Hanjalić K., Prof.

Lengrand J.C., Prof.

Li X., Prof.

Markides C.N., Prof.

Sazhin S.S., Prof.

Travnicek Z., Prof.

Wang Q., Prof.

Издаётся в авторской редакции

ISBN 978-5-6049900-4-9

© Институт теплофизики СО РАН, 2023

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ПОТОКА

Хайруллин А.Р., Хайбуллина А.И., Сиявин А.А.

*Казанский государственный энергетический университет,
420066, Россия, Казань, ул. Красносельская, 51
e-mail: haybullina.87@mail.ru*

Аннотация. В данной работе проведено численное исследование теплогидравлических характеристик симметричных и несимметричных пульсаций на уровне отдельных пор, с учетом сложной трехмерной структуры пористого материала. Построение трехмерной структуры высокопористых пен осуществлялась путем трехмерных тесселяций Вороного с помощью Ansys Fluent. Численное исследование проводилось при числе Рейнольдса 10, 25, 40 и 50. Рабочей средой служил воздух. Три пены были сгенерированы с пористостью 0,743, 0,864 и 0,954 соответствующих диаметру фибр 6,5, 4,5 и 2,5 мм. Результаты показали, что теплогидравлическая эффективность пен выше при несимметричных пульсациях.

Ключевые слова: пористая среда, численное исследование, метод Вороного, пульсация потока, теплогидравлическая эффективность

THERMOHYDRAULIC EFFICIENCY OF POROUS MEDIA UNDER PULSATING FLOW CONDITIONS

Hayrullin A.R., Haibullina A.I., Sinyavin A.A.

*Kazan State Power Engineering University,
420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya Street, 51*

Annotation. In this paper, a numerical study of the thermohydraulic characteristics of symmetric and asymmetric pulsations at the level of individual pores is carried out, taking into account the complex three-dimensional structure of a porous material. The construction of a three-dimensional structure of highly porous foams was carried out by three-dimensional Voronoi tessellations using Ansys Fluent. The numerical study was carried out with Reynolds numbers 10, 25, 40 and 50. The working medium was air. Three foams were generated with a porosity of 0.743, 0.864 and 0.954 corresponding to the diameter of 6.5, 4.5 and 2.5 mm fibers. The results showed that the thermal-hydraulic efficiency of foams is higher with asymmetrical pulsations.

Keywords: porous medium, numerical study, Voronoi method, flow pulsation, thermal-hydraulic efficiency

ВВЕДЕНИЕ

Металлические пены с открытыми порами представляют собой высокопористые материалы с ячеистыми структурами, расположенными в случайном порядке. Несмотря на то, что имеется большее количество теоретических и экспериментальных исследований теплообмена в пористых структурах [1]. Теплообмен и характеристики потока в пористых структурах в основном исследуются при стационарном течении, при этом исследования с вынужденными нестационарными течениями ограничены. Вынужденные пульсации потока являются одним из методов интенсификации теплообмена. Эффективность пульсаций для интенсификации теплообмена показана во многих исследованиях [2]. Поэтому совместное применение пористых структур в условиях пульсирующего потока для интенсификации теплообмена представляет научный интерес.

Исследования пульсирующих течений в пористых структурах имеют ограниченный характер. Экспериментальные исследования осциллирующих течений в пористых структурах проводятся без циркуляции теплоносителя [3–5], что не позволяет сравнить их напрямую со стационарным течением. Численные

исследование с использованием реалистичной трехмерной геометрии пористой среды может быть затруднительно, даже при стационарном течении (в случае больших расчетных областей). Поэтому численная симуляция пульсирующих течений в основном проводятся на двухмерных моделях. В работе [6] получены результаты моделирования в двухмерной пористой структуре, состоящей из пучка труб при пульсирующем течении. В результате моделирования показано, что увеличение частоты приводит к росту гидравлического сопротивления. Авторы [7] численным методом изучали влияние симметричных пульсаций на характеристики теплообмена и гидродинамики в двухмерной пористой среде. В работе показано, что безразмерная частота пульсаций влияет на профили скорости и температуры потока. В другой работе [8] при двухмерном моделировании показано, что число Нуссельта при пульсирующем течении существенно отличается от стационарного течения, при этом интенсификация зависит от частоты и амплитуды пульсаций. В работе [9] авторы также обнаружили, что высокая амплитуда и частота пульсаций приводит к повышению числа Нуссельта при осциллирующем потоке в канале с пористой средой.

При численном исследовании течений в трехмерных структурах используются различные методы [10]. Одним из таких методов является применение трехмерных тесселяций Вороного [11], данный метод совместно с программами трехмерного проектирования позволяет симитировать геометрию пористой среды со случайным расположением пор в пространстве, при заданных характеристиках, такие как количество пор на дюйм, порозность, диаметр фибр и т.д. Численное моделирование теплообмена в пористой среде, сгенерированной путем трехмерных тесселяций Вороного, показывают хорошее совпадение с экспериментальными данными [12].

В данной работе проведено численное исследование теплогидравлических характеристик симметричных и несимметричных пульсаций на уровне отдельных пор, с учетом сложной трехмерной структуры пористого материала. Построение трехмерной структуры высокопористых пен осуществлялась путем трехмерных тесселяций Вороного.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное исследование проводилось при числе Рейнольдса Re 10, 25, 40 и 50. Рабочей средой служил воздух. Три пены были сгенерированы с пористостью ε 0,743, 0,864, 0,954 соответствующих диаметру фибр 6,5, 4,5 и 2,5 мм. Размер одной ячейки D_c пены при всех пористостях составлял 25,4 мм. Для сокращения расчетного времени исследовалось влияние произведения безразмерной амплитуды пульсаций и числа Струхала $(A/D)Sh$, которое принимало значение 0,114, 0,191, 0,268 и 0,344. При всех расчетах частота f пульсаций соответствовала 2 Гц. Пульсации потока имели возвратно поступательный характер. Исследовались симметричные пульсации и несимметричные пульсации со скважностью ψ 0,25. Скважность пульсаций рассчитывалась как отношение первого полупериода пульсаций к общему периоду пульсаций, при этом первый полупериод пульсаций соответствовала развороту потока жидкости. Пористая среда, сгенерированная методом трехмерных тесселяций Вороного, показана на рис. 1. Расчетная область представляла собой прямоугольный канал с буферными зонами на входе и выходе (см. рис. 2). По центру канал располагалась пористая среда. Количество пор по направлению потока для сокращения времени расчета соответствовала 10. Ширина и высота расчетной области составляла 1,6 диаметра от ячейки пены.

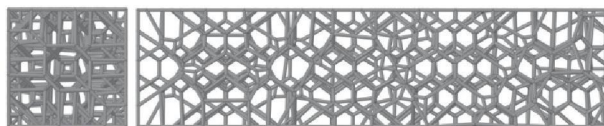


Рис. 1. Геометрия пористой среды, построенная путем трехмерных тесселяций Вороного

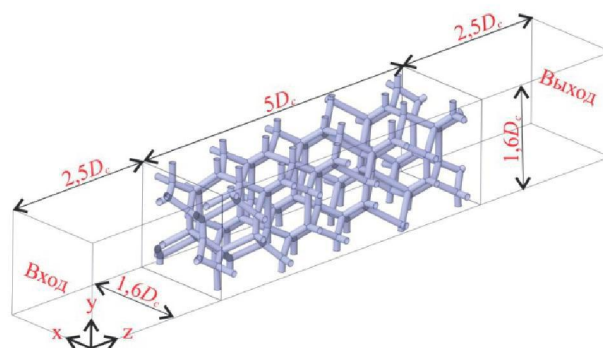


Рис. 2. Расчетная область математической модели для пористости ε 0,954

Численные исследования проводились с помощью Ansys Fluent. Дискретизация уравнений массы момента и энергии осуществлялась методом конечных объемов. На боковых гранях расчетной области задавалось условие симметрия. На стенках пены задавался постоянный тепловой поток. На входе в расчетную область постоянная температура 299,15 К. При стационарном случае на входе пористой среды принималась постоянная скорость, при пульсационном течении пульсации скорости. Количество элементов сеточного решателя, определенное в ходе тестовых расчетов, составило 1,8, 2,1 и 3,4 млн для пористостей 0,743, 0,864, 0,954 соответственно.

Для верификации численного моделирования, число Нуссельта, полученное для стационарного течения при порозности 0,954, сравнивалось с экспериментальными данными других авторов [13, 14], при этом отклонение в числе Нуссельта составило не более 9 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 показаны линии тока при стационарном течении при числе Рейнольдса Re 25 и пористости $\varepsilon = 0,954$.

На рис. 4, 5 показаны линии тока, при симметричной и несимметричной пульсации для разных моментов времени τ относительно периода пульсаций T . Течение потока при пульсирующем течении менее стабильно по сравнению со стационарным потоком.

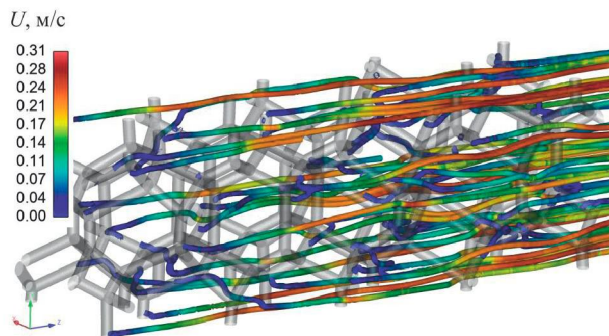


Рис. 3. Мгновенные значения линий тока при стационарном течении при $\varepsilon = 0,954$ $Re = 25$

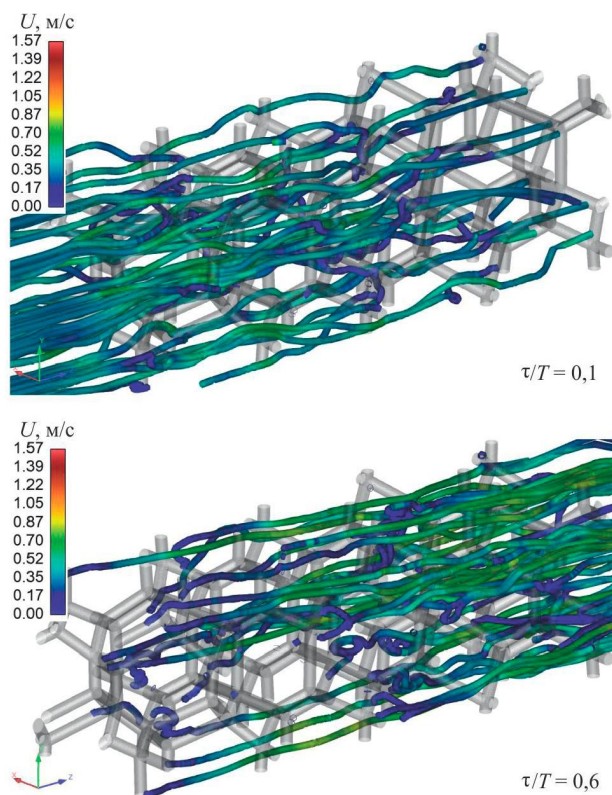


Рис. 4. Мгновенные значения линий тока скорости потока при несимметричных пульсациях при $\varepsilon = 0,954$ $Re = 25$, $(A/D)Sh = 0.344$

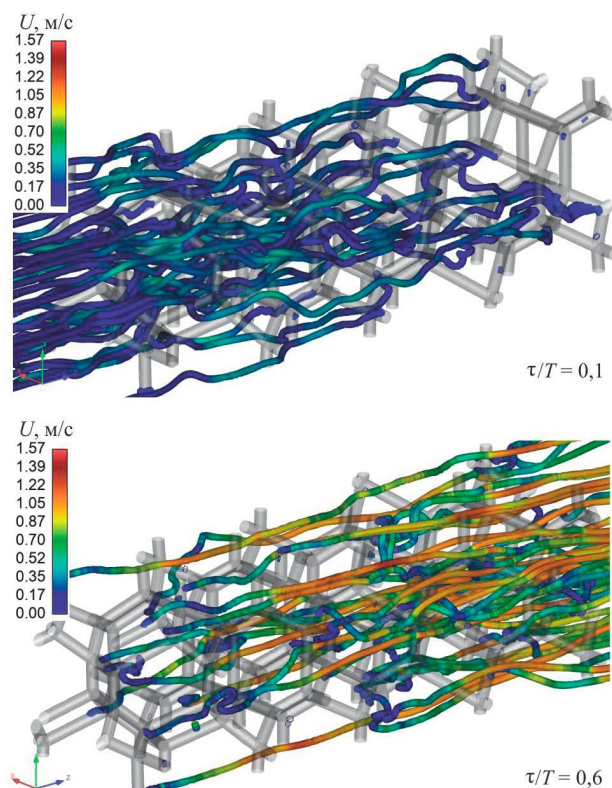


Рис. 5. Мгновенные значения линий тока скорости потока при симметричных пульсациях при $\varepsilon = 0,954$ $Re = 25$, $(A/D)Sh = 0.344$

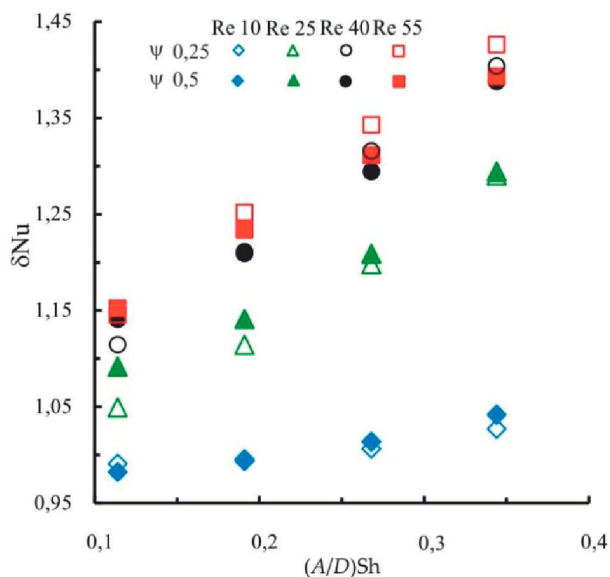


Рис. 6. Зависимость прироста числа Нуссельта δNu от интенсивности пульсаций при $\varepsilon = 0,743$

Анализ качественной картины течения показал, что паттерн течения схож с течением при поперечном обтекании пучков труб. Фибры пены служат препятствием потоку, поэтому позади фибр пены по направлению потока образуются застойные зоны с уменьшенным значением скорости.

На рис. 6 показаны приросты числа Нуссельта в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением, при пористости $\varepsilon = 0,743$. Как видно по рис. 6 повышения произведения амплитуды пульсаций и числа Струхала приводит к росту числа Нуссельта, как при симметричных, так и несимметричных пульсациях.

Симметричные пульсации показывают чуть лучшее усиление теплообмена 4–5 %, при низких числах Рейнольдса в исследованном диапазоне. Несимметричные пульсации, наоборот эффективней при высоких числах Рейнольдса. Различия симметричных и несимметричных пульсаций незначителен, по сравнению с величиной интенсификации теплообмена. Максимальная интенсификация в 43 % достигнута при несимметричных пульсациях, произведения амплитуды и числа Струхала $(A/D)Sh$ 0,344, числа Рейнольдса Re 55 и порозности ε 0,743. Увеличение произведения амплитуды и числа Струхала приводит к увеличению степени интенсификации теплообмена независимо от порозности и режимных параметров. Увеличение чисел Рейнольдса также приводит к повышению степени интенсификации теплообмена

На рис. 7 показано влияние интенсивности пульсаций на рост коэффициента гидравлического сопротивления в пульсационном течении по сравнению со стационарным течением при различном числе Рейнольдса и скважности пульсаций.

Количественная оценка гидравлического сопротивления показала, что для всех исследованных по-

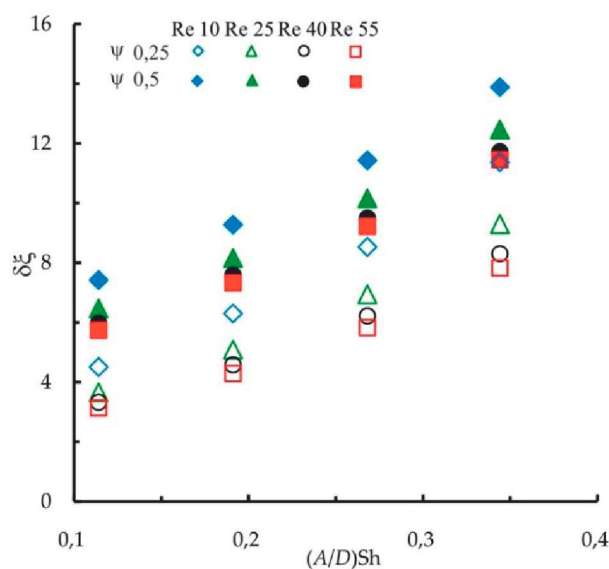


Рис. 7. Зависимость прироста гидравлического сопротивления $\Delta\xi$ от интенсивности пульсаций при $\varepsilon = 0,743$

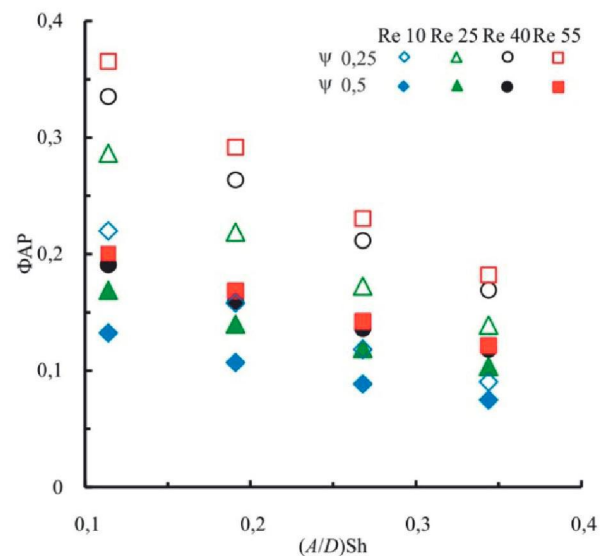


Рис. 8. Теплогидравлическая эффективность в зависимости от интенсивности пульсаций при $\varepsilon = 0,743$

ристостей, чем выше интенсивность пульсаций, тем выше отношение сопротивления, что согласуется с данными, при подобных пульсациях в пучках труб [16]. Рост отношения сопротивления связан с ростом потерь давления за счет увеличения скорости при пульсирующем течении. Скважность пульсаций оказывает существенное влияние на отношение сопротивления. Для всех пористостей, при одинаковом числе Рейнольдса, отношение сопротивления всегда выше при симметричных пульсациях. При симметричных пульсациях, для второго полупериода пульсаций, входная скорость выше, чем при несимметричных пульсациях. Рост потерь давления приходится на фазы пульсаций с максимальной скоростью, что может быть причиной более высоких значений отношений сопротивления при симметричных пульсациях. Как для симметричных, так и для несимметричных пульсаций с уменьшением чисел Рейнольдса происходит повышение отношения сопротивления.

На рис. 8–10 показана теплогидравлическая эффективность пористой среды в пульсирующем потоке, при различных режимных параметрах и пористости, в зависимости от интенсивности пульсаций $(A/D)Sh$.

Теплогидравлическая эффективность основывалась на факторе аналогий Рейнольдса (ФАР) [15] и определялась по следующей формуле

$$\text{ФАР} = \frac{\delta \text{Nu}}{\delta \xi} = \frac{\text{Nu}_\Pi / \text{Nu}_{\text{ст}}}{\xi_\Pi / \xi_{\text{ст}}},$$

где Nu_Π , $\text{Nu}_{\text{ст}}$, ξ_Π , $\xi_{\text{ст}}$ – число Нуссельта и коэффициент гидравлического сопротивления при пульсационном и стационарном течении.

Для всего исследованного диапазона, теплогидравлическая эффективность, основанная на факторе аналогий Рейнольдса (ФАР), была меньше одного.

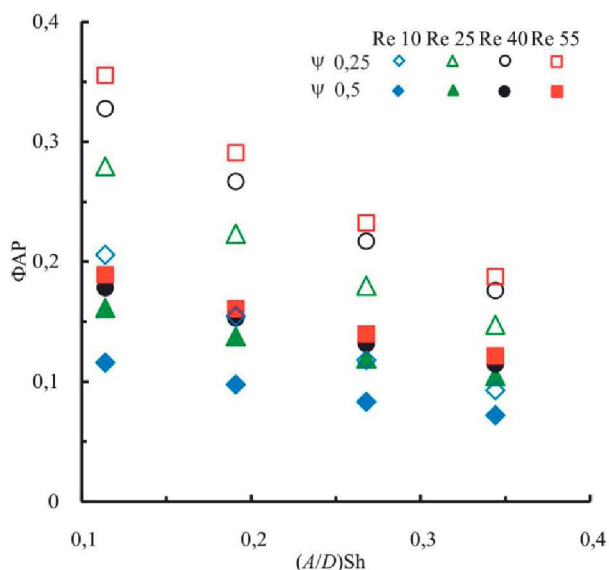


Рис. 9. Теплогидравлическая эффективность в зависимости от интенсивности пульсаций при $\varepsilon = 0,864$

Увеличение интенсивности пульсаций приводило к уменьшению ФАР. Интенсификация теплообмена могла быть выше как при симметричных, так и несимметричных пульсациях. При этом ФАР был выше при несимметричных пульсациях потока, что связано с тем, что рост гидравлического сопротивления при симметричных пульсациях был выше. Отношение сопротивления выше при минимальном числе Рейнольдса, при этом отношение числа Нуссельта выше при максимальном числе Рейнольдса, поэтому увеличение числа Рейнольдса приводило к повышению ФАР. Максимальное значение ФАР для всех исследованных пористостей 0,743, 0,864 и 0,954 составило 0,37, 0,35 и 0,28 соответственно. Повышение пористости

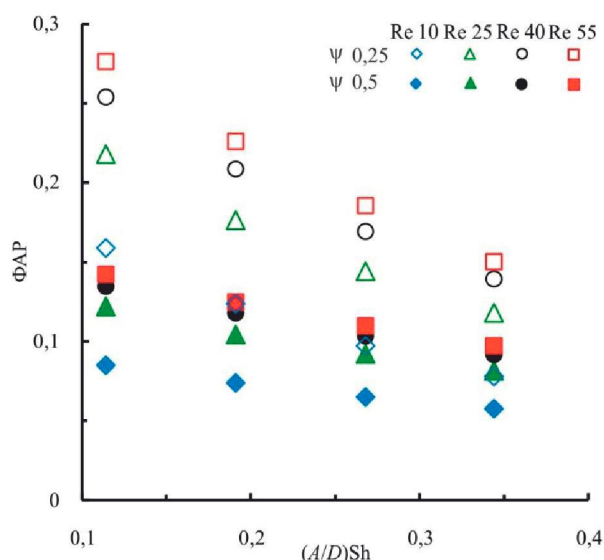


Рис. 10. Теплогидравлическая эффективность в зависимости от интенсивности пульсаций при $\varepsilon = 0,954$

оказывало незначительный эффект на ФАР, в диапазоне пористостей от 0,743 до 0,864. При повышении пористости до 0,954 происходило снижение ФАР.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 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. P. 705–718.
2. Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 196. P. 117275
3. Bağcı Ö., Arbak A., De Paep M., Dukhan N. Investigation of Low-Frequency-Oscillating Water Flow in Metal Foam with 10 Pores per Inch // *Heat Mass Transfer* 2018. Vol. 54. P. 2343–234.
4. Leong K.C., Jin L.W. Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam //

International Journal of Heat and Fluid Flow. 2006. Vol. 27, No. 1. P. 144–153.

5. Ni M. et al. A quantitative method to describe the flow characteristics of an oscillating flow including porous media // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 119. P. 860–866.
6. Kim S.-M., Ghiaasiaan S.M. Numerical Modeling of Laminar Pulsating Flow in Porous Media // *Journal of Fluids Engineering*. 2009. Vol. 131, No. 4. P. 041203
7. Dai Q., Yang L. LBM numerical study on oscillating flow and heat transfer in porous media // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 54, No. 1. P. 16–25.
8. Chen S. et al. Numerical study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators // *Cryogenics*. 2018. Vol. 96. P. 99–107.
9. Ghafarian M., Mohebbi-Kalhor D., Sadegi J. Analysis of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with metal foam using computational fluid dynamics // *International Journal of Thermal Sciences*. 2013. Vol. 66. P. 2–50.
10. Abishek S. et al. Generation and validation of virtual non-woven, foam and knitted filter (separator/coalescer) geometries for CFD simulations // *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 188. P. 493–507.
11. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Modeling structures of open cell foams // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 131. P. 160–169.
12. 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.
13. Mancini 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.
14. Calmidi V.V., Mahajan R.L. Forced Convection in High Porosity Metal Foams // *Journal of Heat Transfer*. 2000. Vol. 122, № 3. P. 557–565.
15. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена И.А. Попов, Х.М. Махьянов, В.М. Гуреев; Под ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Изд. Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
16. Ilyin V.K. Haibullina A.I., Hayrullin A.R., Sabitov L.S. Thermal and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 240. P. 012025.